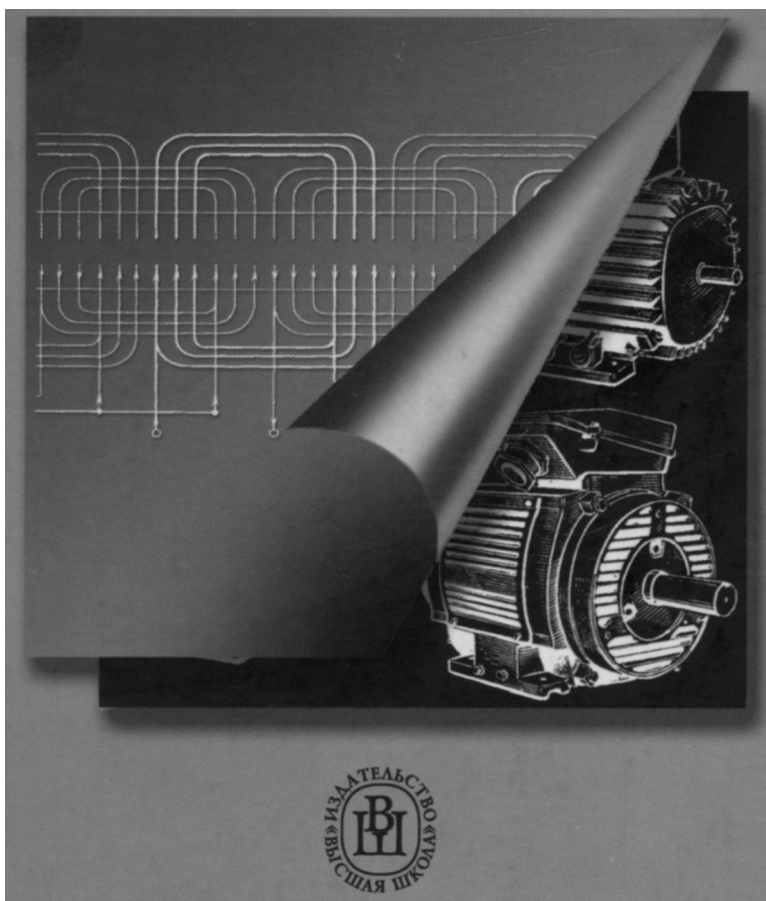


Д.А. АВЕТИСЯН

Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств



Предисловие

Ускоренные темпы научно-технического прогресса в значительной степени обязаны достижениям в области электротехники. В настоящее время трудно представить наш быт и народное хозяйство без тотального использования электротехнических систем (ЭТС) и устройств в самом широком понимании. К ЭТС можно отнести как системы в буквальном смысле, например системы электроэнергетики или электроавтоматики, так и сложные электротехнические устройства (приборы и агрегаты), состоящие из ряда составных функциональных и конструктивных частей. Множество разнообразных ЭТС можно представить и классифицировать с помощью многоуровневого (многоэтажного) графа (рис. П.1). В соответствии с ним все множество ЭТС делится на два подмножества верхнего уровня: электроэнергетические системы (ЭЭС) и электроинформационные системы (ЭИС). В ЭЭС главными являются процессы получения, преобразования и потребления электроэнергии, а в ЭИС — такого же рода процессы, но применительно к переработке информации. В действительности деление на ЭЭС и ЭИС носит условный характер, так как степень взаимной интеграции этих систем достаточно велика. Сегодня нельзя представить управление ЭЭС без использования и переработки информационных сигналов и, наоборот, функционирование ЭИС без наличия электроэнергии. Несмотря на это, условное разделение главных и второстепенных процессов значительно облегчает классификацию ЭТС по их основному функциональному назначению.

Дальнейшую детализацию классификационной схемы на следующих уровнях можно осуществлять по разным признакам: функциональным, структурным, параметрическим и иным, включая комплексные. В приведенном примере в ЭЭС выделены системы генерирования, преобразования, передачи и потребления электроэнергии. В ЭИС, в свою очередь, **выделены** системы автоматики, радио и связи, электронно-вычислительные и другие информационные системы и сети. Каждая из этих ЭТС также делится на несколько подсистем нижнего уровня и т. д. Например, в системах передачи электро-



Рис. П.1. Схема классификации электротехнических систем

энергии отдельно можно выделить электрические сети, которые затем разделить на сети постоянного и переменного тока. Поступая так, можно строить классификационные схемы ЭТС с любой степенью детализации. При этом следует учесть, что ЭТС на нижних уровнях могут быть как составными подсистемами, входящими в системы верхних уровней, так и отдельными, автономно действующими системами. На самом нижнем уровне находятся системы и устройства, рассматриваемые в качестве неделимых элементов, например электрические машины или приборы. По отношению к ЭЭС они, как правило, рассматриваются как неделимые элементы. Если же их рассматривать самостоятельно, то они и в функциональном, и в конструктивном плане представляют собой примеры сложных ЭТС. В целом схема на рис. П.1 открыта для включения всех уже известных и вновь создаваемых ЭТС и устройств.

Потребность в новых разработках ЭТС и устройств удваивается или утраивается примерно каждые десять лет. Быстро растут и требования к их технико-экономическим показателям. Эти потребности не могут быть удовлетворены за счет пропорционального роста чис-

ла разработчиков и проектных организаций, как это делалось раньше. Требуется переход от традиционных технологий проектирования ЭТС и устройств к автоматизации всех этапов разработки, включая технологию роботизированного производства новых изделий на базе ЭВМ. Такая возможность наметилась в 50-х годах прошлого века, когда после Второй мировой войны было начато ускоренное развитие многих видов новой техники, включая вычислительную технику.

В электротехнике первые работы по автоматизации проектирования были начаты в СССР и США. В нашей стране пионерскими стали работы по расчету асинхронных двигателей на ЭВМ первого поколения, выполненные под руководством проф. Т.Г. Сорокера и проф. **Б.М. Кагана** во Всесоюзном НИИ электромеханики, и расчету авиационных синхронных генераторов, выполненные под руководством автора в Московском авиационном институте. Повышение производительности проектных расчетов на базе ЭВМ оказалось столь значительным, что эта проблематика привлекла внимание ученых и инженеров многих научно-исследовательских институтов, вузов и заводов. ЭВМ дали возможность с научной точки зрения подойти к рассмотрению процессов проектирования. К проектным расчетам были привлечены методы прикладной математики и кибернетики. Формальный подход к постановке задач проектирования, расчетному моделированию объектов проектирования и выбору проектных решений перевел процессы проектирования из области искусства в область строгих логико-математических исследований.

С помощью расчетов на ЭВМ был сделан переход на качественно новую ступень проектирования, которая позволила искать не одно проектное решение, а множество возможных решений в заданной области параметров и характеристик проектируемых изделий. Таким образом, появилась возможность автоматически получать не один проект, а сразу целое множество проектов в виде многопараметрических рядов или серий объекта проектирования. Результаты научных исследований и проектных разработок в этом направлении заложили основу теории и методологии проектирования ЭТС и устройств на ЭВМ. Материалы этих работ были включены в учебные курсы ряда ведущих вузов. На базе обобщения и систематизации результатов, полученных в МАИ, была опубликована первая монография по оптимизации расчетных проектов электрических машин [1].

Качественно новый этап в развитии автоматизированного проектирования связан с появлением ЭВМ третьего поколения и сис-

тем машинной графики. Он охватывает все стадии проектирования в совокупности: расчет, конструирование, технологическую подготовку производства и выпуск технической документации. На базе ЭВМ третьего поколения созданы достаточно развитые системы автоматизации проектирования (САПР), которые смогли обеспечить коллективный доступ к единой базе проектных данных всем разработчикам проекта (расчетчикам, конструкторам и технологам) и тем самым ускорили и улучшили качество их совместной работы. Однако вследствие большого разнообразия выпускаемых ЭВМ их программного обеспечения, а также применяемых формальных методов проектирования первые САПР строились с учетом специфики, нужд и возможностей проектных организаций индивидуально. Дальнейшее повышение эффективности действующих САПР требовало наведения порядка и стандартизации методов и средств автоматизированного проектирования.

Работу по разработке стандартов для САПР организовал Государственный комитет по стандартам вместе с отраслевыми институтами стандартизации [2]. Стандартизация САПР открыла возможности построения базовых отраслевых САПР и их тиражирования в ведущих проектных организациях соответствующих отраслей. Массовая автоматизация в области проектирования помогла резко повысить производительность труда проектировщиков, сократить сроки и повысить качество новых проектов. С целью обмена опытом и пропаганды достижений по созданию САПР в области электротехники в 1976 г. по инициативе акад. А.И. Берга и акад. Б.Н. Петрова при Совете по кибернетике АН СССР был создан под руководством автора постоянно действующий всесоюзный семинар «Автоматизация проектирования электротехнических устройств и систем». Аналогичная подсекция по инициативе акад. К.С. Демирчяна была открыта в Совете АН СССР по комплексной проблеме «Электрофизика и электроэнергетика».

Проблема автоматизированного проектирования ЭТС и устройств привлекла также внимание специалистов авиационной промышленности. По инициативе акад. Г.В. Новожилова и проф. А.Ф. Федосеева была принята многолетняя программа совместных комплексных исследований по автоматизации проектирования бортового электрооборудования и электросистем в рамках двух министерств: авиационной промышленности и высшего образования. В результате этих исследований в 1975—1985 гг. были разработаны теоретические основы, алгоритмы и программы автоматизированного проектирования таких сложных ЭТС, как системы бортового электроснабжения и электрооборудования для современных больших самолетов. Боль-

шинство программ было апробировано и использовано в практике работ конструкторских бюро им. Ильюшина, им. Туполева и др. Материалы исследований по этой программе, а также труды указанного выше всесоюзного семинара обобщены и систематизированы в двух книгах **автора** «Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей» и «Автоматизация проектирования электрических систем», изданных «Высшей школой» [3, 4].

Появление персональных ЭВМ с применением микроминиатюрных схем и приборов электроники ускорило развитие робототехники и автоматизацию производственных процессов. Это позволило осуществить переход к конвейерным системам автоматизации, соединяющим САПР с автоматизированными системами управления производством (АСУП). Для проведения широкомасштабных исследований в этом направлении в 1984 г. Академия наук и Государственный комитет СССР по науке и технике совместно приняли решение об образовании межведомственного научно-производственного коллектива «Время» (научный руководитель — акад. К.С. Демирчян). В этом коллективе приняли активное участие многие ведущие специалисты электротехнической, авиационной, радиоэлектронной, приборостроительной и других отраслей, а также ведущих вузов страны. К 1990 г. многие результаты коллектива «Время» получили практическую апробацию и внедрение в производство.

К сожалению, в 90-е годы XX в. финансирование научно-конструкторских разработок прекратилось, формировавшиеся годами творческие коллективы распались, а дальнейшее внедрение систем автоматизации в промышленность приостановилось. Многолетний провал (спад) в уровне научно-технического развития России продолжается и сейчас, но тенденция к возрождению промышленного потенциала и выходу из кризисной ситуации уже намечается. Это накладывает особые требования к подготовке инженерных и научных кадров, перед которыми встает задача ускоренного восстановления и дальнейшего роста нашей промышленности. Задача эта может быть успешно решена при условии кардинальной замены изношенного и устаревшего оборудования новым, а также внедрения современных автоматизированных технологий на всех этапах проектирования и производства новой конкурентоспособной промышленной продукции. Только таким образом можно наверстать потерянное время и встать в один ряд с другими промышленно развитыми государствами.

В учебной литературе для вузов тематика автоматизированного проектирования объектов электротехники в достаточно полном

объеме отражена в двух книгах автора, опубликованных издательством «Высшая школа» [3, 4]. Одна из них посвящена автоматизации проектирования электромеханических преобразователей, которые относятся к ЭТС типа сложных устройств. В ней изложены общие вопросы теории и методологии автоматизированного проектирования электрических машин, которые продемонстрированы на примерах авиационных генераторов и сельсинов. Содержание второй книги является дальнейшим развитием теории и методологии автоматизации проектирования применительно к ЭТС высшего уровня. Общие подходы рассматриваются на примерах самолетных систем электроснабжения, электросетей и электросхем. Обе книги в совокупности охватывают практически все специфические особенности проектирования различных систем и устройств электротехники.

Учитывая преемственность этих книг и общность теоретических основ, имеет смысл их объединить и переиздать в виде одной книги без заметного увеличения объема нового издания. Эта цель достигнута в данной книге, которую можно считать расширенным и дополненным переизданием предыдущих. Она носит более фундаментальный характер и адресована в качестве учебного пособия студентам всех электротехнических и смежных специальностей (электроэнергетика, электрофизика, электрохимия, электромеханика, приборостроение, автоматика и управление, электроника, вычислительная техника, робототехника, ракетно-космическая и авиационная техника, морская техника, наземные транспортные средства и электротехнологии). Пособие будет также полезно аспирантам, преподавателям, инженерам и научным сотрудникам, которые специализируются в направлении автоматизации проектирования ЭТС и их элементов.

При планировании книги и подборе материалов преследовались следующие цели.

1. Изложить теоретические основы автоматизированного проектирования объектов электротехники на современном уровне, сохраняя при этом преемственность с теорией и практикой проектирования в конструкторских бюро. С этой целью в книге широко используются известные теоретические положения и методы электротехники, прикладной математики, моделирования сложных систем и устройств, а также принятые в авиации методы исследования и проектирования бортовых электросистем и электрооборудования.

2. Ограничить содержание главным образом работами, выполненными автором персонально или совместно с коллегами, студен-

тами и аспирантами. Результаты других авторов излагаются кратко с ссылками на соответствующие оригиналы. Кроме того, полагается, что многое известно студентам из прочитанных им ранее традиционных курсов, например, таких, как теоретическая электротехника, теория и проектирование электрических машин, вычислительная техника, автоматика и др. Это позволяет сконцентрировать внимание читателей на главных аспектах книги и избежать ненужных повторов.

3. Систематизировать, обобщить и пропагандировать достижения научной школы по автоматизации проектирования электротехнических систем и устройств, которая формировалась автором в течение многих лет (1962—1993). Ядро этой школы составили научные работники, труды которых отмечены в перечне использованной литературы. Автор считает также своим приятным долгом назвать их поименно. Это — кандидаты технических наук **В.Х. Хан**, **В.С. Соколов**, **В.К. Коляда**, **С.В. Гуров**, **А.А. Трахтенберг**, **А.Р. Пяхлеванян**, **О.В. Винский**, **О.П. Шедрин**, **О.М. Глухов**, **С.А. Чобанян**, **А.А. Малютин**, **В.Е. Ледер**, **И.М. Чернова**, **А.А. Созыкин**, **М.С. Уколов**, **В.В. Козлов**, **В.Б. Баль**, **В.А. Цехмейструк** и инженеры **Ю.В. Кирюшкин**, **Д.Д. Исагулов**, **Ф.С. Геворкян**, **А.Ю. Фохт-Бабушкин**.

Если указанные цели достигнуты и новое издание окажется более полезным для широкого круга читателей, то автор не будет считать свой труд над этой книгой напрасным. Все замечания и пожелания по дальнейшему улучшению содержания книги направлять по адресу: 127994, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

Г Л А В А 1

Введение в автоматизацию проектирования

§ 1.1. Развитие методов и средств проектирования

Процесс проектирования в широком смысле означает планирование человеком или группой людей своей конкретно направленной деятельности в ближайшем будущем. Эти процессы такие же древние, как и сознательная деятельность вообще. Они связаны с мысленным моделированием своего будущего в виде неких воображаемых действий. Мысленные модели могут иметь различные формы, начиная от расплывчатых грез и мечтаний и кончая вполне реальными планами. На начальной стадии развития человека мысленное планирование было необходимо для изготовления орудий труда, организации охоты, строительства жилья и т. д. Со временем эти планы становились сложнее, их нельзя было запомнить и возникла надобность в сохранении планов в виде рисунков, надписей, схем и других символических изображений. С появлением бумаги и письменности планы стало возможно не только сохранять, но и тиражировать. Особо важное значение это имело в области строительства и архитектуры городов, строительства дорог, мостов, морских судов и других сложных технических объектов. Бурный научно-технический прогресс последних столетий выделил техническое проектирование как самостоятельное направление планирования. Чтобы ясно представить процессы проектирования объектов техники и строительства, надо в первую очередь определить, что подразумевается под понятием проекта сложного объекта или системы.

Проект технического изделия — это совокупность данных и описаний, которая дает необходимую информацию для изготовления и

эксплуатации объекта проектирования. Проектная информация оформляется в виде проектной документации, состоящей из текстов, таблиц, схем, графиков, чертежей и спецификаций. Проектную документацию в целом можно рассматривать как полную информационную модель объекта проектирования, достаточную для его практической реализации. Этой модели присущи все основные технико-экономические **характеристики**, которые будут воплощены в новом изделии при его производстве и эксплуатации.

Приведенное определение проекта технического изделия позволяет рассматривать процесс проектирования (или, короче, проектирование) как целенаправленную деятельность по последовательному информационному моделированию объекта проектирования. Первоначальная и наименее полная модель составляется на основе исходной информации задания на проектирование. Затем начальная модель многократно преобразуется во все более полные модели до тех пор, пока не будет получена конечная полная модель объекта проектирования. Таким образом, *процесс проектирования* представляет собой многоэтапный процесс преобразования информации с последовательным накоплением и последующим использованием информации на отдельных этапах.

Объем проектных работ, как правило, настолько велик, что в приемлемые сроки его невозможно выполнить одному человеку. Поэтому эти работы распределяются между различными людьми, т. е. процесс проектирования — это коллективная деятельность, направленная на получение полной проектной документации. Коллективная деятельность по проектированию реализуется в рамках организационных структур, принятых в отдельных проектных организациях и подразделениях. Формы организации деятельности по проектированию существенно зависят от ряда факторов: содержания объекта проектирования, уровня профессиональной подготовки проектировщиков, имеющихся в распоряжении методов и средств проектирования.

Для начального периода проектирования (примерно до 40-х годов XX в.) характерна форма, которую можно назвать *ручным индивидуальным проектированием*. В этот период производилась ограниченная номенклатура технических изделий, имеющих сравнительно простую конструкцию. Многие изделия создавались впервые, без прототипов, и требовали принятия оригинальных проектных решений. Труд проектировщиков в целом был творческим, доля рутинных работ, т. е. работ нетворческого, механического характера, составляла не более 30%. Методы и средства проектирования были также простейшими. Расчетные методики в значительной мере опирались на приближенные зависимости и эмпирические коэффици-

енты. Технические средства проектирования ограничивались кульманом, логарифмической линейкой, готвальней и т. п. Проектная документация во многих крупных организациях имела свою собственную систему оформления и обращения, что затрудняло передачу документации в другие организации.

Индивидуальное проектирование сыграло прогрессивную роль в становлении технических отраслей, создании качественно новых, высокоэффективных для того времени технических устройств и систем. Однако с ростом количества типоразмеров, расширением номенклатуры выпускаемых изделий и усложнением их конструкции индивидуальная форма проектирования начала тормозить дальнейшее развитие промышленности. Противоречия между потребностями промышленности и возможностями индивидуального проектирования были устранены путем перехода к новой форме проектирования, которую в общем принято называть *ручным типовым проектированием*.

Период ручного типового проектирования охватывает примерно 40—60-е годы и характеризуется внедрением методов группового проектирования, агрегирования и унификации.

Метод группового проектирования заключается в том, что проектируется не одно конкретно требуемое изделие, а целое семейство (параметрические ряды) конструктивно подобных изделий, которое удовлетворяет всем существующим и прогнозируемым условиям их использования. Благодаря однотипности объектов и процессов проектирования производительность группового проектирования параметрических рядов изделий значительно выше, чем при индивидуальном проектировании отдельных изделий.

Сущность *методов агрегирования и унификации* первоначально заключалась в разработке минимального количества типовых конструктивных деталей и узлов, которые затем будут многократно использованы при проектировании различных изделий. В последующем унификация охватила все сферы проектирования, включая и организационные, и оказала существенное влияние также на организацию специализированных производств составных частей изделий. Благодаря агрегированию и унификации повысилась не только производительность труда проектировщиков. Появились также новые возможности повышения надежности изделий путем реализации принципов функциональной и монтажной взаимозаменяемости их составных частей.

В 50-е годы осуществлен переход к *единой системе конструкторской документации (ЕСКД)*, которая установила единые правила ее оформления и обращения.

Одновременно с методами проектирования получили развитие также *технические средства проектирования*. Появились арифмометр, быстродействующие печатающие устройства типа «Оптим», различные средства быстрого размножения проектной документации. Началась механизация процесса проектирования. Таким образом, возможности процесса проектирования в целом резко возросли и при соответствующем росте числа проектировщиков оказались в определенный период достаточными для удовлетворения потребностей промышленности в новых разработках.

Наряду с важными преимуществами типового проектирования проявились и его недостатки, связанные в основном с ручной формой обработки информации. Внедрение методов унификации и стандартизации привело к резкому сокращению доли творческого труда в работе проектировщика. Использование многочисленных справочников, стандартов и других нормативных документов, а также типовых проектных решений существенно увеличило трудоемкость проектирования.

Доля рутинных работ в проектировании превысила 60%, а сроки проектирования сравнялись со сроками изготовления и испытаний. Увеличилась численность среднего звена инженерно-технических работников, снизилась привлекательность и престижность труда проектировщиков. Постоянно растущие потребности в новых проектных разработках нельзя было удовлетворить за счет пропорционального роста проектных организаций при сохранении форм типового проектирования. Возникла необходимость в коренной перестройке форм проектирования, направленной на повышение качества проектов, сокращение сроков и трудоемкости проектирования.

Применение ЭВМ и их периферийных устройств в качестве принципиально новых технических средств проектирования явилось основой для радикального преобразования процесса проектирования. С этого времени (60-е годы) начался *период автоматизированного проектирования*, который характеризуется следующими важными преимуществами. Новые средства проектирования дали возможность для практического использования и принципиально новых методов проектирования (методов математического моделирования, методов оптимизации, принятия решений и т. п.). В результате не только многократно возросла производительность труда проектировщиков, но и резко повысилось качество проектов. Появилась возможность анализа большого числа вариантов в процессе проектирования, использования хотя и сложных, но зато более точных моделей объектов проектирования, исключения ошибок в расчетах и при формировании проектной документации. Высокое качество проектов, в

свою очередь, приводит к существенному сокращению объема работ по созданию опытных образцов и экспериментальной доработке объектов проектирования. Изменился также характер труда проектировщиков, вновь начала расти доля творческого труда.

Формы и масштабы автоматизированного проектирования развиваются теперь вместе с развитием вычислительной техники и программирования. Так, при использовании ЭВМ первого поколения (55—65-е годы) решалась в основном задача автоматизации поверочных расчетов. Для выполнения конкретных расчетов составлялись жесткие программы, практически не поддающиеся тиражированию.

Первые результаты позволили увеличить производительность расчетов. Например, время поверочного расчета асинхронного двигателя сократилось от нескольких дней до нескольких минут. Это позволило резко увеличить количество анализируемых вариантов проекта. Однако возникло противоречие между возможностью расчета большого числа вариантов на ЭВМ и ограниченной возможностью «ручного» анализа вариантов проектировщиком. Необходимо было автоматизировать не только расчеты, но и процессы анализа вариантов и принятия решений.

Это противоречие было устранено с помощью ЭВМ второго поколения (65—75-е годы). Благодаря увеличению быстродействия и объема памяти ЭВМ появилась возможность осуществлять **много-**вариантный анализ и выбор с помощью методов поиска **оптимума**. Получаемые на ЭВМ расчетные проекты стали оптимальными и обеспечивали заметный выигрыш в показателях качества по сравнению с ручным проектированием. Несмотря на достигнутые успехи, полученные в этот период, результаты такого проектирования не находили массового распространения, так как не охватывали наиболее весомой доли проектирования — конструкторско-технологических работ.

Задача *автоматизации конструкторско-технологических работ* начала решаться с появлением ЭВМ третьего поколения и машинной графики (1975 г. и далее). Ускоренными темпами стали создаваться программно-технические средства, ориентированные на организацию коллективной деятельности проектировщиков различного профиля (расчетчиков, конструкторов, технологов), не имеющих специальных познаний в программировании и вычислительной технике.

Решенные задачи по автоматизации всех основных видов проектных работ позволили поставить вопрос о переходе от автоматизации отдельных проектных процессов к автоматизации всей проектной деятельности в рамках организации или ее подразделений. Эта

важная научно-техническая и народнохозяйственная задача решается путем создания систем автоматизированного проектирования (САПР), обеспечивающих требуемое соответствие между непрерывно возрастающими потребностями в проектировании все более сложных технических изделий и систем и возможностями удовлетворения этих потребностей в условиях ограниченных трудовых и материально-технических ресурсов. САПР относятся к многоцелевым системам, позволяющим комплексно решать следующие основные задачи: повышение качества новых разработок, сокращение сроков новых разработок, уменьшение стоимости новых разработок, а также стимулирование творческой деятельности проектировщиков.

Создание и массовое внедрение САПР представляет проблему государственного уровня, имеющую очень важное значение практически для всех отраслей. Поэтому ее решение в Советском Союзе было начато в рамках специальных межотраслевых и отраслевых комплексно-целевых программ. В ведущих отраслях были выделены головные научно-исследовательские институты и конструкторские бюро, отвечающие за создание САПР применительно к конкретным классам объектов проектирования. Например, в военно-промышленном комплексе ответственность за развитие работ по САПР была возложена на Министерство авиационной промышленности. Академия наук СССР и Госкомитет по науке и технике возглавили исследования теоретических и общесистемных вопросов. К разработкам конкретных САПР были также привлечены ведущие высшие учебные заведения страны. Благодаря указанным мерам на проблематике САПР удалось сконцентрировать усилия нужных ученых и специалистов, а также организовать централизованное финансирование и распределение ресурсов, особенно ввозимой в страну из-за рубежа современной вычислительной техники.

Большую роль в создании САПР сыграли также появившиеся к тому времени персональные компьютеры, обладавшие значительными преимуществами в сравнении с предыдущими большими и малыми ЭВМ. Персональные компьютеры освободили инженеров от необходимости учить специальные (пусть даже универсальные) языки для общения с ЭВМ. Кроме того, с помощью персональных ЭВМ стало значительно проще строить вычислительные сети и организовать совместную работу проектировщиков. На основе персональных ЭВМ создавались рабочие места для инженеров-проектировщиков. Буквально в считанные дни инженеры осваивались на новых рабочих местах и могли приступить непосредственно к своей профессиональной деятельности. Общение с коллегами по проекту тоже облегчилось. Не надо было терять время на хождение друг к

другу и долгие согласования. Общение стало также виртуальным. Все это способствовало решению проблемы автоматизации проектных работ в сжатые сроки.

В 75—90-е годы в головных проектных организациях таких ведущих отраслей, как машиностроение, электроника, электротехника и др., были введены в строй достаточно развитые САПР. Их эксплуатация показала, что практическое применение новой и самой современной технологии проектирования дает большой технико-экономический и социальный эффект. Значительные успехи были достигнуты не только в практике, но и в теории проектирования. Техническое проектирование, требующее ранее от инженеров большого искусства и опыта работы, теперь превратилось в научную дисциплину, которой можно овладеть уже в стенах высших учебных заведений. К сожалению, дальнейшее развитие и тиражирование САПР во все отрасли народного хозяйства приостановилось из-за периода «перестройки» в нашей стране. Это лишний раз подчеркивает необходимость изучения студентами ранее полученных достижений и накопленного опыта в области автоматизации проектирования. Использование приобретенных знаний и навыков принесет большую пользу в дальнейшей работе.

§ 1.2. Концептуальные основы САПР

САПР является организационно-технической (человекомашинной) системой, которая создается с целью взаимодействия проектировщиков и программно-технических средств в процессе проектирования. Взаимодействие осуществляется коллективно, т. е. САПР обеспечивает совместную работу группы проектировщиков и группы специалистов по программированию и ЭВМ. Проектировщики занимаются передачей, обработкой и оформлением проектной информации на различных стадиях проектирования, а в функции программистов и компьютерщиков входит непосредственно создание и развитие САПР. Такое краткое определение САПР отражает ее **основополагающие** концепции, которые более детально рассмотрим ниже.

В создании САПР ведущая роль принадлежит человеку. Присутствие людей в работе САПР необходимо не только в качестве обслуживающего персонала для поддержания и развития программно-технических средств. Человек играет центральную роль в реализации самого процесса проектирования с помощью САПР, так как ни в настоящее время, ни в обозримом будущем не все проектные процедуры могут быть полностью **формализованы**. Там, где отсутству-

ют формальные методы принятия решения, которые автоматически выполняются в САПР, решения приходится принимать проектировщикам. Таким образом, роль проектировщиков в эксплуатации САПР не ограничивается подготовкой исходной информации и анализом полученных результатов. САПР должна обеспечивать активное участие проектировщиков непосредственно в процессе проектирования на промежуточных этапах.

Организационная составляющая САПР приобретает особо важное значение при массовой автоматизации проектно-исследовательских работ, так как создание и внедрение САПР неизбежно связаны с определенными изменениями в организационной системе проектной организации. Реорганизуются проектирующие подразделения, появляются новые подразделения, обеспечивающие разработку, эксплуатацию и развитие САПР, изменяются нормированные взаимоотношения между подразделениями. Если эти изменения не **осуществлять** своевременно, то эффект от САПР будет минимальный. Опыт показывает, что на тех предприятиях, где организационная структура сохраняется неизменной, САПР носит чисто демонстрационный характер, находясь рядом с традиционной технологией проектирования.

Взаимная увязка САПР и организационной структуры предприятия может осуществляться в двух направлениях. Первое — *адаптация САПР к существующей организационной структуре*, второе — *адаптация организационной структуры к САПР*. Первый подход облегчает переход проектировщиков от ручной формы проектирования к автоматизированной и может быть рекомендован для давно сложившихся организаций с хорошо апробированной структурой. Однако максимальное использование возможностей САПР для повышения эффективности проектирования при таком подходе не всегда удастся. Максимальный эффект от внедрения САПР достигается при втором подходе, который можно рекомендовать для организаций, не имеющих устоявшейся технологии проектирования. На практике в большинстве случаев идут на компромисс между указанными подходами, разумно используя их преимущества.

Объединение программных и технических средств в единый комплекс подчеркивает возрастающий уровень их органического слияния. В современных вычислительных комплексах технические средства часто называют жесткой частью, а программные средства — мягкой. Ценность вычислительных средств сейчас определяется не только техническими характеристиками быстродействия, памяти и другими, но и программным обеспечением, определяющим в значительной мере его функциональные возможности.

Информационный характер взаимодействия людей и комплекса программно-технических средств свидетельствует о наличии единой информационной основы, на базе которой функционирует система. Причем информационная основа формируется из двух частей: информации на традиционных носителях для проектировщиков и информации на машинных носителях для программно-технических средств.

Целевая направленность на выполнение в законченной форме процесса проектирования в целом или отдельных его этапов подтверждает то, что автоматизация отдельных проектных процедур или отдельных видов проектных работ не дает должного эффекта. Наибольший выигрыш достигается при автоматизации всех видов проектных работ (расчет, конструирование и т. п.) на всех этапах проектирования. Причем результат проектирования в САПР должен быть представлен в той форме проектной документации, которая необходима для дальнейшего продолжения процесса разработки изделия.

Анализ определения САПР с учетом накопленного опыта их создания и эксплуатации позволяет установить следующие общие требования (или принцип) к построению САПР.

Объектная ориентированность. САПР должна быть нацелена на проектирование определенного класса технических изделий в конкретных организациях. Чем шире класс проектируемых изделий, тем сложнее и дороже САПР. Поэтому необходим разумный компромисс в определении объектов и задач проектирования в САПР с учетом специфичных особенностей проектирующей организации.

Эргатичность. САПР должна обеспечить человеку главную роль в реализации процесса проектирования, особенно при постановке задач проектирования, анализе результатов и принятии решений. Человеку следует предоставить возможность выполнения неформализуемых проектных процедур, а также таких процедур, автоматизация которых связана с большой затратой сил и средств. Рациональное распределение функций между человеком и ЭВМ значительно влияет на повышение эффективности САПР. При распределении надо стремиться к тому, чтобы освободить человека от трудоемких вычислительных и чертежных работ и максимально усилить творческое начало в его работе.

Коллективность. САПР следует строить как систему коллективного пользования, в которой могут совместно работать проектировщики различного профиля (расчетчики, конструкторы, технологи). Очередность или одновременность их работы определяется структурой организации и технологией автоматизированного проектирования. Кроме того, в САПР можно вести параллельно несколько проектных разработок.

Системность. САПР, как и всякая сложная система, должна строиться в виде совокупности функциональных модулей (подсистем). Последовательное, поэтапное создание и подключение подсистем позволяет постепенно наращивать САПР, ускоряя получение эффекта от автоматизации проектирования при максимальном использовании ограниченных ресурсов.

Эволюционность. САПР должна иметь возможность непрерывного развития и совершенствования путем расширения за счет подключения новых модулей и модификации имеющихся. Это обусловлено длительными сроками разработки САПР (5–10 лет) и ее высокой стоимостью (до нескольких миллионов рублей). Эффективность подобных систем достигает максимума при практически неограниченных сроках службы, что возможно только для открытых, развивающихся систем. Кроме того, эволюционность построения САПР обеспечивает преемственность с традиционной технологией проектирования.

Информативность. САПР должна обеспечить восприятие, хранение и обработку различных видов информации, необходимой для осуществления процесса проектирования. Причем преобразуемая в САПР информация представляется различными языковыми средствами кодирования и программирования. Согласование языковых средств в САПР обязательно для обеспечения информационного единства и нормального функционирования системы. Информационная согласованность элементов САПР позволяет как проектировщикам, так и обслуживающему персоналу пользоваться проблемно-ориентированными языками, сохраняющими привычные для них понятия и термины.

Комплексность. САПР должна обеспечить комплексную конвейерную автоматизацию всех этапов проектирования. Только в этом случае достигается максимальный эффект автоматизации, так как устраняются все противоречия между ручными и автоматизированными формами проектирования. При комплексной автоматизации удастся гибко сочетать автоматические и ручные проектные процедуры, установленные путем распределения функций между человеком и ЭВМ.

Агрегативность. САПР должна иметь возможность установления связей с другими автоматизированными системами или включения в качестве составной части в более сложную автоматизированную систему. Например, весьма эффективными являются взаимосвязи САПР с автоматизированными системами производства и экспериментальных исследований. Или же САПР может работать под управлением АСУ проектной организации.

Унифицируемость. САПР должна иметь максимальное число унифицированных и стандартизованных составных частей. Это сокращает сроки разработки вновь создаваемых САПР, уменьшает их стоимость, упрощает взаимосвязь с другими автоматизированными системами и облегчает тиражирование САПР или его элементов. Унификация и стандартизация в значительной мере решают проблему массового внедрения САПР в средние и малые проектные организации, которых большинство и которым не под силу большие капиталовложения и привлечение квалифицированных специалистов.

§ 1.3. Функциональная структура САПР

САПР — это *сложная система*, которая может рассматриваться на различных уровнях декомпозиции и детализации. Наиболее укрупненными элементами САПР являются *подсистемы*, которые выделяются по функциональному признаку. Каждая подсистема решает в законченной форме достаточно самостоятельную группу задач автоматизированного проектирования. Представление САПР в виде взаимосвязанных функциональных подсистем соответствует верхнему (наиболее общему) уровню декомпозиции, с которого начинается изучение сложных систем. Типовая структурная схема функционирования САПР на этом уровне приведена на рис. 1.1.

Взаимодействие пользователя (П) с программно-техническими средствами САПР осуществляется с помощью устройств ввода и вывода информации. Для ввода используются печатающие устройства, сканеры, алфавитно-цифровые и графические дисплеи. Некоторые из них позволяют осуществлять прямой ввод информации и поэтому более предпочтительны. Вывод информации в зависимости от требуемой формы (*алфавитно-цифровой*, текстовой или графической) производится посредством печатающих устройств, графопостроителей и дисплеев. Для хранения или последующего использования в других автоматизированных системах, например в станках с числовым программным управлением, ввод информации возможен также на перфоленту или магнитную ленту.

Для описания информации, вводимой в САПР, применяются языки двух видов: языки программирования и входные языки.

Языки программирования различаются как машинные, машинно-ориентированные и проблемно-ориентированные (машинно-независимые). Машинные языки оперируют машинными командами и наименее удобны для описания алгоритмов проектирования. Однако они обеспечивают минимальные затраты машинного времени и



объема памяти при реализации процессов **проектирования** в САПР. К проблемно-ориентированным языкам относятся универсальные алгоритмические языки типа **ФОРТРАН**, **ПЛ/1** и др., предназначенные для описания научно-технических задач. Алгоритмические языки легче усваиваются и позволяют строить программы, легко адаптируемые к различным типам ЭВМ. Однако затраты машинного времени и объема памяти при использовании алгоритмических языков возрастают в несколько раз по сравнению с машинными языками. Промежуточное положение между машинными и проблемно-ориентированными языками занимают машинно-ориентированные языки типа **АССЕМБЛЕР**. Они учитывают структуру ЭВМ и общие особенности машинных команд и в то же время обладают значительной универсальностью.

Входные языки находятся на более высоком уровне, чем языки программирования, предоставляя ряд важных преимуществ при описании объектов и заданий на проектирование, а именно: использование терминов и понятий, привычных для проектировщиков; максимальная быстрота усвоения; лаконичность и однозначность толкования. С точки зрения универсальности входные языки можно рассматривать как результат дальнейшего развития алгоритмических языков для описания информации, содержащейся в общепринятых формах проектной документации (тексты, чертежи, схемы и т. п.).

Благодаря этому входные языки не требуют специальных познаний и более удобны для проектировщиков. Однако надо учесть, что эта универсальность достигается за счет сужения круга рассматриваемых объектов проектирования.

Для описания информации, выводимой из САПР, не требуются специальные языки. Формы представления выходной информации определяются устройствами вывода и соответствуют формам проектной документации. По содержанию выходная информация определяется не только проектными данными, но и промежуточными сообщениями, необходимыми для управления процессом проектирования со стороны проектировщика. Благодаря промежуточным сообщениям в САПР организуется двусторонний обмен информацией (диалог) между проектировщиком и ЭВМ, который необходим для оперативной реализации процесса проектирования. В диалоговых режимах работы САПР необходимо обеспечить языковое соответствие между входной и выходной информацией. Это соответствие достигается за счет соответствующего расширения и адаптации входного языка, который в данном случае называется *диалоговым языком*.

В целом САПР является многоязыковой системой, в которой каждый пользователь выбирает для себя наиболее удобный среди **имеющихся** язык. Проектировщики отдают предпочтение диалоговым входным языкам, разработчики программ — языкам программирования. Многоязычность САПР — одно из необходимых условий совместной коллективной работы **пользователей**. Тем не менее языки САПР нельзя выбирать произвольно. Требование унификации языков САПР, особенно входных, по классам объектов проектирования приобретает все большее значение.

Информация, описанная на языках общения пользователя и ЭВМ, недоступна для прямого машинного восприятия. Поэтому входная информация требует последующих преобразований для получения рабочей программы на языке команд ЭВМ, которая передается в процессор для выполнения заданных логических и вычислительных процессов проектирования.

Функции преобразования входной информации осуществляются программным путем и выделены в отдельную подсистему (см. рис. 1.1). Для преобразования информации на алгоритмических языках используются программы-трансляторы, входящие в стандартное программное обеспечение ЭВМ. Для преобразования информации на входных языках разрабатываются специальные программы, называемые **языковыми процессорами**.

Генерация рабочей программы в языковом процессоре выполняется двумя способами: компиляцией и интерпретацией. *Програм-*

ма-компилятор четко разграничивает трансляцию входной информации в рабочую программу от ее реализации в процессоре. Исполнение рабочей программы может начаться только тогда, когда трансляция полностью завершена. *Программа-интерпретатор* наоборот, совмещает генерацию и исполнение рабочей программы путем выполнения процесса преобразований по частям. После генерации части рабочей программы сразу осуществляется ее реализация, затем снова генерация и исполнение и т. д.

Компиляция требует большого объема оперативной памяти ЭВМ для размещения полной рабочей программы, но зато позволяет экономить затраты машинного времени при многократном исполнении рабочей программы. Интерпретация, наоборот, экономно расходует память, но это достигается за счет увеличения затрат машинного времени. Во многих случаях при генерации рабочих программ сочетают оба способа, чтобы максимально использовать преимущества каждого из них.

Таким образом, разработка каждого входного языка требует, в свою очередь, создания соответствующего языкового процессора. Разработка языкового процессора представляет более трудную и сложную задачу, чем разработка входного языка. Это еще раз подтверждает необходимость унификации как входных языков, так и языковых процессоров.

Центральное место в функционировании САПР занимает *управляющая подсистема* (см. рис. 1.1). Функции управления в САПР достаточно разнообразны: взаимодействие всех подсистем (все подсистемы работают по указаниям управляющей подсистемы); ввод и вывод информации; заданный процесс проектирования; диалоговый режим проектирования; работа программных и технических средств и т. п.

Указанные функции выполняются на двух уровнях: на уровне пользователя и на уровне программно-технических средств. Управление со стороны пользователя осуществляется с помощью директив входного языка, а управление программно-техническими средствами — с помощью стандартных операционных систем (ОС) ЭВМ или специально разработанных систем управления, часто называемых *мониторами*, или *диспетчерами*.

ОС ЭВМ реализуют обычно трехуровневую структуру управления: 1) задачами проектирования; 2) заданиями для отдельных задач; 3) данными для отдельных заданий. Примерно такую же структуру управления реализуют и специальные мониторы. Однако в отличие от стандартных ОС, рассчитанных на применение универсальных алгоритмических языков, специальные мониторы ориентированы

на использование специализированных входных языков в диалоговом режиме.

Простейшие формы диалога в виде заранее запланированных запросов со стороны ЭВМ и ответов пользователя типа ДА и НЕТ или числовых данных могут быть организованы и с помощью ОС. Однако более сложные директивно-обучающие формы диалога организуются только с помощью специальных мониторов, позволяющих прервать процесс проектирования как со стороны ЭВМ, так и со стороны пользователя. Обмен информацией между ЭВМ и пользователем осуществляется директивными фразами. Если пользователь затрудняется в выборе директив, то ему может быть оказана помощь со стороны ЭВМ в виде подсказок. В целом разработку специальных мониторов следует тесно увязывать с разработкой входных языков и языковых процессоров.

Процесс проектирования в САПР, т. е. непосредственное решение проектных задач, выполняется с помощью *проектирующих подсистем 1, 2* (см. рис. 1.1). Каждая проектирующая подсистема имеет почти те же функции, что и САПР в целом, но применительно к более узкому кругу задач. Проектирующая подсистема выполняет самостоятельный этап проектирования в законченной форме, т. е. с выдачей соответствующей документации. Функции проектирующих подсистем реализуются в САПР программным путем.

Управление работой проектирующей подсистемы разделяется между центральной подсистемой управления и собственным управлением. Центральное управление организует взаимодействие проектирующей подсистемы с другими подсистемами; собственное управление организует автономную работу подсистемы. Из всех подсистем САПР проектирующие подсистемы являются наименее универсальными. Поэтому они обычно называются *объектно-зависимыми подсистемами* в отличие от остальных подсистем, называемых *объектно-независимыми* (инвариантными).

Каждая проектирующая подсистема оперирует определенными входными и выходными информационными массивами. При взаимодействии подсистем в процессе проектирования входная информация одной подсистемы частично используется в качестве входной информации для других подсистем. Для передачи информации от одной подсистемы непосредственно к другой необходимо, чтобы все информационные массивы имели одинаковую структуру. Однако это условие не всегда выполнимо. Как правило, структуры информационных массивов различных проектирующих подсистем существенно отличаются друг от друга. Поэтому проблема информа-

ЦИОННОЙ согласованности проектирующих подсистем в САПР решается иным путем — путем создания единой информационной основы в виде самостоятельной *информационно-поисковой подсистемы* (см. рис. 1.1), называемой также банком данных, или автоматизированной базой данных (АБД).

В АБД выделяются две части: непосредственно база данных (БД) и система управления базой данных (СУБД). Информационные массивы БД разделяются на статические и динамические. *Статическая информация* образуется в основном данными справочного характера (стандарты, нормали, каталоги и т. п.) и мало изменяется от проекта к проекту. *Динамическая информация* образуется данными, полученными в результате процесса проектирования, и существенно изменяется от проекта к проекту. Содержание статических и динамических массивов устанавливается таким образом, чтобы полностью включить всю необходимую информацию для работ всех проектирующих подсистем, причем взаимодействие последних теперь уже осуществляется через БД. Вся информация, поступающая через устройства ввода или полученная на входе проектирующих подсистем, передается сначала в БД. Затем из БД отбирается входная информация для проектирующих подсистем в соответствии с информационной структурой данной подсистемы.

СУБД выполняет следующие функции: поиск данных для других подсистем САПР; запись новых данных; стирание устаревших записей; перезапись данных с одних машинных носителей на другие. Как видно, функции СУБД универсальны, несмотря на жесткую привязанность БД к объектам проектирования. Благодаря этому для обращения к БД удастся использовать специальные унифицированные языки описания данных. Эти языки основаны на логическом представлении структуры информационных массивов в виде графов (сетевые структуры) или взаимосвязанных таблиц (реляционные структуры). В целом функции СУБД реализуются программным путем, а информационные массивы БД размещаются во внешних запоминающих устройствах.

Наличие АБД существенно облегчает также формирование и ввод входной информации САПР. Формирование входной информации выделено на рис. 1.1 в отдельную подсистему, на которую обычно возлагаются функции подготовки проектной документации, программных распечаток или перфолент для автоматизированных систем производства. Формы представления входной информации заранее определяются пользователем в зависимости от решаемой задачи и возможностей, предоставляемых устройствами ввода.

Содержание выходной информации наполняется из БД, что позволяет разделить процессы проектирования и процессы вывода информации. В противном случае большая разница в быстродействии ЭВМ и устройств вывода приводит к неоправданно большим потерям машинного времени.

§ 1.4. Типовые компоненты САПР

Каждая подсистема САПР может быть структурирована путем разбиения на взаимосвязанные компоненты. Взаимодействие подсистем в САПР осуществляется с помощью связей между их компонентами. Таким образом, как отдельные подсистемы, так и САПР в целом можно рассматривать как системы взаимосвязанных компонентов, число которых достаточно велико. Компоненты группируют по следующим видам обеспечения функционирования САПР и их подсистем: методического, лингвистического, математического, программного, технического, информационного и организационного.

Компоненты методического обеспечения — технические документы, в которых дано общее описание САПР; состав элементов, их основные характеристики и функциональное назначение; правила отбора и эксплуатации средств автоматизации проектирования и т. п. Методическое обеспечение в целом нормирует деятельность пользователей в САПР при их взаимодействии с различными компонентами подсистем.

Компоненты лингвистического обеспечения — языки (входные и программирования), а также термины и определения, используемые в САПР. Лингвистическое обеспечение оказывает существенное влияние на разработку и функционирование САПР, прямо воздействуя на пользователей, языковые процессоры, трансляторы и системы управления.

Поэтому унификация языков проектирования и минимизация числа входных языков являются одним из главных требований к лингвистическому обеспечению. Это условие входит в противоречие с принципом непрерывного развития САПР, при котором может возникнуть необходимость в применении новых входных языков. Чтобы устранить это противоречие, применяют двухэтапное преобразование информации — сначала с входных языков на унифицированный внутренний язык, а затем с внутреннего языка на машинный язык. Тогда при включении в САПР нового входного языка потребуются дополнительно разработать лишь один сравнительно простой транслятор на внутренний язык.

Компоненты математического обеспечения — математические модели объектов проектирования, а также методы и алгоритмы проектирования. Эти компоненты значительно влияют не только на программно-технические средства их реализации, но и на качество и эффективность проектирования в САПР. При этом выбор моделей, методов и алгоритмов вызывает большие затруднения из-за противоречивости предъявляемых к ним требований.

С одной стороны, требуется, чтобы математические компоненты были точными (в сравнении проектных и экспериментальных данных), по возможности универсальными (охватывали все объекты проектирования, для которых предназначена САПР) и алгоритмически надежными (давали правильные результаты во всем диапазоне изменения условий их применимости в САПР).

С другой стороны, необходимо, чтобы математические компоненты обеспечивали минимальные затраты машинного времени и объема памяти при их реализации в САПР. Однако повышение точности и универсальности неизбежно связано с усложнением моделей и методов, что, в свою очередь, ведет к увеличению затрат времени и памяти.

В тех случаях, когда не удастся устранить подобные противоречия путем разумного компромисса, создают библиотеки моделей, методов и алгоритмов. В библиотеках отдельные компоненты представляются несколькими разновидностями. Например, вместо одной модели объекта проектирования создается набор (семейство) моделей различной степени сложности, универсальности и детализации. В зависимости от конкретно решаемой задачи проектирования из библиотеки отбирается наиболее соответствующий вариант того или иного компонента. Библиотечные наборы должны быть построены таким образом, чтобы охватить все этапы и задачи проектирования, в которых используется данный компонент.

Компоненты программного обеспечения — программы, представленные документально или на машинных носителях, а также эксплуатационные документы, например инструкции для программистов. Программное обеспечение оказывает на САПР определяющее влияние, так как оно связывает в единое целое большинство других видов обеспечения (технического, лингвистического, математического и информационного). Разработка программного обеспечения требует основной доли материальных и временных затрат при создании САПР. Поэтому особенно важно руководствоваться общими требованиями и принципами построения программного обеспечения:

- затраты машинного времени и объема памяти при программной реализации по возможности следует минимизировать, особенно для многократно повторяющихся программ;
- программы должны быть работоспособными при всех допустимых сочетаниях с другими программами;
- программы должны строиться по модульному принципу, расширяющему возможности модернизации и развития, а также построения библиотечных наборов (для отдельных модулей, а не программ в целом).

Программное обеспечение делится на две части: общее и специальное. К *программам общего назначения* относятся программы, составляющие операционную систему современных ЭВМ. Программы ОС, в свою очередь, делятся на управляющие и обрабатывающие (сервисные). Управляющие программы группируются по функциям управления: 1) задачами; 2) заданиями; 3) данными.

Программы управления задачами (главная из них — супервизор) осуществляют функции центрального монитора (образование последовательности задач проектирования, организация режима работы ЭВМ, распределения памяти и других вычислительных ресурсов).

Программы управления заданиями (планировщики) организуют вычислительный процесс для решения задачи в соответствии с заданными директивами. Программы управления данными организуют обмен данными между устройствами **ВВОДА—ВЫВОДА** и подсистемами САПР. Сервисные программы (трансляторы, редакторы связей и загрузчики) предназначены для перевода с алгоритмических и входных языков, объединения программных модулей в рабочую программу и загрузки рабочей программы в оперативную память ЭВМ.

Специальные программы предназначены для непосредственного выполнения процесса проектирования и объединяются в программные комплексы (ПК) и пакеты прикладных программ (ППП). В отличие от ОС, которая входит в стандартный комплект ЭВМ, программы ПК и ППП разрабатываются или подбираются в процессе создания САПР. ПК и ППП работают под управлением ОС или специального диспетчера. Однако многие из них имеют и свою собственную управляющую программу. Тогда управление осуществляется на двух уровнях. Центральное управление организует взаимодействие данного ПК или ППП с другими программными средствами, а собственное управление организует взаимодействие программ внутри ПК (ППП). К наиболее сложным ПК (ППП) можно отнести языковые процессоры и специальные мониторы САПР.

Компоненты технического обеспечения — средства вычислительной техники, организационной техники, техники измерений и передачи данных, а также их сочетания. Эти компоненты объединяются в вычислительные комплексы (ВК) и вычислительные системы (ВС), которые составляют техническую базу САПР. Типичными примерами ВК являются ЭВМ в соединении с внешними (периферийными) устройствами ввода, вывода и хранения информации, а также автоматизированные рабочие места (АРМ), **имеющие** в своем составе мини-ЭВМ и набор периферийных устройств, варьируемый в зависимости от назначения.

В настоящее время для создания рабочих мест проектировщиков (АРМ) широко применяются универсальные персональные компьютеры, выпускаемые на базе микропроцессоров и дисплеев, обеспечивающих цветное отображение алфавитно-цифровой и графической информации. К ним прилагаются стандартные наборы периферийных устройств: принтер (цветной или черно-белый) для распечатывания выходной информации, сканер для прямого ввода разнообразной информации в виде текстов, таблиц, графиков и фотографий, а также модем для подсоединения к сети Интернет через телефонную сеть. Ввод и вывод информации производится также с помощью машинных носителей типа дисков и дискет. Современные универсальные персональные компьютеры очень легко встраиваются в вычислительные сети. Они могут также просто соединяться с различной аудио-, теле- и фотоаппаратурой и обеспечивают проектировщикам комфортный доступ к необходимой информации и общение с коллегами и руководителями.

ВС строят путем объединения ряда ВК по многоуровневой структуре. На верхнем уровне, как правило, располагают центральный ВК (ЦВК), включающий одну или несколько сопряженных ЭВМ высокой производительности. Выбор ВК для нижних уровней зависит от числа уровней ВС. Например, в двухуровневой ВС на нижнем уровне можно разместить АРМы. Количество АРМов, а соответственно и пользователей в такой ВС ограничено. Для увеличения числа пользователей увеличивают количество уровней ВС. На средних уровнях располагаются мини- и микроЭВМ, которые берут на себя функции управления ВК нижних уровней. На нижних уровнях располагаются АРМ, причем наличие миниЭВМ в их составе уже необязательно, а включение персональных компьютеров существенно расширяет круг пользователей.

В многоуровневых ВС большое влияние на технические характеристики системы оказывают средства коммутации (кабельные, теле-

фонные и др.), имеющие ограниченные пропускную способность и возможности технической реализации. Многоуровневая ВС с нарастающим числом ВК на нижних уровнях и коммуникационными линиями по существу превращается в вычислительную сеть, которая допускает коллективную работу нескольких десятков и сотен пользователей.

В вычислительных сетях САПР происходит перераспределение функций между ВК верхних и нижних уровней. ВК верхних уровней берут на себя функции центрального управления и АБД. Основная масса проектных задач решается на нижних уровнях. И только в том случае, когда мощности ВК нижнего уровня не хватает для решения проектной задачи, решение поручается ВК верхнего уровня.

Компоненты информационного обеспечения — документы, содержащие информацию о проектных решениях, проектных процедурах, методике проектирования, комплектующих материалах и изделиях, а также информационные массивы на машинных носителях с записью указанных документов. Раскрытие информационного содержания процесса проектирования и выявление информационных компонентов представляют очень сложную и трудоемкую задачу. При ее решении требуется определить с необходимой полнотой всю проектную информацию.

Для облегчения этой задачи информацию анализируют по частям. Например, исходную информацию можно разбить на следующие виды:

- 1) справочная информация (стандарты, каталоги, справочники, книги, отчеты и т. п.);
- 2) данные прототипов объектов проектирования (проектная документация);
- 3) методики проектирования;
- 4) технические условия и требования к объекту проектирования.

Первые три вида исходной информации являются неизменными в течение времени, которое значительно превышает время проектирования в САПР. Поэтому эти виды информации целесообразно хранить в АБД САПР, чтобы каждый раз не вводить ее в ЭВМ перед началом проектирования. Информация четвертого вида изменяется от объекта к объекту и ее целесообразно включить в входную информацию, вводимую в САПР перед началом проектирования.

Источниками информации первых трех видов являются подразделения проектной организации типа технической библиотеки, отдела научно-технической информации, патентно-изобретательского отдела, архива проектной документации и т. п. Эти подразделе-

ния не только обеспечивают поступление информации извне, но и играют определенную роль в формировании точки зрения проектировщиков на современный уровень и перспективы развития объектов проектирования. Информация четвертого вида (директивная информация) поступает в виде приказов, распоряжений, технических заданий и других директивных материалов со стороны руководителей проекта или вышестоящих органов.

Выходная информация САПР в форме проектной документации должна обеспечить последующий жизненный цикл разработки, т. е. ее производство, испытания и эксплуатацию. Кроме того, выходная информация должна включать оценки технико-экономических показателей проекта, на основании которых принимаются решения относительно дальнейшей судьбы проекта (более углубленная проработка, макетирование, передача в производство, включение спроектированного изделия в более сложную систему и т. п.).

Таким образом, как источники, так и потребители проектной информации функционируют на двух уровнях:

- уровень 1 (стратегический) — предназначен для принятия принципиальных решений;
- уровень 2 (тактический) — предназначен для принятия оперативных решений в процессе разработки.

В соответствии с двумя уровнями поступления и потребления информации в САПР целесообразно создавать два относительно автономных информационных фонда (ИФ):

- 1) ИФ руководителей проекта;
- 2) ИФ разработчиков проекта.

Определенное дублирование информации при наличии указанных ИФ неизбежно, так как некоторые данные могут понадобиться как руководителям, так и разработчикам проекта. Однако эта избыточность оправдана существенным ускорением доступа к требуемой информации, что особенно важно для руководителей.

Документальные (внемашинные) компоненты ИФ САПР распределены в различных подразделениях проектной организации, а их использование регламентируется правилами, установленными в соответствии с организационной структурой учреждения. Машинные компоненты ИФ САПР сосредоточены в основном в АБД, а их использование регламентируется СУБД (системой управления базой **данных**).

Компоненты организационного обеспечения — положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений и проектной организации в целом, взаим-

ные отношения пользователей САПР и их взаимодействие со средствами автоматизации проектирования.

Организационное обеспечение в целом существенно зависит от специфики САПР и проектной организации. Однако во всех случаях наблюдаются некоторые общие для всех САПР свойства организационной структуры. Так, во всех структурах выделяются три группы специалистов: проектирующая, обслуживающая (сервисная) и организующая (**управляющая**). *Проектирующая группа* состоит из коллективов тех подразделений, которые непосредственно осуществляют процесс проектирования во взаимодействии со средствами автоматизации проектирования. *Сервисная группа* образуется коллективом подразделений, на которые возложены функции поддержания работоспособности и развития. *Управляющая группа* включает руководителей и специалистов, которым поручается планирование и контроль выполнения работ по созданию, функционированию и развитию САПР.

Организационное обеспечение САПР значительно отличается от традиционных организационных структур проектных учреждений за счет появления новой машинной технологии проектирования и новых подразделений (ВЦ, обслуживающие подразделения и т. п.). Поэтому внедрение новых организационных форм, присущих САПР, не всегда происходит благополучно. Иногда при создании САПР не уделяется должного внимания своевременной организационной перестройке и подготовке инженерных кадров. В этих случаях функционирование САПР носит демонстрационный характер, так как основной коллектив проектировщиков ни профессионально, ни психологически не готов к восприятию машинной технологии и по-прежнему пользуется ручной технологией проектирования. Чтобы исключить подобные случаи, подготовка проектировщиков и организация работы в САПР должны проводиться одновременно с поэтапным созданием и внедрением САПР.

§ 1.5. Создание и развитие САПР

Процесс создания САПР состоит из следующих стадий разработки САПР:

- 1) предпроектные исследования;
- 2) разработка технического задания;
- 3) разработка технического предложения;
- 4) разработка эскизного проекта;
- 5) разработка технического проекта;
- 6) разработка рабочего проекта;

7) изготовление, отладка и испытание;

8) ввод в действие.

Предпроектные исследования направлены на определение первоочередных задач автоматизации проектирования. Для этого анализируется перечень объектов, проектируемых в данной организации, и выделяются те объекты, для которых создание САПР целесообразно в первую очередь. Наряду с этим оценивается ряд других факторов, оказывающих определяющее влияние на разработку САПР: оснащенность организации вычислительной техникой с учетом планируемых поступлений; степень готовности коллектива к разработке и эксплуатации САПР; наличие необходимых специалистов; экономическая эффективность планируемой САПР; необходимые сроки создания и имеющиеся ресурсы и т. п. Результаты предпроектных исследований являются основанием для составления технического задания.

Техническое задание является исходным документом для разработки САПР. В соответствии с ним осуществляется также сдача системы в эксплуатацию. В техническом задании определяются цель и назначение САПР, области ее применения; характеристики объектов проектирования и автоматизированного процесса проектирования; требования к САПР и ее технико-экономические показатели; стадии и этапы разработки САПР, а также порядок испытаний и ввода в действие.

Техническое предложение содержит следующие работы: анализ процессов автоматизированного проектирования и выявление возможных структурных вариантов построения САПР; анализ структурных вариантов и выбор наиболее рационального из них; технико-экономическое обоснование выбранного варианта; уточнение и расширение технического задания в части требований к САПР и этапов ее разработки. После принятия (утверждения) технического предложения начинается проектирование САПР.

На стадии *эскизного проектирования* осуществляется анализ принятого за основу структурного варианта САПР и выявление возможных вариантов принципиальных решений по реализации этой структуры. Сравнительным путем принимаются принципиальные решения по созданию САПР и проводится оценка технико-экономических показателей САПР. При необходимости уточняются отдельные положения технического задания и технического предложения. Следует отметить, что стадии технического предложения и эскизного проектирования не являются обязательными и могут быть опущены. Тогда входящие в них работы должны быть выполнены на следующих стадиях проектирования САПР.

На стадии *технического проектирования* окончательно выбирают все технические решения, дающие полное представление о создаваемой САПР. Полностью **разрабатывается** технология автоматизированного проектирования. Детализируются структура САПР и ее подсистем, взаимные связи подсистем и связи САПР с другими автоматизированными системами. Разрабатываются все компоненты САПР и подсистем. Уточняются технико-экономические показатели и мероприятия по дальнейшей разработке системы и вводу в действие. Составляются технические задания на программные компоненты, план размещения технических средств и задания на необходимые подготовительные работы (строительные, монтажные и т. п.).

На стадии *рабочего проектирования* завершается разработка всех компонентов и подсистем САПР и составляется проектная документация, необходимая для изготовления, отладки, испытаний и ввода в действие САПР. Проектная документация состоит из двух частей: рабочий проект и комплект эксплуатационных документов. В рабочий проект включаются документация по всем видам обеспечения САПР, программа и методика испытаний комплекса средств автоматизации проектирования, программа и методика опытного функционирования САПР и ее отдельных подсистем. Комплект эксплуатационных документов включает документацию по методическому, техническому и программному обеспечению, а также ведомость эксплуатационных документов.

На стадии *изготовления, отладки и испытаний* САПР проводятся следующие работы. Изготавливаются, приобретаются и отлаживаются все компоненты технического, программного и информационного обеспечения САПР. Выполняются подготовительные работы по вводу в действие САПР, включая строительные-монтажные работы и специальное обучение пользователей САПР. Осуществляют монтаж, наладку и испытания комплекса средств автоматизации проектирования сначала для отдельных подсистем, а затем для САПР в целом.

Ввод в действие САПР осуществляется не сразу, а с помощью предварительного опытного функционирования. Целью опытного функционирования является проверка работоспособности САПР в целом и его отдельных звеньев; адаптация пользователей к новой технологии проектирования; налаживание взаимодействия между подразделениями предприятия с учетом изменений в организационной структуре. Опытное функционирование проводится на тестовых задачах и примерах, которые подбирают таким образом, чтобы охватить основные ситуации автоматизированного проектирования. По результатам опытного функционирования выявляют дефекты, вно-

сят необходимые корректировки и окончательно определяют технико-экономические показатели САПР.

Для принятия решения о возможности передачи САПР в промышленную эксплуатацию назначается приемочная комиссия, в которую включаются также разработчики и пользователи. Приемочная комиссия проводит приемочные испытания и проверяет наличие документации и готовность организации к эксплуатации САПР. В случае удовлетворительных результатов принимается окончательное решение о сдаче САПР в эксплуатацию.

В начальный период промышленного функционирования эффективность САПР, как правило, ниже проектируемой. Это объясняется рядом причин — продолжают выявляться новые дефекты, не обнаруженные ранее на стадии опытного функционирования. База данных находится в состоянии наполнения и иногда дает меньше информации, чем память проектировщика. При этом многие проектировщики еще не успевают полностью преодолеть психологический барьер. Однако указанные причины сравнительно быстро устраняются и начинается период стабильного функционирования САПР с высокой эффективностью, который длится недолго. При эксплуатации выясняется, что действующая САПР нуждается в дальнейшем развитии.

Необходимость развития САПР обуславливается различными **обстоятельствами**: обновлением и сменой объектов проектирования, появлением новых средств автоматизированного проектирования, стремлением к дальнейшему повышению эффективности САПР и т. п. Это требует ввода в действие новых или модернизации действующих компонентов и подсистем САПР, что сопровождается частичным или полным переизданием технической документации. Ввод новых компонентов и подсистем также осуществляется через опытное функционирование и приемочные испытания и приводит к новой очереди САПР. Так начинается процесс развития, который по существу становится стабильной формой дальнейшего существования САПР.

В развитии САПР, несмотря на различия, вызванные объектной ориентированностью, наблюдается ряд общих тенденций. Одной из наиболее важных является *тенденция непрерывного повышения уровня стандартизации и унификации*. Она начинает охватывать все сферы деятельности, связанные с созданием и развитием САПР. Разрабатываются и внедряются стандарты не только на отдельные компоненты и подсистемы САПР, но и на организацию всей проектной деятельности в САПР.

Унификация требований к средствам автоматизации проектирования, разработка достаточно универсальных подсистем инвариант-

ного характера (диалоговые мониторы, АБД и т. п.) существенно облегчают тиражирование и массовое внедрение САПР практически во все проектные организации. Этому способствует создание общесоюзных и отраслевых фондов алгоритмов и программ, разработка стандартных организационных структур САПР для предприятий и отраслей, создание информационных систем отраслевого и общесоюзного назначения, вычислительных сетей и другие централизованные мероприятия. Таким образом, создаются основы типового проектирования, изготовления и эксплуатации САПР.

Другая важная тенденция в развитии САПР обусловлена непрерывным *расширением сферы автоматизации* в жизненном цикле технических изделий. Этапами жизненного цикла новой техники являются планирование и прогнозирование, научное исследование, проектирование, изготовление опытных образцов, экспериментальное исследование и доработка, серийное производство и эксплуатация.

В настоящее время все этапы жизненного цикла доступны автоматизации. Автоматизированные системы планирования являются частью автоматизированных систем управления (АСУ) на различных уровнях: предприятие, отрасль и т. п. Разрабатываются и внедряются автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) и автоматизированные экспериментальные комплексы (АЭК). Автоматизация технологических процессов производства осуществляется с помощью специальных систем типа АСУ ТП. Все эти автоматизированные системы, включая САПР, работают под управлением или тесно связаны с другими автоматизированными системами типа АСУ, информационных систем и т. п. Тесное органическое взаимодействие указанных систем обеспечивает комплексную автоматизацию всего жизненного цикла новых изделий.

Совместное использование автоматизированных систем для комплексного решения вопросов планирования, проектирования, экспериментального исследования, организации и управления производственными процессами приводит к необходимости создания так называемых интегрированных производственных комплексов (ИПК) или гибких производственных систем (ГПС).

Цель интеграции заключается в сокращении производственных расходов. Сочетание в ИПК и ГПС систем типа САПР и АСУ с программно-техническими средствами автоматизации производства типа станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуляторов обеспечивает максимальный технико-экономический эффект от внедрения ЭВМ в сферу промышленности.

Достаточно отметить, что, по оценкам некоторых машиностроительных интегрированных производств, созданных за рубежом, вре-

мя разработки и выпуска новых изделий сокращается вдвое, коэффициент использования оборудования достигает 75%, потребность в **производственных** площадях и оборудовании сокращается вдвое и более, потребность в производственном персонале сокращается в **2—3** раза. Поэтому число вновь создаваемых ИПК и ГПС удваивается примерно каждые **2—3** года.

Центральное место в функционировании ИПК и ГПС занимает САПР. Благодаря САПР обеспечивается необходимая гибкость (быстрый переход от проектирования и изготовления одних изделий к проектированию и изготовлению других), что особенно важно при большой номенклатуре выпускаемых изделий. Если учесть, что подавляющее большинство производств является мелкосерийным или среднесерийным, то легко представить, что массовое внедрение ИПК и ГПС невозможно без создания высокоэффективных САПР.

Такой подход к решению проблемы автоматизации предъявляет новые требования к проектно-конструкторской документации. Возможность хранения результатов промежуточных этапов проектирования в АБД позволяет ограничить выходную документацию только такими документами, которые необходимы в организационном плане. Более того, переход к автоматизированному производству позволяет также существенно сократить объем конечной проектной документации и требует значительного изменения ее форм. Многие выходные документы должны быть представлены на машинных носителях программ организации и управления технологическими процессами производства. Все это приводит к необходимости радикального изменения стандартов на проектно-конструкторскую документацию и создания новых стандартов, учитывающих специфику САПР и других автоматизированных систем, связанных с ней.

§ 1.6. Этапы и подсистемы проектирования в САПР

Как известно, процесс проектирования представляет собой процесс многоэтапного преобразования и накопления информации, в котором выходная информация предыдущих этапов частично или полностью используется в качестве входной информации для последующих этапов. Коллективными исполнителями стандартных этапов проектирования, выступающими в качестве юридических лиц, являются: заказчик, головной исполнитель (разработчик) и соисполнители (субподрядчики). В роли заказчика обычно выступает министерство, ведомство или организация, в роли разработчика и

соисполнителей — **проектно-конструкторские** организации. Рассмотрим более подробно стандартные этапы проектирования и соответствующую документацию.

Техническое задание определяет назначение объекта проектирования, его основные тактико-технические данные и предъявляемые технико-экономические требования и условия.

Типовое техническое задание на разработку изделий новой техники включает следующие основные разделы: наименование и область применения объекта проектирования; основание для проведения проектных работ; цель и назначение объекта проектирования, его основные характеристики и показатели; основные требования к объекту проектирования; технико-экономическое обоснование; этапы и порядок разработки, испытаний и ввода в действие.

Техническое задание составляется заказчиком, который обычно привлекает к этому также разработчика, а иногда и соисполнителей. Исходной информацией для составления технического задания являются: данные об аналогах и прототипах объекта проектирования; наилучшие показатели, достигнутые в мировой практике для соответствующего класса изделий; технологические возможности реализации; государственные и отраслевые стандарты; условия функционирования объекта проектирования, включая воздействие внешней среды, и т. п. Указанная информация слишком ограничена для достаточно полных и точных представлений об объекте проектирования. Поэтому содержание технического задания определяется приближенно и может уточняться и корректироваться при выполнении следующих этапов проектирования технических объектов.

Техническое предложение разрабатывается на основе технического задания **разработчиком** в тесном взаимодействии с заказчиком. К разработке технического предложения привлекаются также соисполнители. Типовое техническое предложение углубляет содержание отдельных разделов технического задания, а также включает новые разделы по описанию и анализу принципиально возможных вариантов объекта проектирования, обоснованному выбору рационального варианта (рациональных вариантов), оценке характеристик и технико-экономических показателей рациональных вариантов, уточнению работ на следующих этапах разработки и составлению заданий и требований к их выполнению.

В результате разработки технического предложения накапливается информация о целесообразных принципиальных проектных решениях, которые принимаются к дальнейшему рассмотрению. Техническое предложение рассматривается и утверждается заказчиком, и на этом основании остальные этапы проектирования выпол-

няются самостоятельно разработчиком без оперативного участия заказчика.

Эскизное проектирование является тем этапом, на котором начинается детализация объекта проектирования, хотя еще уделяется много внимания принципиальным основам проектных решений. При разработке эскизного проекта уточняются и корректируются отдельные положения технического задания и технического предложения и осуществляется окончательный выбор рационального варианта объекта проектирования, производится более точная оценка его характеристик и показателей, дается технико-экономическое обоснование окончательного варианта. На этапе эскизного проектирования наряду с расчетными работами могут создаваться и испытываться макеты объекта проектирования или его отдельных частей и узлов, если это необходимо для получения соответствующих уточнений. С этой же целью могут проводиться экспериментальные исследования аналогов или прототипов объекта проектирования.

Кроме накопления более полной и точной информации об объекте проектирования на этапе эскизного проектирования рассматриваются также важные вопросы эксплуатационного и организационного характера. К ним относятся вопросы, связанные с выбором основных функциональных режимов, методов и средств контроля и профилактики, определением правил обслуживания и ремонта, оценкой экономической эффективности и т. п. Уточняется также порядок дальнейшей разработки с указанием сроков и исполнителей. Составляются задания на разработку и монтаж опытных образцов, оформляются протоколы испытаний макетов, аналогов и прототипов.

На этапе *технического проектирования* продолжается дальнейшая детализация объекта проектирования вплоть до принятия решений по его конструктивному исполнению. С позиций конструирования уточняются и корректируются техническое задание и отдельные положения технического предложения и эскизного проекта. С помощью анализа возможных вариантов конструктивного исполнения осуществляется выбор окончательного варианта. Для принятого конструктивного варианта объекта проектирования выполняются наиболее точные расчетные и экспериментальные исследования характеристик и параметров как объекта в целом, так и его узлов и деталей. Расчетно-экспериментальным путем проверяется выполнение всех требований технического задания. По результатам проверки корректируются проектные решения и данные до тех пор, пока все требования будут удовлетворены.

При разработке технического проекта много внимания уделяется не только конструированию, но и вопросам технологии произ-

ВОДСТВА и эксплуатации. Окончательно устанавливаются режимы функционирования и порядок эксплуатации объекта проектирования. Анализируются технологические процессы изготовления основных узлов и деталей объекта проектирования, возможности компоновки конструкции, обработки поверхностей сопряжения и др. При необходимости составляются задания на разработку и реализацию отдельных технологических процессов. С учетом конструкторско-технологических и эксплуатационных решений производится уточнение оценки экономической эффективности объекта проектирования.

Этап *рабочего проектирования* является завершающим для окончательного принятия всех проектных решений. На этом этапе выбирают все технологические процессы по изготовлению всех деталей, узлов и компоновку объекта проектирования в целом, учитывающие возможности производственных мощностей, предназначенных для изготовления объекта проектирования. На основании окончательных решений по технологии производства вносят уточнения в конструктивное оформление объекта проектирования и определения его характеристик и параметров в различных режимах эксплуатации. Уточняют также технико-экономические показатели проекта.

Большое место в рабочем проектировании занимает оформление полной проектной документации, необходимой для производства, монтажа и эксплуатации объекта проектирования. В проектную документацию кроме технического задания входят: пояснительные записки по описанию объекта проектирования, его узлов и деталей, а также по обоснованию принятых решений; конструкторские чертежи; принципиальные и монтажные схемы; технологические карты; рисунки и таблицы данных; спецификации по всем компонентам объекта проектирования; перечень стандартов, нормалей и других нормативных документов, распространяющихся на объект проектирования; комплект эксплуатационных документов и др. Рабочий проект представляется на утверждение заказчику, после чего он является основанием для продолжения жизненного цикла объекта проектирования (производства и эксплуатации).

Анализ этапов проектирования показывает, что между ними нет четких разграничений. Работы, начатые на предыдущих этапах, продолжаются и развиваются на последующих этапах. Например, анализ и выбор принципиальных проектных решений начинается на этапах технического задания или технического предложения и заканчивается на этапе эскизного проектирования. Конструкторско-технологическая детализация начинается на этапе эскизного проек-

тирования и завершается на этапе рабочего проектирования. Поэтому рассмотренная последовательность стандартных этапов не всегда строго соблюдается. Некоторые этапы могут быть исключены или, наоборот, добавлены. Например, иногда принципиальные проектные решения ясны уже при составлении технического задания. Тогда исключается этап технического предложения, а нередко и этап эскизного проектирования, а обязательные работы этих этапов выполняются на последующих этапах технического и рабочего проектирования. Наоборот, если возможен ряд принципиально различных проектных решений, то нередко составлению технического задания предшествует этап предпроектных исследований, на котором отбираются варианты для дальнейшего рассмотрения в процессе проектирования.

Рассмотренный стандартный многоэтапный процесс не зависит от конкретного содержания объектов проектирования; он ориентирован на ручные формы проектирования и удобен для планирования, организации и контроля проектных работ. Документация, получаемая при завершении каждого этапа, является отчетной и используется для анализа результатов промежуточных этапов и принятия решений о дальнейшей разработке. Кроме того, многократное рассмотрение результатов в процессе проектирования в определенной мере способствует уменьшению ошибок, неизбежно возникающих при ручном проектировании.

Независимость стандартных этапов проектирования относительно объектов проектирования не позволяет четко разграничить задачи, решаемые на отдельных этапах. В то же время для создания объектных (проектирующих) подсистем САПР требуется выделить и сгруппировать все задачи проектирования с учетом взаимных связей между ними. Поэтому для автоматизированных форм проектирования более предпочтительной является такая последовательность этапов, которая отражает характер решаемых задач на каждом достаточно автономном этапе. В этом смысле процессы проектирования многих технических изделий можно разбить на три укрупненных автономных этапа (уровня) проектирования:

- 1) структурно-параметрическое проектирование;
- 2) функционально-параметрическое проектирование;
- 3) **конструкторско-технологическое** проектирование.

На уровне *структурно-параметрического проектирования* решаются задачи, связанные с выбором принципиальных технических решений, которые определяют общую структуру объекта проектирования и основные параметры, отражающие связи с другими тех-

НИЧЕСКИМИ устройствами и системами, а также условия функционирования в окружающей среде. Для сопоставления со стандартным процессом проектирования можно отметить, что задачи структурно-параметрического проектирования охватывают этапы технического задания, технического предложения и частично эскизного проектирования. Учитывая специфику задач структурно-параметрического проектирования, этот уровень часто называют также *внешним проектированием*. В результате решения задач этого уровня выбирают наиболее рациональный вариант (или ряд вариантов) для более детального рассмотрения на следующих уровнях проектирования.

На уровне *функционально-параметрического проектирования* решают задачи, связанные с выбором функциональных схем объекта проектирования и анализом процессов их функционирования. Функциональные схемы составляют путем изучения возможностей практической реализации выбранных ранее структурно-параметрических вариантов исполнения объекта проектирования. Для каждой схемы исследуются функциональные показатели, характеристики и процессы в различных режимах эксплуатации. Проверяется соответствие процессов функционирования требованиям и условиям технического задания и при необходимости вносятся коррективы в принятые ранее решения. В рассмотрение включают новые параметры, необходимые для оценки функциональных свойств объекта проектирования и характеризующие его внутреннее строение. Поэтому функционально-параметрическое проектирование называют также *внутренним проектированием технических объектов*.

Задачи функционально-параметрического проектирования охватывают стандартные этапы эскизного и технического (частично) проектирования. В результате их решения отсеиваются неудовлетворительные структурно-параметрические варианты и количество последних сокращается (в большинстве случаев до одного). Для дальнейшего более детального рассмотрения на следующем уровне проектирования оставляют наиболее рациональные функционально-параметрические варианты.

Таким образом, характер рассматриваемых далее вариантов проекта изменяется. Вместо структурно-параметрических вариантов общего плана рассматривают конкретизированные функционально-параметрические варианты, однозначно определяющие процессы функционирования в объекте проектирования.

На уровне *конструкторско-технологического проектирования* решают задачи, связанные с выбором детальных конструктивных схем

и элементов объекта проектирования, технологических процессов их изготовления и компоновки, а также правил эксплуатации. Задачи **конструкторско-технологического** проектирования охватывают стандартные этапы технического и рабочего проектирования. Детализация конструкции и технологии производства объекта проектирования осуществляется в различных целесообразных вариантах для каждого функционально-параметрического варианта.

Таким образом, круг рассматриваемых вариантов расширяется за счет конкретизации возможностей конструкторско-технологической реализации функционально-параметрических вариантов. С помощью сравнительного анализа всех вариантов осуществляется выбор конечного варианта, для которого уточняются необходимые функциональные характеристики, проверяется соответствие техническому заданию, вносятся необходимые коррективы в принятые ранее проектные решения и составляется полный комплект проектной документации. В отдельных случаях, когда не удается обосновать один конечный вариант, отбирается несколько (минимальное число) конечных вариантов для дальнейшей проработки и сопоставления в опытных образцах.

Соответственно трем основным этапам автоматизированного проектирования в САПР можно выделить три проектирующие подсистемы:

- 1) синтеза принципиальных технических решений;
- 2) функционального анализа;
- 3) конструкторско-технологического проектирования.

Первый этап — *синтеза принципиальных технических решений* — называют также структурным проектированием, задачей которого является обоснованный выбор принципиальных технических решений. Этот этап по трудоемкости обычно составляет 5...7% общего объема проектных работ. Однако по значимости он является наибольшим, так как охватывает основополагающие для всего проекта решения (корректировка технического задания и предложения на базе эскизного проекта). Чем больше альтернативных вариантов будет рассмотрено на этом этапе, тем вернее будут принимаемые решения. Поэтому автоматизация проектных процедур первого этапа с применением методов поиска оптимальных решений играет большую роль в улучшении качества проектов в целом. Тем не менее, учитывая большой объем творческой активности, требуемый на первом этапе, проектировщики сначала пытались выполнять его по старой традиции. И только позже, когда убедились, что количество принципиальных вариантов проекта может превышать их физичес-

кие возможности сравнения и выбора, стали создавать подсистемы первого типа.

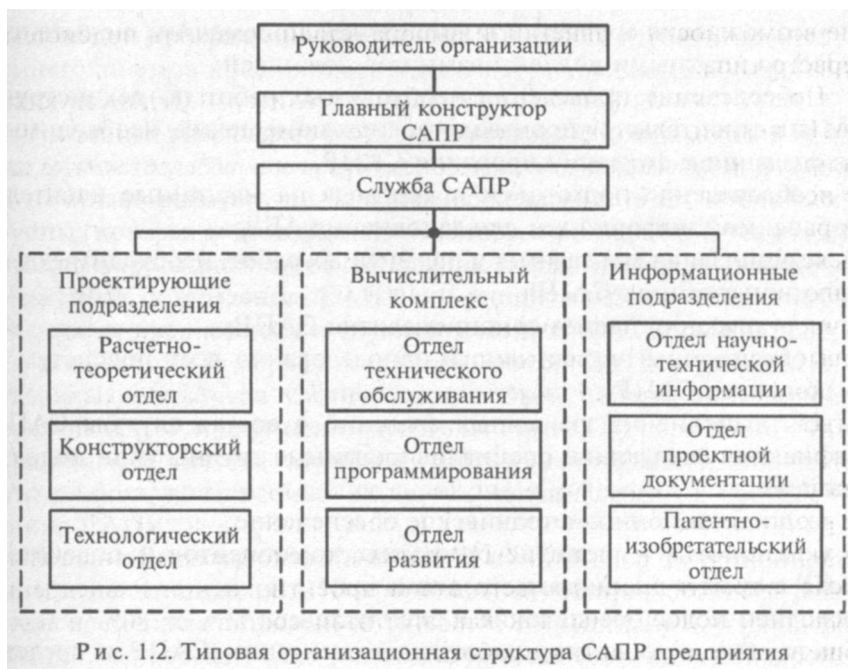
Подсистема *функционального анализа* реализована в действующих САПР первой. Это обусловлено тем, что формализация второго этапа проектирования достигла высокого уровня в **электротехнике** еще до появления ЭВМ. Имеющиеся математические модели и методики расчетов составили тот фундамент, на котором легко строились численные программы расчетов на ЭВМ. Более того, благодаря ЭВМ стало возможным применение новых, более точных и экономных вычислительных моделей функционального анализа, что существенно повысило качество проектов.

Конструкторско-технологическая подсистема САПР стали создаваться позднее по мере появления и развития средств машинной графики и оформления проектной документации. Уровень формализации задач на третьем этапе значительно ниже, а решаемые задачи разнообразнее по сравнению с предыдущими этапами. Несмотря на указанные трудности, САПР получает законченный вид только после автоматизации третьего этапа проектирования и внедрения последней подсистемы, так как этот этап составляет 80% и более общего объема проектных работ.

Следует также учесть, что задачи проектирования, особенно при выборе принципиальных и конструкторско-технологических решений, решаются не только путем моделирования и расчетов, но нередко и на изобретательском уровне. Это означает, что полностью формализовать процесс проектирования и выполнять его автоматически в САПР нецелесообразно. Все проектирующие подсистемы САПР должны предусмотреть активное участие проектировщиков в процессе проектирования, их вмешательство в этот процесс на любой стадии с целью ввода новой информации или ее корректировки. Иными словами, все подсистемы должны обеспечить активный диалог проектировщиков и ЭВМ.

§ 1.7. Организация проектирования в САПР

Внедрение и развитие САПР на предприятиях сопровождается определенной перестройкой организационной структуры, созданием подразделений, изменением функций и взаимоотношений между действующими подразделениями. На рис. 1.2 приведена типовая организационная структура САПР предприятия. Новым структурным подразделением в этой схеме является специализированная служба САПР, которая решает задачи, связанные с созданием, функциони-



рованием и развитием САПР. Руководство службой САПР осуществляет главный конструктор САПР, который назначается руководителем предприятия из числа ведущих специалистов по САПР.

Основные функции службы САПР состоят в следующем:

- проведение предпроектных исследований, предшествующих созданию САПР;
- составление и согласование технического задания на создание САПР;
- выделение в подразделениях предприятия групп сотрудников, обеспечивающих функционирование и развитие отдельных подсистем и компонентов САПР в соответствии со специализацией этих подразделений;
- обеспечение совместно с другими подразделениями создания САПР;
- осуществление привязки типовых подсистем и компонентов САПР к специфическим условиям предприятия;
- организация и участие в разработке индивидуальных компонентов и подсистем САПР;
- организация обучения и работы специалистов-пользователей с комплексом средств автоматизации проектирования;

- организация и участие в проведении приемочных испытаний САПР со штатными коллективами пользователей;
- обеспечение проведения необходимых работ по реконструкции или строительству производственных помещений, необходимых для создания и функционирования САПР;
- обеспечение подготовки и перевода на машинные носители необходимой информации для заполнения АБД;
- организация монтажных и наладочных работ, необходимых для функционирования САПР;
- организация планомерного развития САПР;
- обеспечение эффективного использования всех подсистем и компонентов САПР.

Для выполнения указанных функций в состав службы САПР включаются следующие специализированные группы (или подразделения):

- организационно-методическое обеспечение;
- разработка и развитие отдельных компонентов и подсистем САПР с учетом специфики предприятия;
- техническое обеспечение и эксплуатация;
- ведение архива технической документации САПР и средств информационного и программного обеспечения на машинных носителях, а также организация и диспетчеризация работ.

Функциональные группы службы САПР создаются не сразу, а по мере необходимости, соответственно разработке и внедрению САПР на предприятии. К созданию, функционированию и развитию САПР служба САПР привлекает все основные подразделения предприятия, связанные с проектированием.

Порядок взаимоотношений службы САПР с другими подразделениями устанавливает руководство предприятия.

Среди различных групп службы САПР в первую очередь создается группа *организационно-методического обеспечения*, которую часто называют также системотехнической, или координационной, группой. Эта группа начинает свою работу уже на этапе предпроектных исследований САПР, осуществляя комплексное обследование предприятия и выявляя необходимость и очередность автоматизации проектных работ.

В группу включаются высококвалифицированные специалисты в области проектирования, системотехники, вычислительной техники, программирования и т. п. Как правило, в группу входят также руководители отделов проектирования (расчетного, конструкторского и технологического) и отделов вычислительного комплекса (тех-

нического и программирования). На основании глубокого и всестороннего анализа предприятия составляется техническое задание на создание САПР.

На этапах разработки САПР возникает необходимость в создании *группы разработки отдельных компонентов и подсистем*. Эта группа начинает работать по заданиям организационно-методической группы, которая в этот период занимается разработкой технологии автоматизированного проектирования в целом, а также планированием работ по созданию САПР, их распределением между подразделениями предприятия и службы САПР, координацией и контролем этих работ. По мере детализации проекта САПР и разработки ее отдельных элементов увеличивается объем работы, выполняемой службой САПР и другими подразделениями. Одновременно с этим расширяются группы службы САПР и увеличивается количество сотрудников, вовлекаемых из других подразделений в процесс создания САПР.

К окончанию разработки САПР и на этапах ее функционирования и развития служба САПР оформляется в достаточно полном объеме и одновременно стабилизируется состав сотрудников других подразделений, непосредственно участвующих в процессе автоматизированного проектирования. Среди эксплуатационных групп службы САПР следует отметить *административную группу*, которая санкционирует доступ к программно-техническим средствам САПР; защищает их от постоянного вмешательства; контролирует систематическое обновление информационных фондов и т. п. Однако по-прежнему главенствующую роль выполняет организационно-методическая группа, которая теперь уже переносит центр тяжести своей работы на решение вопросов по вводу в действие САПР, организации согласованного взаимодействия различных подразделений, выявлению недостатков САПР и планированию ее дальнейшего развития.

Таким образом, на всех этапах жизненного цикла САПР центральное место в управлении соответствующих работ занимает организационно-методическая группа службы САПР. Поэтому необходимо эту группу укомплектовать наиболее квалифицированными специалистами из числа сотрудников предприятия. При отсутствии требуемых специалистов на предприятии к работе в организационно-методической группе следует привлекать специалистов из других отделов, участвующих в разработке САПР или же имеющих богатый опыт в этом направлении.

Разработка и внедрение САПР на предприятии сопровождаются также существенными изменениями в работе подразделений, вхо-

дящих в организационную структуру САПР. Так, например, в функции расчетно-теоретического отдела (см. рис. 1.2) входит не только выполнение расчетных проектов, но и составление математических моделей; алгоритмизация процессов расчетного проектирования; участие в разработке технологии автоматизированного проектирования и т. п. Более того, с вводом в действие подсистемы расчетного проектирования объем работ для получения расчетных формуляров резко уменьшается.

Поэтому традиционная функция разработки расчетных формуляров отходит на задний план, а основное место в работе расчетно-теоретического отдела занимает разработка компонентов методического, математического и лингвистического обеспечений САПР. Указанные изменения в функциях проектировщиков-расчетчиков ЭМ усиливают творческое начало в их работе и освобождают от большого объема традиционной работы по выполнению трудоемких вычислений.

Изменения в характере работы конструкторского и технологического отделов менее значительны по сравнению с расчетно-теоретическим отделом, так как соответствующие подсистемы САПР еще недостаточно разработаны и мало внедрены. Однако ускорение работ по автоматизации типовых процедур конструкторско-технологического проектирования приведет к существенным сдвигам и в работе этих отделов. Преодолены принципиальные затруднения для автоматизации таких работ, как детализовка чертежей, расчет типовых конструктивных деталей и узлов, оптимизация конструктивных параметров, технологических процессов и т. п. Освободившись от подобных трудоемких работ, конструкторы и технологи получают возможность перехода к новым обязанностям по формализации процессов конструирования и технологической проработки проектов и участия в разработке соответствующих компонентов и подсистем САПР.

Изменения в работе подразделений вычислительного комплекса и информационных предусматривают в основном два фактора:

- 1) выделение специализированных групп для участия в разработке, функционировании и развитии САПР;
- 2) приближение устройств **ВВОДА—ВЫВОДА** информации к рабочим местам проектировщиков.

Второй фактор может обусловить принципиальные изменения в структуре вычислительного комплекса из-за необходимости построения разветвленной вычислительной сети при наличии большого числа сотрудников и больших производственных площадей пред-

приятия, а также большого ассортимента проектируемых изделий. Кроме того, ввод в действие машинных носителей требует пересмотра традиционной проектной документации как по содержанию, так и по форме; стандартизации проектной документации в условиях САПР; организации работы информационных отделов с учетом машинных носителей информации.

Взаимодействие службы САПР с профилирующими подразделениями организации по проектированию в рамках структуры, показанной на рис. 1.2, выдвигает новые, не решенные до конца проблемы, которые связаны с деятельностью сотрудников в условиях САПР. Главными из них являются уровень подготовки кадров и ответственность проектировщиков за проектные решения.

Кроме глубоких профессиональных знаний по избранной специальности от большинства сотрудников, работающих в САПР, требуется определенный уровень знаний и в смежных областях. Так, например, проектировщики должны знать основы прикладной математики, программирования и вычислительной техники. И наоборот, математики-программисты и специалисты по вычислительной технике должны знать основы проектирования, организацию проектных работ и проектную документацию. Такую широкую эрудицию должны иметь специалисты, ориентированные на работу в САПР.

Проблема ответственности возникла в связи с тем, что проектная документация, получаемая в САПР, является результатом коллективной деятельности. При ручном проектировании каждый проектный документ, как правило, выполняется от начала до конца одним лицом, которое подписывается под этим документом и несет за него ответственность.

При автоматизированном проектировании ошибки в документе могут возникнуть по вине сотрудников различных подразделений (неточная модель, ошибка в программе, сбой ЭВМ, неправильно занесенная исходная информация и т. п.). При этом трудно или даже невозможно установить подразделение и сотрудников, допустивших ошибку. В такой ситуации трудно определить лицо, юридически ответственное за проектный документ. Ответственность за документ должно нести лицо, которое получило задание на его разработку (сотрудник проектирующего подразделения). Однако чтобы поставить подпись под документом, полученным с помощью САПР, нужна дополнительная экспертиза, при которой проектировщик должен убедиться, что данный документ правдоподобен в той мере, в какой он убежден при ручном проектировании. Методы эксперти-

зы **проектировщик** должен выбирать исходя из конкретного содержания документа и имеющихся возможностей:

В целом рассмотренная типовая организационная структура САПР является достаточно гибкой и хорошо сочетается с уже сложившимися организационными структурами различных проектных учреждений.

Современные объекты электротехники (ЭТС) достигли такого уровня сложности, что они не могут разрабатываться и производиться каким-то одним предприятием. Для этого нужен ряд (объединение) предприятий, отношения между которыми строятся по иерархическому принципу. В качестве примера на рис. 1.3 показана двухуровневая структура объединения предприятий-разработчиков. На верхнем уровне находится головное предприятие-разработчик, а на нижнем — предприятия-соисполнители. Головной разработчик обычно отвечает за создание ЭТС в целом, а соисполнители — за создание его отдельных частей и элементов. Связи между головным предприятием и соисполнителями носят двусторонний итеративный характер. Наверху составляются технические задания для предприятий-соисполнителей, а по полученным результатам технические задания уточняются. И так может происходить несколько раз, пока задания на разработку всех элементов и узлов системы не будут полностью согласованы между всеми **разработчиками**. Такая схема взаимосвязей между предприятиями требует, в свою очередь, организации объединенной службы САПР аналогичной структуры. Но это необязательно. В случае нехватки специалистов или материально-технических средств службу САПР можно создать лишь на головном предприятии и привлечь к ней ведущих проектировщиков из предприятий нижнего уровня. При такой стратегии необходимость в проектных подразделениях нижнего уровня вообще может отпасть и они со временем отомрут.



Рис. 1.3. Пример двухуровневой структуры объединения предприятий-разработчиков

Более того, в настоящее время уровень развития вычислительных сетей и персональных компьютеров настолько возрос, что службы САПР можно создавать на основе очень гибких схем взаимодействия специалистов различного профиля: инженеров-проектировщиков, программистов, электронщиков и системотехников. Сейчас многие специалисты, которым для работы требуется только компьютер и связанные с ним периферийные устройства, вполне могут работать дома. Для оборудования автоматизированных рабочих мест (АРМ) в домашних условиях кроме компьютера и периферии нужно лишь несколько квадратных метров свободной жилой площади. А подключение домашнего АРМ к вычислительной сети службы САПР не представляет практически никаких затруднений, если пользоваться Интернетом и электронной почтой. Поэтому в развитых западных странах уже многие специалисты переходят на такую свободную форму работы. Это создает определенные преимущества как для работников, так и для предприятия и обществу в целом. Для предприятия экономятся производственные площади и штатный состав присутствующих на службе сотрудников, для работников на дому экономятся транспортные затраты и, что особенно важно, время, затрачиваемое на поездки на работу и домой. А для города эффект выражается в уменьшении транспортных потоков, особенно в час пик.

Г Л А В А 2

Формализация задач и методов проектирования

§ 2.1. Структуризация процессов проектирования ЭТС

Сложность ЭТС не позволяет ставить и решать задачи их проектирования в целом. Как уже указывалось, в таких случаях необходимо осуществить декомпозицию ЭТС на ряд подсистем и соответствующих подзадач проектирования. Проектирование каждой подсистемы представляет собой сравнительно простую задачу, которая решается уже известными методами. Если декомпозицию ЭТС сделать так, чтобы проектные подзадачи решались последовательно друг за другом, а результаты предыдущих решений служили исходной информацией для последующих решений, то можно построить многоэтапный процесс решения, который позволит получить в совокупности все проектные решения ЭТС. Этапы проектирования соединены прямыми и обратными связями. Прямые связи образуют требуемую последовательность этапов, а обратные связи итерационным способом корректируют и стыкуют решения, получаемые на отдельных этапах. Чтобы построить подобные многоэтапные процессы решения задач проектирования ЭТС, надо начать со структуризации типового процесса проектирования.

Структурный анализ процесса проектирования рассмотрим на примере одной из самых сложных ЭТС — ЭЭС, располагающейся на самом верхнем классификационном уровне. Следует отметить, что большие ЭЭС (электроэнергетические системы регионов, городов и районов) в большинстве стран разрабатывались не сразу, а создавались по мере развития уже существующих систем. Задачи развития существующих ЭЭС значительно отличаются от задач проектирования новых ЭЭС. Возможности получения оптимальных

решений в первом случае намного меньше, чем во втором. В этом смысле наибольшую свободу для принятия оптимальных решений дают задачи проектирования автономных, например транспортных, ЭЭС. Учитывая это обстоятельство, структуризацию процесса проектирования рассмотрим на примере авиационных ЭЭС, которые проектируются для каждого нового самолета практически заново. Это означает, что состав проектируемого объекта является полным и включает как генераторы, преобразователи и приемники электроэнергии, так и линии передач и распределения электроэнергии. Следовательно, процесс проектирования должен включать выбор всех указанных компонентов системы, а также их размещение в монтажном пространстве.

Проектирование ЭЭС в соответствии со стандартными этапами проектирования более или менее сложных технических объектов начинается с формирования *технического задания* (ТЗ) и *технического предложения*. ТЗ определяет основное назначение объекта проектирования, его основные тактико-технические данные и предъявляемые технико-экономические требования и условия проектирования и производства. Применительно к самолетным ЭЭС ТЗ включает перечень основных функциональных узлов самолета и их функциональные характеристики, которые должны быть реализованы с помощью ЭЭС, а также основные технико-экономические требования к ЭЭС и самолету в целом. Исходной информацией для составления ТЗ являются: данные об аналогах и прототипах объекта проектирования; наилучшие показатели, достигнутые в мировой практике для соответствующего класса объектов; конструктивные и технологические возможности реализации; государственные и отраслевые стандарты; условия функционирования объекта проектирования, включая воздействие внешней среды, и т. п. ТЗ может дополняться и корректироваться на ближайших последующих этапах проектирования.

Техническое предложение разрабатывается на основе ТЗ, углубляет содержание отдельных разделов ТЗ и добавляет новые разделы по описанию и сравнительной оценке отдельных принципиально возможных вариантов построения ЭЭС, оценке характеристик и технико-экономических показателей рациональных вариантов, уточнению работ на следующих этапах проектирования и производства, составлению заданий и требований к выполнению этих работ. В результате разработки технического предложения накапливается информация о ряде целесообразных принципиальных проектных решений, которые принимаются к дальнейшему рассмотрению. Несмотря на это, во многих случаях допускается исключение этапа

технического предложения и непосредственный переход к следующему этапу эскизного проектирования.

Эскизное проектирование является тем этапом, на котором осуществляется окончательный выбор принципиальных решений и конечного варианта объекта проектирования, дается технико-экономическое обоснование принятого варианта. Наряду с выбором принципиального облика ЭЭС начинается детализация объекта проектирования, его характеристик и показателей. На этом этапе наряду с расчетными работами могут создаваться, а в случае необходимости и испытываться макеты ЭЭС или ее отдельных частей и узлов, проводятся экспериментальные исследования аналогов и прототипов и т. п. Кроме того, начинается рассмотрение вопросов эксплуатационного и организационного характера. К ним относятся вопросы, связанные с выбором основных функциональных режимов, методов и средств управления, контроля и профилактики, определением правил обслуживания и ремонта, оценкой экономической эффективности и т. п.

На этапах технического предложения и эскизного проекта последовательно решаются следующие проектные задачи.

1. Анализ и выбор приемников электроэнергии (ПЭ). Исходной информацией для решения этой задачи являются функциональные требования, для выполнения которых предназначена ЭЭС, а также справочно-нормативные данные по электрооборудованию, с помощью которого выполняются эти требования. Так, например, самолетная ЭЭС должна обеспечить функционирование электромеханизмов, освещение, нагрев, радиосвязь, радиолокацию, навигацию, системы управления, контроля и защиты, а также ряд специальных функций для самолетов специального назначения (военные, медицинские и т. п.). В соответствии с многофункциональным назначением ЭЭС ПЭ на самолетах группируются по следующим видам: электропривод; светотехническое оборудование; приборы контроля работы силовых установок; средства радиосвязи; радиолокационное оборудование; пилотажно-навигационные приборы, устройства и системы; бортовые системы управления полетом; защитное оборудование и специальное оборудование. Кроме того, на борту используются также управляющие вычислительные комплексы, с помощью которых различные виды оборудования интегрируются в единые комплексы.

При выборе указанных видов ПЭ следует учитывать не только функциональные требования к самолету в целом, но и требования к его отдельным узлам и **блокам**. К такого рода требованиям относятся:

- минимальные масса, габариты и стоимость;

- высокие надежность и безотказность функционирования;
- изменения температуры от $+60$ до -60°C и влажности до 100%;
- устойчивость к механическим воздействиям (вибрации, перегрузки, удары и т. П.);
- независимость к пространственному положению;
- максимальный уровень унификации и стандартизации и т. д.

Указанные требования приводят к существенным отличиям между показателями и характеристиками самолетных ПЭ и ПЭ наземного назначения. В результате множество вариантов ПЭ, на котором осуществляется выбор для каждой группы ПЭ, резко сужается. Тем не менее выбор каждого конкретного ПЭ является далеко не однозначным. Так, например, известно, что одни и те же электромеханизмы для привода органов управления самолетом и шасси, насосов, лифтов, нагнетателей и других агрегатов могут быть принципиально приведены в действие электродвигателями различных типов: постоянного тока, синхронными, асинхронными, постоянной и переменной частоты. В ряде случаев (интегральный электропривод, насосы и т. п.) электропривод определяется однозначно исходя из выпускаемой авиационной промышленностью номенклатуры изделий. Однако немало и таких случаев, когда выбор того или иного типа электропривода зависит от проектировщика. Это особенно важно, когда отход от традиционных подходов сулит значительные выгоды. Так, далее показано, что около 75...80% электродвигателей на пассажирских лайнерах могут быть асинхронными с переменной частотой питания, что существенно улучшает технико-экономические показатели ЭЭС в целом. В то же время отход от традиционных решений связан с разработкой новых электромеханизмов, что не всегда возможно по экономическим и иным соображениям.

Совместный анализ выпускаемого промышленностью ассортимента бортового оборудования, имеющихся новых проектных разработок, требований к ЭЭС и ПЭ, накопленного опыта проектирования и производства, а также ряда других соображений позволяет выделить в общем случае несколько альтернативных вариантов выбора для значительного числа ПЭ. Остальные ПЭ выбираются однозначно. Таким образом, решение данной задачи оформляется в виде перечня одновариантных и многовариантных ПЭ с указанием основных показателей для каждого варианта. ПЭ в перечне группируются, как указано выше, по функциональному назначению.

На базе перечня ПЭ составляются заявки на потребление электроэнергии с учетом всех возможных режимов работы, включая ава-

рийные. Одновременно осуществляется размещение ПЭ в пределах монтажного пространства ЭЭС с учетом функциональных связей ПЭ с другими видами оборудования.

Для пространственного размещения ПЭ на стадии проектирования используются обычно геометрические модели монтажного пространства различной степени точности, например при ручном эскизном проектировании самолетных ЭЭС размещение ПЭ и другого оборудования производится на так называемых нулевых или обводных чертежах самолета. На этих чертежах кроме обводных контуров самолета в продольном и поперечном сечениях указываются также допустимые области (отсеки) для размещения электрооборудования и допустимые трассы, по которым разрешается прокладывать электропроводку.

2. Структурно-параметрический синтез ЭЭС. Исходная информация для решения этой задачи расширяется за счет информации о ПЭ, полученной при решении предыдущей задачи. В простейшем случае, когда все ПЭ определены однозначно, все равно выбор структурно-параметрического облика ЭЭС является многовариантным. Дело в том, что параметры электропитания ПЭ отличаются большим многообразием, особенно радиоэлектронное оборудование. Если ПЭ поставить в соответствие аналогичное многообразие источников питания, то число последних будет недопустимо большим. Поэтому источники питания различаются как первичные и вторичные. Первичные источники генерируют электрическую энергию, а вторичные преобразуют ее в электроэнергию с нужными параметрами.

На самолетах нашли применение первичные источники как постоянного тока напряжением 28,5 В, так и переменного тока напряжением 208/120 В. Переменный ток имеет частоту или постоянную (400 Гц), или переменную (380...900 Гц). В зависимости от выбора первичных источников различают системы электроснабжения постоянного или переменного тока с постоянной или переменной частотой. Иногда применяются смешанные системы, имеющие как источники постоянного тока, так и источники переменного тока. Все ПЭ, которых не удовлетворяют параметры первичных источников, получают питание от вторичных источников: трансформаторов, трансформаторно-выпрямительных блоков, преобразователей.

Таким образом, даже при однозначном выборе всех ПЭ выбор первичных и вторичных источников является многовариантным. Если же выбор ПЭ также является многовариантным, то количество структурно-параметрических вариантов ЭЭС резко возрастает. В этой ситуации для выбора конечного варианта привлекаются методы кри-

териального анализа и отбора. При синтезе самолетных ЭЭС используется ряд критериев: минимум массы, габаритов, стоимости, максимум надежности и безотказности. Следовательно, в общем случае задача структурно-параметрического синтеза ЭЭС относится к многокритериальным задачам оптимизации. В результате ее решения должны быть однозначно выбраны как все первичные и вторичные источники питания, так и ПЭ, а также привязка каждого ПЭ к тому или иному источнику.

3. Выбор и размещение узловых точек ЭЭС. Решение предыдущей задачи позволяет построить структурную схему ЭЭС, которая показывает направления передачи электроэнергии от первичных источников ко вторичным и ПЭ. Однако структурная схема, отображая лишь энергетические связи, не учитывает реальных путей подключения ПЭ к источникам в пределах монтажного пространства. Обычно ПЭ питаются электроэнергией через распределительные устройства, которые различаются как центральные и периферийные. Центральные распределительные устройства (ЦРУ) располагаются вблизи основных источников, а периферийные или просто распределительные устройства (РУ) располагаются вблизи массового размещения ПЭ. В целом ЦРУ и РУ, так же как и первичные и вторичные источники, в рамках структурных схем можно рассматривать как узловые точки, через которые происходит передача энергии от источников к ПЭ.

Выбор и размещение указанных узловых точек в основном зависит от трех факторов:

- 1) структурной схемы ЭЭС;
- 2) геометрической модели монтажного пространства;
- 3) типовой конфигурации электрической сети (разомкнутая, замкнутая и т. п.).

Все три фактора при решении данной задачи предполагаются известными. Тогда множество вариантов выбора и размещения узловых точек определяется допустимыми зонами и трассами геометрической модели. Выбор конечного варианта из указанного множества также является решением многокритериальной оптимизационной задачи. В самом простейшем случае за критерий оптимальности можно принять минимум суммарной длины всех соединений между элементами.

4. Разработка принципиальных электрических схем. Эта задача требует детализации структурных схем, ЦРУ и РУ путем выбора и размещения аппаратуры управления, контроля и защитно-коммутационных устройств. Выбор, как правило, осуществляется на заданном множестве соответствующих элементов, выпускаемых промыш-

ленностью или разработанных с этой целью. Размещение осуществляется по-прежнему на геометрической модели монтажного пространства. В целом задача может иметь ряд вариантов решения и в общем случае также относится к классу многокритериальных оптимизационных задач. В результате решения должны быть получены принципиальные электрические схемы и полный перечень всех элементов, входящих в схему.

5. Функциональный анализ ЭЭС. После разработки принципиальных схем ЭЭС требуется проверка их работоспособности, так как при решении предыдущих задач многие требования к функционированию ЭЭС не учтены, в особенности требования к рабочим и аварийным режимам. Например, для авиационных ЭЭС требуется проверить требования к всплескам и провалам напряжения при подключении и отключении нагрузки, токам внезапного короткого замыкания в различных режимах, времени переходных процессов, токам и напряжениям в различных аварийных режимах и т. д.

Функциональный анализ обычно осуществляется путем математического, физического или смешанного моделирования ЭЭС. При наличии возможностей проводятся также натурные испытания ЭЭС или отдельных ее частей. В связи с развитием методов математического моделирования ЭЭС на ЭВМ этот подход получил в последние годы наибольшее предпочтение.

Последовательное решение указанных выше задач определяет основное содержание этапов технического предложения и эскизного проекта. Завершаются эти этапы выпуском проектной документации, в которой должны быть отражены спецификация элементной базы ЭЭС на уровне принципиальных схем, структурные и принципиальные схемы, графики нагрузок, результаты моделирования и испытаний, технико-экономическое обоснование проекта, задания на разработку и производство нестандартных или отсутствующих элементов системы и ряд других документов, обеспечивающих дальнейший ход проектирования и производства.

Следующим большим этапом является **техническое проектирование**. На этом этапе идет в основном конструкторская реализация объекта проектирования. С позиций конструирования уточняются и корректируются результаты предыдущих этапов проектирования, проводятся более длительные и точные расчетные и экспериментальные исследования. Кроме конструирования много внимания уделяется также вопросам технологии производства и эксплуатации объекта проектирования. Применительно к ЭЭС конструкторско-технологическая проработка ведется в основном по монтажу элементов системы и созданию новых элементов. Например, при проек-

тировании авиационных ЭЭС многие распределительные устройства и коробки проектируются вновь и требуют полной технологической проработки вплоть до выбора технологических процессов их изготовления.

Основными задачами технического проектирования, общими для всех ЭЭС, являются следующие.

6. Прокладка проводов и расчет их длины. Эта задача по существу сводится к размещению принципиальной электрической схемы на геометрической модели ЭЭС. Очевидно, что решение будет тем точнее, чем точнее геометрическая модель отражает конфигурацию монтажного пространства (допустимых областей размещения элементов ЭЭС и трасс для прокладки проводов). Во многих случаях соединения между элементами можно осуществить различными комбинациями допустимых трасс. Поэтому в общем случае задача является оптимизационной. В качестве критериев оптимизации можно использовать суммарные длины проводов, массы или стоимость. После выбора трасс, по которым укладываются провода, расчет их длин осуществляется однозначно.

Следует отметить, что для более точного решения задачи кроме геометрической модели монтажного пространства необходимы также геометрические модели внутреннего пространства распределительных устройств и коробок. Однако учет дополнительных геометрических моделей резко усложняет задачу. Кроме того, часто внутренние длины проводов несоизмеримо малы по сравнению с внешними, за исключением случаев, когда провод целиком размещен внутри устройства или коробки. С учетом этих обстоятельств во многих случаях можно пренебречь внутренними длинами проводов. Так как точное геометрическое моделирование монтажного пространства достаточно затруднительно, то рассматриваемая задача обычно решается с последующим уточнением на макете реального монтажного пространства.

7. Выбор напряжений, токов, марки и сечений проводов. Эта задача с конструкторской точки зрения требует лишь выбора сечений проводов при условии, что длины уже известны и выполняются общие для всей сети ограничения по допустимым падениям напряжений и максимальным токам проводов на пути от источников к ПЭ. Последнее обстоятельство не позволяет решать задачу для каждого провода в отдельности. В то же время при рассмотрении сети в целом имеется множество вариантов распределения допустимых отклонений напряжения по узловым точкам сети и, следовательно, соответствующего выбора сечений проводов. Таким образом, задача является оптимизационной и связывает одновременно два типа рас-

четов: расчеты токов и напряжений в узловых точках принципиальной схемы (типичная задача теории электрических цепей) и расчет сечения проводов по заданным величинам длины и падения напряжения. Выбор марки проводов осуществляется, как правило, на узкой номенклатуре для конкретного объекта проектирования. В большинстве случаев марку провода (группы проводов) считают известной при решении задачи.

8. Формирование электрожгутов и электросоединителей. Это достаточно сложная и трудоемкая задача, которая включает несколько взаимосвязанных подзадач:

- объединение проводов, кабелей, уложенных по одной трассе (последовательности трасс) в жгут при удовлетворении целого ряда требований (принадлежность к одной или нескольким родственным функциональным системам, электромагнитная совместимость, технологичность монтажа и т. п.);
- выбор электросоединителей (рубильников, разъемов, соединительных муфт) и подсоединение проводов к клеммам электросоединителей;
- технологический монтаж жгута (выбор способов доставки, укладки и крепления жгута) и проводов (сварка, пайка проводов к клеммам).

Если учесть также существующее многообразие жгутов (простые, присоединенные только к двум электросоединителям, сложные, присоединенные к трем электросоединителям и более, составные, состоящие из нескольких технологически разделенных частей, и т. п.) и необходимость их привязки к геометрической модели ЭЭС, то нетрудно представить большое количество возможных вариантов и оптимизационный характер решаемой задачи.

9. Разработка схем соединений ЭЭС. Схема соединений, иногда называемая полумонтажной схемой, представляет собой детальное изображение всех проводных и кабельных связей элемента ЭЭС с другими элементами. В отличие от принципиальной схемы на схеме соединений указываются все клеммы элемента и присоединенные к ним провода (кабели) с указанием адресов клемм элементов и электросоединителей, с которыми эти соединения осуществляются. Схемы соединений применяются для построения более детальных монтажных схем и поэлементного контроля монтажа ЭЭС. Информация, полученная в результате решения предыдущих задач по получению принципиальных схем, электрожгутов и **электросоединителей**, достаточна для однозначного построения схем соединений. Поэтому данная задача по существу ориентирована не на получение новой информации, а на переработку уже имеющейся информации.

10. Разработка монтажных устройств. К монтажным устройствам можно отнести распределительные щиты и коробки, релейные щиты и коробки, крепежные изделия (хомуты, консоли и т. п.) и т. д. Эта задача встает в тех случаях, когда известные технологические устройства монтажа не удовлетворяют конструктора и требуется спроектировать новые. Как правило, эта задача решается специалистами по монтажу и крепежу. От конструкторов ЭЭС в данной ситуации требуется лишь составить технические задания на проектирование указанных изделий.

В целом техническое проектирование завершается выпуском новых документов — схем соединений, трассовых схем, чертежей жгутов, спецификации защитно-коммутационных устройств и т. п. Полный объем проектной документации выпускается на специально выделяемом этапе *рабочего проектирования*. В полный комплект рабочей документации кроме документов, полученных на этапах эскизного и технического проектирования, входят также пояснительные записки по описанию объекта проектирования и обоснованию принятых решений, рисунки и таблицы данных, технологические карты, материальные спецификации, перечень стандартов, нормативов и других нормативных документов, распространяющихся на данный объект проектирования, комплект эксплуатационных документов и т. д. Вся эта документация, называемая рабочим проектом, после соответствующего утверждения является основой для продолжения жизненного цикла объекта проектирования (реализации и эксплуатации).

По аналогии со структуризацией процесса проектирования ЭЭС можно проводить декомпозицию процесса проектирования любых ЭТС, включая ЭИС. Специфика систем будет проявляться в структурной последовательности задач лишь в той части, которая связана с конкретной элементной базой и конкретным монтажным пространством. По крайней мере, для систем с электропроводной связью элементов все задачи, связанные с синтезом, конструированием и монтажом схем, сохраняют свою актуальность и носят достаточно общий характер.

§ 2.2. Постановка задач проектирования в САПР

Опыт автоматизации проектирования различных технических устройств и систем показывает, что средства автоматизации оказывают существенное влияние на постановку и решение проектных задач. С этой точки зрения рассмотрим в той же последовательности (с той же нумерацией) задачи, приведенные в § 2.1. При этом

будем ориентироваться на аппаратно-программные средства современных систем автоматизированного проектирования.

1. Задача выбора и размещения ПЭ при традиционном ручном проектировании решается совместно рядом специалистов с использованием одной и той же геометрической модели монтажного пространства. Так, для самолетной ЭЭС выбор ПЭ осуществляют специалисты по различным бортовым функциональным системам (пилотажики, управленцы, радисты, связисты и т. п.). Область или место размещения обычно диктуется функциональными характеристиками ПЭ, узлов и систем самолета в целом. С учетом этого на нулевых (обводных) чертежах самолета делаются отметки о размещении ПЭ.

Традиционный подход к решению данной задачи может быть сохранен и в САПР ЭЭС при наличии развитой информационно-поисковой системы и системы машинной графики. Номенклатура ПЭ и нулевые (обводные) чертежи с указанием допустимых областей и трасс перед началом проектирования вводятся для хранения в автоматизированную базу данных. Затем проектировщик вызывает на экран монитора имеющийся в базе данных перечень ПЭ и делает свой выбор (одно- или многовариантный). Далее на экран графического дисплея вызывается геометрическая модель и соответствующими средствами, например световым пером, делается отметка о размещении ПЭ. Координаты точки размещения автоматически определяются следом за пером и засылаются также в базу данных.

Такая схема работы в САПР полностью соответствует традиционной логике и действиям конструктора-разработчика электросхем с той лишь разницей, что вместо бумажных текстов и чертежей используются их изображения на экране дисплея. Эффект от автоматизации традиционного поведения проектировщика существенный. Значительно ускоряется процесс решения задачи и исключаются ошибки, связанные с анализом номенклатуры ПЭ и ручным определением координат размещения ПЭ на геометрической модели.

Одновременно с выбором и размещением ПЭ можно значительно улучшить процесс оформления заявок на потребление электроэнергии с указанием параметров потребляемой энергии, длительности режимов работы, допустимых отклонений параметров в рабочих и аварийных режимах и т. п. При ручном оформлении в бланки заявок включается большое число данных, которые выбираются из картотеки электрооборудования. В САПР эта процедура упрощается, если картотека предварительно будет полностью введена в базу данных. Тогда достаточно указать кодовое наименование ПЭ, и вся требуемая

информация будет получена автоматически. Эффект автоматизации в данном случае определяется ускорением оформления заявок, внесением в них изменений, группированием заявок, а также исключением ошибок, возможных при традиционном способе.

2. Многокритериальная оптимизационная задача структурно-параметрического синтеза ЭЭС принципиально не может быть решена ручным способом. Проектировщик (группа проектировщиков) физически не в состоянии в заданные сроки проектирования рассмотреть и оценить более двух-трех вариантов. В то же время показано [9], что реальное множество возможных вариантов решения исчисляется, например, для самолетных ЭЭС сотнями (до 500 и более). Поэтому при традиционном подходе к проектированию структурно-параметрический облик ЭЭС выбирается, как правило, на основе накопленного опыта и интуиции проектировщика с учетом его кругозора по прототипам, новым разработкам в области элементной базы ЭЭС и т. п.

В полном объеме рассматриваемая задача синтеза решается с привлечением методов математического программирования и вычислительной техники. Так, в свое время применительно к самолетным ЭЭС был разработан и использован в ряде организаций пакет прикладных программ (ППП) «Структура», ориентированный на ЕС ЭВМ [10]. В качестве критериев оптимизации в ППП «Структура» приняты такие показатели, как конструктивная масса, структурная надежность и расход топлива на функционирование ЭЭС. В качестве ограничений на решение задачи выступают допустимые варианты выбора ПЭ и источников электроэнергии. В результате многокритериального поиска находится так называемое Паретто-множество вариантов решения, из которого отбираются и сравниваются конкурентоспособные варианты.

Опыт использования ППП «Структура» показал, что корректное решение задачи синтеза дает возможность улучшить технико-экономические показатели ЭЭС на 10...20% по сравнению с результатами традиционного подхода. Учитывая также, что выбор структуры и параметров ЭЭС является одним из наиболее важных, если не самым принципиальным решением, которое автоматически влияет на все последующие проектные решения, становится ясно, что в САПР ЭЭС необходимо включить прикладные программы многокритериальной оптимизации для решения рассматриваемой задачи синтеза.

При отсутствии подобных прикладных программ построение структурных схем ЭЭС можно выполнить в диалоговом режиме общения конструктора с графическим дисплеем по аналогии с тем,

как он решает эту задачу за обычным кульманом. Даже на этом уровне автоматизации работа с электронным кульманом позволяет значительно ускорить вычерчивание структурных схем, внесение изменений в эти схемы и исключает погрешности ручного конструирования. Таким образом, появляется возможность увеличить число анализируемых и сравниваемых вариантов, что, в свою очередь, повышает вероятность выбора лучшего варианта. Однако гарантированный выбор наилучших решений достигается только с помощью программ оптимизации, что соответственно обеспечивает максимальный эффект автоматизации процессов решения.

3. Задача выбора количества и мест расположения на геометрической модели узловых точек ЭЭС, в которых должны быть размещены источники, распределительные устройства и коробки, также имеет множество решений, необходимое для анализа проектировщиком. Поэтому ручной способ ее решения не гарантирует лучших решений. По аналогии с предыдущей задачей в САПР она может решаться двояким образом: 1) в полном объеме с привлечением математических моделей и методов математического программирования; 2) в режиме диалогового конструирования за электронным кульманом. Максимальный эффект автоматизации по-прежнему достигается только в первом случае.

4. Подходы к автоматизации построения принципиальных электрических схем ЭЭС в САПР аналогичны двум предыдущим задачам: 1) оптимальный выбор и размещение защитно-коммутиционной и иной аппаратуры и соответствующая детализация структурных схем; 2) диалоговое конструирование. Во всех случаях автоматизация решения задачи имеет большой эффект, особенно по времени и качеству процессов решения.

5. Задача функционального анализа ЭЭС при ручном способе проектирования практически недоступна решению из-за большой сложности функциональных математических моделей ЭЭС и трудоемкости их расчетов. Поэтому функциональные свойства ЭЭС в этом случае проверяются или на физических моделях типа расчетных столов постоянного и переменного тока, или на макетах и опытных образцах. Возможности расчетных столов достаточно ограничены, особенно для анализа переходных процессов в системе, а испытания макетов и опытных образцов связаны с большими затратами по их изготовлению и последующей корректировке принятых ранее проектных решений.

Математическое моделирование ЭЭС на ЭВМ в настоящее время позволяет исследовать с достаточной точностью установившиеся и переходные режимы как в системе в целом, так и в отдельных

улах. Благодаря этому функциональный анализ ЭЭС можно проводить сразу после построения структурных и принципиальных схем, экономя при этом и время, и значительный объем последующих натурных испытаний.

Всесторонний функциональный анализ ЭЭС на ЭВМ требует разработки цифровых моделей достаточно универсального характера, которые обеспечивают гибкую смену структуры и режимов ЭЭС. Такой подход в свое время был реализован в ППП «Динамика» для анализа самолетных систем электроснабжения [11]. ППП «Динамика» позволяет оперативно перестраивать структуру, математические модели отдельных элементов и параметры ЭЭС, чем обеспечивает требуемую универсальность и возможность создания имитационных моделей, позволяющих исследовать не только отдельные режимы, но и поведение системы в заданных ситуациях, например в типовом рейсе, различных авариях и т. п.

Включение в САПР ЭЭС прикладных программ, подобных ППП «Динамика», позволяет осуществлять функциональные исследования ЭЭС на самых ранних стадиях проектирования и достичь большего технико-экономического эффекта от автоматизации этого класса проектных задач.

6. Задача прокладки проводов электрической сети и расчета их длины по аналогии с предыдущими оптимизационными задачами может решаться в САПР или в полном объеме с использованием математических моделей и методов оптимизации, или в режиме диалогового конструирования, сохраняющего преемственность с ручным способом проектирования. Во всех случаях точность решения зависит от точности геометрического моделирования монтажного пространства. Геометрические модели, используемые на стадии эскизного проектирования (типа обводных чертежей), достаточно грубые и не отражают внутреннюю конфигурацию электроотсеков, участки выхода на трассы и т. п. Поэтому при ручном способе проектирования результаты, полученные на геометрической модели, впоследствии уточняются с помощью макетирования электропроводки. При автоматизированном проектировании и наличии развитых средств машинной графики в САПР становится возможным использовать более точные модели с детальным описанием трасс, их соединений и зон размещения электрооборудования. Это позволит исключить или, по крайней мере, существенно сократить объем макетирования электропроводки, что обеспечит существенное повышение эффекта автоматизации.

К сожалению, до настоящего времени разработке детальных геометрических моделей монтажного пространства ЭЭС не уделяется должного внимания и приемлемые по точности геометрические мо-

дели, как правило, отсутствуют. Тем не менее даже в худшем случае диалогового конструирования на грубых геометрических моделях эффект автоматизации решения задачи в САПР достаточно велик. Резко сокращается время решения из-за автоматического расчета длины и исключаются погрешности арифметического характера.

7. Задача **выбора марки и сечений проводов** при ручном способе проектирования обычно решается так. На основе известного опыта и собственной интуиции конструктор задает марки проводов и распределяет по узловым точкам сети заданное общее падение напряжения между источниками и ПЭ. Тогда, зная напряжение в узловых точках и максимально допустимые токовые нагрузки по условиям защиты, достаточно просто определить сечения проводов на отдельных участках между узловыми точками. Иными словами, осуществляется декомпозиция полной схемы ЭЭС на множество простых схем с заданными граничными условиями по напряжениям и токам, что позволяет решить задачу вручную.

Такой подход можно реализовать и в САПР ЭЭС, работая с электронным кульманом. Однако наибольший эффект достигается в САПР при решении задачи в полном объеме, который недоступен отдельному проектировщику. Расчет полной схемы в САПР не требует предварительного задания узловых напряжений и гарантирует оптимальность полученных решений. Следует отметить, что полный расчет сети резко увеличивает размерность задачи и время ее решения. Однако использование специальных методов эквивалентирования отдельных участков полной схемы ЭЭС позволяет решить задачу в САПР за приемлемое время с использованием достаточно точных математических моделей сети.

8. Задача **конструирования электрожгутов и выбора электросоединителей** при ручном способе проектирования решается лишь на основе опыта и интуиции, что не гарантирует высокое качество принимаемых решений. В оптимизационной постановке эта задача может быть решена в САПР при включении специальных прикладных программ. Известные попытки создания программных комплексов для решения этой задачи путем сочетания математических и эвристических методов показали достаточно обнадеживающие результаты, несмотря на большую сложность и трудоемкость алгоритмов решения. Большинство решений при этом можно получить автоматически. Вмешательство конструктора в процесс решения необходимо в основном для учета специфических для данного проекта требований по технологии монтажа и совместимости проводов.

В САПР может быть сохранен и традиционный подход, если использовать режим диалога с помощью электронного кульмана.

Во всех случаях по аналогии с предыдущими задачами оптимизационного характера достигается большой эффект от автоматизации процессов решения.

9. Однозначный характер получения схем соединений на основе результатов решения предыдущих задач позволяет решать данную задачу в САПР автоматически при наличии соответствующей базы данных и средств машинной графики. Эффект автоматизации обеспечивается максимальный.

10. Технические задания на разработку монтажных устройств можно составить как вручную, так и в САПР в диалоговом режиме «конструктор—экран». Во всех случаях эти задания следует хранить в базе данных САПР.

Чтобы обеспечить наибольший эффект от автоматизации процессов решения рассмотренных задач, необходимо также автоматизировать процесс оформления конструкторской документации (самый трудоемкий) по результатам решения **задач**. Имеющийся в этом направлении опыт автоматизации, особенно в машиностроении и электротехнике, показывает, что конструкторская документация практически в полном объеме может быть получена в САПР при наличии специальных средств формирования документации.

Анализ и обобщение возможных вариантов постановки задач автоматизированного проектирования ЭЭС показывает следующее.

1. Подавляющее большинство задач автоматизированного проектирования (задачи 2, 3, 4, 6, 7, 8) относится к классу *оптимизационных* задач, решаемых путем генерации множества допустимых вариантов и их сравнительного анализа по целому ряду критериев. **Максимальный** эффект автоматизации решения подобных задач достигается за счет автоматического поиска и выбора наилучших решений, что обеспечивает высокое качество проектных решений, многократное повышение производительности труда, сокращение сроков проектирования, исключение ошибок в расчетах и т. д. Для реализации автоматических процессов поиска необходимо в САПР включить специальные программные средства, учитывающие специфику решаемых задач.

2. Все задачи автоматизированного проектирования могут быть решены в САПР также путем *диалогового конструирования* на электронном кульмане, сохраняя при этом преимущество с логикой ручного способа проектирования. Эффект автоматизации при этом ниже по сравнению с оптимизационными методами решения, но все же достаточен, чтобы заметно повысить качество проектов, производительность труда и разгрузить конструктора от большого объема трудоемких расчетов. Реализация этого подхода к решению задач

требует включения в САПР развитых средств диалога, включая средства машинной графики.

3. Наличие тесных информационных связей между задачами (использование выходных данных предыдущих задач в качестве входных для последующих задач, единой справочно-нормативной базы, технического задания и т. п.) делает целесообразным формирование в САПР *единой базы данных* для решения всех рассмотренных задач. При этом исключается необходимость многократного повторного **ввода—вывода** различных задач. Решение отдельных задач можно осуществлять как в рамках процесса проектирования в целом, так и автономно, пользуясь хранящимися в общей базе данными. Избыточность хранимых данных уменьшается до минимума, что особенно важно для ЭС с громадными массивами данных по электросхемам. Реализация единой базы данных в САПР, в свою очередь, требует построения единой информационной модели ЭС, позволяющей с необходимой степенью детализации структуризовать данные как по системе в целом, так и по всем отдельным частям и узлам.

4. Необходимость построения различных схем ЭС (структурных, принципиальных и соединений) и геометрического моделирования монтажного пространства для большинства задач требует включения в САПР развитых средств *машинной графики*.

5. В процессе последовательного решения задач постепенно накапливается информация об объекте проектирования, которая достигает необходимой полноты лишь после завершения процесса проектирования. Иными словами, результаты решения отдельных задач обладают различными уровнями информационного представления ЭТС. Начальные задачи имеют самые низкие уровни, а конечные задачи — самые высокие. В связи с этим математические модели ЭТС должны существенно перестраиваться от задачи к задаче в сторону их уточнения, а следовательно, и усложнения. Таким образом, реализация процесса проектирования ЭТС в САПР требует построения *системы математических моделей*, учитывающих специфику отдельных задач и алгоритмов решения.

§ 2.3. Общая формулировка задач проектирования ЭТС

Проект ЭТС при заданной конструктивной схеме однозначно и полностью определяется совокупностью большого количества данных: конструктивных (геометрические размеры, обмоточные данные, марки и характеристики материалов и т. п.), физического состояния (напряжения, токи и другие величины в заданных

режимах) и технико-экономического уровня (масса, стоимость, КПД и т. д.).

Проектные данные весьма разнообразны по содержанию, размерности и функциональным свойствам. Так, например, конструктивные данные можно считать неизменными во времени, однако напряжения и токи являются в общем случае периодическими функциями времени. Одни данные (частота вращения, длина и др.) могут изменяться непрерывно, а другие принимают только дискретные значения (числа витков, пазов, **гостированные** размеры и т. п.). Каждой совокупности проектных данных соответствует один вариант проекта. Выбор одного из вариантов с учетом заданных технических требований и условий представляет собой общую задачу проектирования.

Если конструктивная схема ЭТС заранее не известна, то задача проектирования резко усложняется, так как совокупность проектных данных изменяется в зависимости от конструктивного исполнения. В этом случае количество просматриваемых вариантов резко увеличивается из-за необходимости варьирования как проектных данных, так и конструктивной схемы.

Хотя при проектировании многие данные могут принципиально варьироваться, в целом степень их произвольного выбора сильно ограничена техническими требованиями и условиями, входящими в техническое задание, государственными стандартами, отраслевыми нормами и прочими документами. С помощью этой документации некоторые данные определяются сразу и однозначно, например номинальные. Другие ограничиваются по предельно допустимым значениям, например максимальные токи и напряжения. Все проектные данные должны удовлетворять большому количеству взаимных связей в виде геометрических соотношений, физических закономерностей и технико-экономических зависимостей. Эти связи отражаются через расчетные уравнения преобразователя.

Совокупность указанных ограничений на выбор проектных данных приводит к тому, что лишь сравнительно небольшая часть проектных данных может независимо друг от друга варьироваться в определенных пределах. Остальные данные определяются через варьируемые с помощью проектной документации и расчетных уравнений. Области варьирования и фиксированные значения проектных данных выделяют соответствующее множество возможных (допустимых) вариантов проекта, из которых в процессе проектирования необходимо выбрать только один.

Изложенное понимание объекта и процесса проектирования позволяет перейти к общей *математической формулировке* задач проектирования ЭТС.

При этом необходимо абстрагироваться от физического содержания понятий и оперировать только их математическими символами и свойствами. Поступая таким образом, проект можно рассматривать в виде математического объекта или системы, однозначно определяемой заданием определенного числа параметров, под которыми понимаются все проектные данные. Учитывая зависимость некоторых проектных данных от времени, в общем случае проект ЭТС следует представлять в виде динамической многопараметрической системы. Такой подход позволяет для проектирования использовать математический аппарат синтеза многопараметрических динамических систем.

Однако сначала надо составить простые *математические модели*, которые отражают основные физические процессы, протекающие в проектируемых динамических системах. Для этого вспомним, что ЭТС в общем виде представляют собой совокупность различных источников, приемников и преобразователей электромагнитной энергии, для которых главными являются процессы преобразования энергии из одного вида в другой. Такого рода динамические системы, как известно из теоретической электротехники, можно моделировать в виде некоей совокупности катушек индуктивности и конденсаторов, которые могут иметь между собой электрические связи и двигаться друг относительно друга. Эта совокупность физически описывается с помощью законов Максвелла, Ньютона и Ома, а математически — системой дифференциальных уравнений, составленных относительно физических величин. Переменные и коэффициенты дифференциальных уравнений в общем случае зависят от времени. Полное число уравнений всех элементов динамической системы и связей между ними можно рассматривать как ее нормализованную модель. С целью обобщения и компактного представления формализованных моделей ЭТС введем следующие допущения и обозначения.

1. ЭТС относятся к неконсервативным системам, допускающим взаимодействие и обмен энергией с другими неконсервативными системами. Это означает, что ЭТС может подвергаться внешним силовым и энергетическим воздействиям в виде напряжений, токов, механических сил и скоростей движения. В математическом плане отсюда следует, что дифференциальные уравнения динамики ЭТС могут иметь правые части, не равные нулю.

2. Практическая реализуемость ЭТС требует, чтобы все физические величины не могли принимать бесконечное значение. Если

хотя бы одна из них станет равной бесконечности, например ток или напряжение, это означает, что мощность (энергия) ЭТС будет также равна бесконечности. А это невозможно ни в одной реальной системе. С математической точки зрения это значит, что ни одна из переменных формализованной модели ЭТС не может совершать скачок второго рода (разрыв, стремящийся к бесконечности). Для любой переменной допустимым является лишь скачок первого рода (мгновенное изменение конечных значений).

3. Множество переменных формализованной модели можно сократить до минимума, если каждую группу переменных заменить соответствующей вектор-функцией. Тогда общую формализованную модель ЭТС можно представить так:

$$dX/dt = \Phi(X, Y); \quad (2.1)$$

$$F(Z, K) = 0, \quad (2.2)$$

где t — время; $X(t)$ — вектор-функция, координатами которой являются неизвестные или искомые переменные модели, например токи катушек и скорости движения; $Y(t)$ — вектор-функция, координатами которой являются переменные в правой части дифференциальных уравнений, например напряжения катушек и механические силы или моменты вращения; Φ — вектор-функционал, определяемый системой дифференциальных уравнений динамики; Z — вектор, координатами которого являются постоянные во времени параметры модели; K — условный вектор, определяющий конструктивную схему модели (составляющие K являются конструктивными признаками ЭТС); F — вектор-функция, определяемая алгебраическими уравнениями модели и их коэффициентами.

На базе общей модели объекта проектирования, представленной уравнениями (2.1), (2.2), можно перейти к формулировке задачи проектирования ЭТС также в общем виде. При указанных выше допущениях дифференциальные уравнения однозначно решаются, если заданы правые части, коэффициенты и начальные условия, т.е. искомое решение

$$\begin{aligned} X(t) &= X[Y(t), Z, X(0)]; \\ Z &= Z(K), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $X(0)$ — вектор, определяющий начальные условия уравнений динамики, т. е.

$$X(0) = X[i_1(0), \dots, i_M(0), \omega(0)].$$

Обычно $X(0)$ считается заданным исходя из заданных режимов. Таким образом, синтез процессов обобщенной модели, определяемых уравнениями динамики, сводится к выбору K, Z, Y на определенном отрезке времени. Изменение любой из этих векторных величин оказывает управляющее в ту или иную сторону воздействие на решение $X(t)$. Поэтому $Y(t)$ можно называть динамическим, Z — параметрическим, а K — конструктивным векторами управления.

Выбор управляющих векторов надо осуществлять так, чтобы удовлетворить уравнениям обобщенной модели.

Ограничения, накладываемые на проект технической документацией или физическим смыслом проектных данных, разнообразны по содержанию и соответствующей математической форме представления. Они могут иметь конечную, дифференциальную и интегральную формы, записанные в виде равенств или неравенств. В общем случае их можно представить так:

$$H[X(t), Y(t), Z, K] \geq 0, \quad (2.4)$$

где H — вектор-функционал, составляющие которого — отдельные функционалы в виде равенств или неравенств.

С учетом изложенного задачу проектирования обобщенной модели можно сформулировать таким образом: выбрать управляющие векторы K, Z и $Y(t)$, а следовательно, и вектор состояния $X(t)$ так, чтобы одновременно удовлетворялись условия (2.3), (2.4).

Следует отметить, что уравнение (2.4) является наиболее общей формой ограничений, накладываемых на выбор управляющих векторов.

Если бы все ограничения выражались строгими равенствами, имеющими единственное решение, а их суммарное количество равнялось числу неизвестных, то задача проектирования решалась бы однозначно путем совместного решения всех равенств. Опыт проектирования ЭТС показывает, что задача проектирования не решается однозначно. Количество ограничений, как правило, меньше размерности задачи, а многие ограничения задаются в виде неравенств. Поэтому правильнее считать, что условия (2.1)—(2.4) выделяют в пространстве векторов обобщенной модели замкнутые допустимые области, внутри которых находятся искомые решения, т. е.

$$X(t) \in D_x, Y(t) \in D_y, Z \in D_z, K \in D_k, \quad (2.5)$$

где D — замкнутое множество векторов.

Вместо допустимого множества векторов можно рассматривать допустимые множества точек D_x, D_y, D_z, D_k в пространстве координат соответствующих векторов. Если хотя бы одно из этих мно-

ЖЕСТВ пустое, то задача синтеза вообще неразрешима, так как уравнения обобщенной модели имеют тривиальные решения. В нетривиальных случаях существует множество решений, удовлетворяющих условиям (2.5), за исключением единственного случая, когда все допустимые множества D_x, D_y, D_z, D_k преобразуются одновременно в точки. Множество возможных решений позволяет в принципе выбрать любое из них. Таким образом, в **общем** случае задача проектирования решается неоднозначно.

Для исключения неоднозначности решений в процесс синтеза вводится идея целенаправленности. Это означает, что из множества допустимых вариантов решения следует выбрать только один или несколько равнозначных, наилучших (оптимальных) в том или ином смысле. Превосходство этого варианта над всеми остальными определяется количественной оценкой наиболее важного показателя качества, называемого *критерием оптимальности*. Последний должен принимать максимально (минимально) возможное значение в оптимальных вариантах проекта.

В качестве критерия оптимальности обычно рассматривается **обобщенный** показатель качества, например суммарная стоимость с учетом затрат на производство и эксплуатацию и т. п. Критерий оптимальности по аналогии с другими показателями проекта определяется через проектные данные. Поэтому в общем случае его также можно представить функционалом типа

$$H_0[X(t), Y(t), Z, K], \quad (2.6)$$

который часто называется *целевым функционалом*.

Введение целевого функционала преобразует рассмотренную выше задачу проектирования в так называемую *задачу оптимального проектирования*, которая получает следующую формулировку (назовем ее **задачей А**):

- максимизировать (минимизировать) функционал $H_0[X(t), Y(t), Z, K]$ по аргументам $Y(t), Z, K$ так, чтобы удовлетворить условиям

$$X(t) \in D_x, Y \in D_y, Z \in D_z, K \in D_k.$$

Надо отметить, что в практике проектирования часто возникают многокритериальные задачи, т. е. превосходство оптимального варианта определяется не по одному критерию, а по нескольким критериям одновременно. В этом случае вводится понятие целевого вектор-функционала H_0 , составляющими которого являются функционалы типа (2.6), характеризующие отдельные критерии. Однако в [12] показано, что постановка многокритериальной задачи оптимизации эквивалентна задаче с одним критерием при наличии

неопределенных факторов, т. е. задаче А, в которой недоопределены некоторые параметры или функции. Поэтому особенности многокритериальных задач не рассматриваются в данной главе, в которой приводятся общие математические формулировки.

§ 2.4. Декомпозиция общей задачи

Задача оптимального проектирования, сформулированная выше, относится к наиболее общим и сложным типам вариационных задач, которые рассматриваются в теории оптимальных процессов. Это обусловлено тем, что часть аргументов целевого функционала зависит от времени, а другая часть неизменна во времени. Обычно для решения подобных задач предлагается исходную формулировку преобразовать к формулировке «чистых» вариационных задач, у которых все аргументы являются функциями времени. Для этого необходимо векторы Z и K рассматривать в качестве новых векторов-функций времени, производные которых по времени тождественно равны нулю. Это увеличивает размерность и объем задачи и создает дополнительные трудности для применения вариационных методов решения.

Другой подход можно предложить с помощью последовательных приближений к оптимальному решению задачи А, когда процесс оптимизации осуществляется поэтапно. Количество этапов и их последовательность выбираются в соответствии со структурной схемой решения уравнения обобщенной модели. На первом этапе оптимизируется выбор K, на втором — выбор Z, на третьем — выбор Y(t).

Исходя из указанной предпосылки представим целевой функционал в виде

$$H_0 = H_0^0 + \Delta H_0 \quad (2.7)$$

где H_0^0 — произвольное значение H_0 , которое принимается в качестве нулевого приближения к решению задачи А; ΔH_0 — приращение значения H_0 , которое получается в результате последовательных приближений к решению задачи А.

Аналогичным образом можно представить независимые аргументы целевого функционала, а именно:

$$K = K^0 + \Delta K; \quad (2.8)$$

$$Z = Z^0 + \Delta Z; \quad (2.9)$$

$$Y = Y^0 + \Delta Y. \quad (2.10)$$

Тогда, исключая из рассмотрения зависимый аргумент $\mathbf{X}(t)$, получаем

$$\Delta H_0 = H_0(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0 + \Delta\mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0 + \Delta\mathbf{Y}) - H_0(\mathbf{K}^0, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0). \quad (2.11)$$

С учетом (2.11) задачу А можно сформулировать в терминах приращений, не изменяя ее содержания:

- максимизировать (минимизировать) функционал

$$\Delta H_0(\mathbf{K}^0, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0, \Delta\mathbf{K}, \Delta\mathbf{Z}, \Delta\mathbf{Y})$$

при условии, что $\mathbf{K} \in \mathbf{D}_k, \mathbf{Z} \in \mathbf{D}_z, \mathbf{Y} \in \mathbf{D}_y, \mathbf{X} \in \mathbf{D}_x$.

Назовем эту формулировку задачей A_Δ . Если начальное решение считать фиксированным, т. е. $\mathbf{K}^0, \mathbf{Z}^0$ и \mathbf{Y}^0 заданными, то решение задачи A_Δ будет целиком определяться приращениями $\Delta\mathbf{K}, \Delta\mathbf{Z}, \Delta\mathbf{Y}$.

Так как последние выбираются поэтапно, то на первом этапе

$$\Delta H_{01} = \Delta H_0(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0), \quad (2.12)$$

на втором этапе

$$\Delta H_{02} = \Delta H_0(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0 + \Delta\mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0) \quad (2.13)$$

и на третьем этапе

$$\Delta H_{03} = \Delta H_0(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0 + \Delta\mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0 + \Delta\mathbf{Y}). \quad (2.14)$$

Полное приращение целевой функции

$$\Delta H_0 = \Delta H_{01} + \Delta H_{02} + \Delta H_{03}. \quad (2.15)$$

Векто
этапо
ния з
уравн

$$\max_{\Delta\mathbf{K}} \Delta H_0 = f(\mathbf{K}^0, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0) = \max_{\Delta\mathbf{K}} \{ \Delta H_{01}(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0) + \max_{\Delta\mathbf{Z}} [\Delta H_{02}(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0 + \Delta\mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0) + \max_{\Delta\mathbf{Y}} \Delta H_{03}(\mathbf{K}^0 + \Delta\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0 + \Delta\mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0 + \Delta\mathbf{Y})] \}, \quad (2.16)$$

где f — оптимальное значение функционала.

Уравнение (2.16) относится к классу специальных рекуррентных функциональных уравнений, предложенных Р. Беллманом и являющихся центральными в теории динамического программирования

[13]. Это уравнение можно разложить на три взаимосвязанных функциональных уравнения, если последовательно учитывать этапы решения, начиная с конца. Оптимизация ΔH_{03} осуществляется на последнем этапе и представляет собой одноэтапный процесс, который для любых результатов предыдущих этапов описывается функциональным уравнением¹

$$f_1(\mathbf{K}, \mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0) = \max_{\Delta \mathbf{Y}} \Delta H_{03}(\mathbf{K}, \mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0 + \Delta \mathbf{Y}). \quad (2.17)$$

Оптимизация суммы $\Delta H_{02} + \Delta H_{03}$ осуществляется совместно на двух последних этапах и представляет собой двухэтапный процесс, который для любого результата первого этапа описывается функциональным уравнением

$$f_2(\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0) = \max_{\Delta \mathbf{Z}} [\Delta H_{02}(\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0 + \Delta \mathbf{Z}, \mathbf{Y}) + f_1(\mathbf{K}, \mathbf{Z}, \mathbf{Y}^0)]. \quad (2.18)$$

Оптимизация суммы $\Delta H_{01} + \Delta H_{02} + \Delta H_{03}$ осуществляется совместно на всех трех этапах и представляет собой трехэтапный процесс, который для любого начального решения описывается уравнением

$$f_3(\mathbf{K}^0, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0) = \max_{\Delta \mathbf{K}} [\Delta H_{01}(\mathbf{K}^0 + \Delta \mathbf{K}, \mathbf{Z}, \mathbf{Y}) + f_2(\mathbf{K}, \mathbf{Z}^0, \mathbf{Y}^0)]. \quad (2.19)$$

Система уравнений (2.17)—(2.19) является другой формой записи уравнения (2.16) и показывает, что исходная задача \mathbf{A}_Δ может быть разбита на семейство подзадач, число которых равно числу этапов решения. Каждая подзадача требует оптимизации только одного управляющего вектора и более проста по сравнению с исходной. Взаимосвязь подзадач показана структурной схемой, приведенной на рис. 2.1.

Подзадача, соответствующая уравнению (2.17), требует оптимизации динамических процессов за счет выбора $\mathbf{Y}(t)$ при фиксированных коэффициентах и начальных условиях уравнений динамики. В этом случае общая задача \mathbf{A} оптимального проектирования преобразуется в классическую вариационную задачу с закрепленными концами (назовем ее задачей \mathbf{B}), а именно:

- максимизировать (минимизировать) функционал $H_0[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)]$ по аргументу $\mathbf{Y}(t)$ так, чтобы удовлетворить условиям $\mathbf{X} \in \mathbf{D}_x, \mathbf{Y} \in \mathbf{D}_y$, в которых множества $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y$ образуются выражениями типа

$$d\mathbf{X}/dt = \Phi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0.$$

¹ Индекс при f определяет число этапов процесса решения.

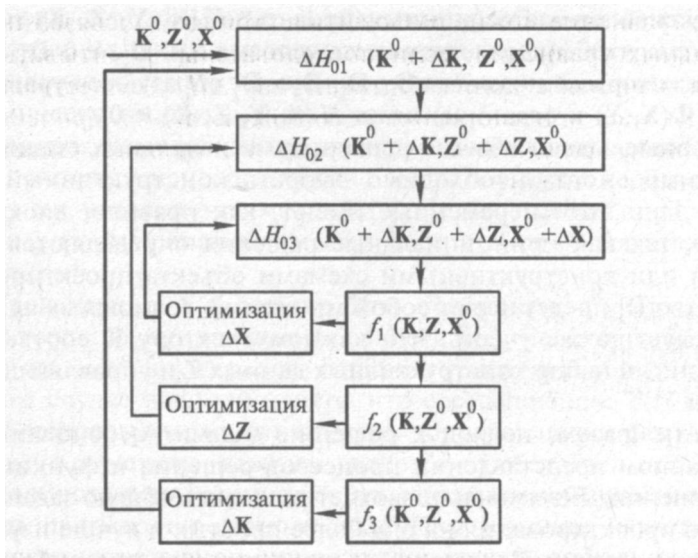


Рис. 2.1. Структура взаимосвязанных задач оптимизации ЭМП

Такого типа задачи обычно решаются при разработке автоматических регуляторов для выяснения оптимальных законов управления.

Подзадача, соответствующая (2.18), сводится к оптимизации постоянных во времени параметров объекта проектирования при фиксированных принципиальном техническом решении и оптимальных законах управления динамическими процессами. В этом случае исходная задача преобразуется в задачу оптимизации функции многих переменных (задача В):

- максимизировать (минимизировать) $H^0(X, Y, Z)$ по аргументу Z так, чтобы удовлетворялись условия $X \in D_x, Y \in D_y, Z \in D_z$, в которых множества D_x, D_y, D_z образуются выражениями типа

$$dX/dt = \Phi(X, Y), H(X, Y, Z) \geq 0.$$

Такие задачи возникают обычно при оптимизации конструктивных размеров и параметров, которые могут изменяться как непрерывно, так и дискретно.

Подзадача, соответствующая (2.19), сводится к оптимизации принципиальных технических решений в предположении, что для каждого решения фиксированы оптимальные параметры и законы управления динамическими процессами. В этом случае исходная задача преобразуется в задачу оптимизации функции многих переменных (задача Г):

• максимизировать (минимизировать) $No(X, Y, Z, K)$ по аргументу K так, чтобы удовлетворялись условия $X \in D_x, Y \in D_y, Z \in D_z, K \in D_k$, в которых множества D_x, D_y, D_z и D_k образуются уравнением $dX/dt = \Phi(X, Y)$ и ограничениями $(X, Y, Z, K) \geq 0$.

Подобные задачи обычно решаются на начальных стадиях проектирования, когда необходимо выбрать конструктивный облик объекта. При этом переменные имеют, как правило, дискретный характер, так как принципиальные решения определяются структурными или конструктивными схемами объекта проектирования. Множество D_k представляет собой множество возможных альтернатив. Следует также учесть, что каждому вектору K соответствует определенный набор конструктивных данных Z и управляющих воздействий Y .

Таким образом, подход к решению задачи A , основанный на многоэтапном представлении процессов решения и функциональных уравнениях Беллмана, позволяет разделить общую задачу оптимального проектирования на ряд более простых и лучше изученных задач оптимизации. Последние по существу сводятся либо к оптимизации функционалов, зависящих от времени (задача B), либо к оптимизации функций многих переменных (задачи B и Γ). Решая каждую из этих задач в отдельности и объединяя решения по принципу динамического программирования, можно получить решение общей задачи A .

§ 2.5. Приведение к задачам математического программирования

Задача B представлена в форме общих задач вариационного исчисления. В зависимости от вида функционала No и компонентов вектор-функционала N задачи вариационного исчисления имеют различные формы и различные методы решения [14]. Выбор той или иной формы задачи во всех случаях обусловлен удобством и эффективностью решения. Методы решения вариационных задач делятся на две большие группы: аналитические и прямые (численные).

Анализ различных *аналитических методов* решения вариационных задач показывает, что применительно к задачам проектирования ЭТС следует использовать наиболее усложненные методы в виде принципов максимума и динамического программирования. В обоих случаях, как правило, необходимы ЭВМ и элементы поиска решений. Неизбежность численных решений с применением ЭВМ приводит к тому, что в инженерном плане прямые методы решения

оказываются нередко более конкурентоспособными, тем более что для реализации прямых методов с помощью ЭВМ не требуются дополнительные математические конструкции принципов максимума и динамического программирования.

К *прямым методам* вариационного исчисления относятся все методы, которые непосредственно не используют необходимые и достаточные условия оптимальности. Прямые методы основаны на различных формах аппроксимации $\mathbf{Y}(t)$ некоторой заданной системой функций.

Аппроксимация $\mathbf{Y}(t)$ должна быть обоснована с учетом различных факторов: функциональных свойств $\mathbf{Y}(t)$, необходимой точности решения, методов и средств решения уравнений динамики и т. П. В данном случае надо учитывать, что составляющие $\mathbf{Y}(t)$ являются кусочно-непрерывными функциями, допускающими разрывы первого рода. Кроме того, важным является то обстоятельство, что задачи подобного рода, возникающие в инженерной практике, решаются, как правило, с помощью ЭВМ. При этом, как известно, дифференциальные уравнения аппроксимируются разностными схемами.

Исходя из указанных особенностей динамических задач в простейшем случае для аппроксимации $\mathbf{Y}(t)$ можно предложить кусочно-постоянную функцию времени, получаемую следующим образом. Пусть численное интегрирование уравнений динамики осуществляется с постоянным шагом Δt . На произвольном интервале времени $[n\Delta t, (n+1)\Delta t]$ управление $\mathbf{Y}(t)$ постоянно и равно вектору \mathbf{Y}_n . Тогда уравнение динамики можно заменить простейшей разностной схемой в виде

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n + \Delta t \Phi(\mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_n). \quad (2.20)$$

Пусть для определенности и простоты кроме уравнений динамики другие ограничения на решение задачи отсутствуют, а целевой функционал имеет интегральную форму

$$H_0 = \int_0^t \mathbf{h}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) dt, \quad (2.21)$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})^0$ — производная H_0 по времени.

Тогда в соответствии с разностной схемой (2.20) интеграл (2.21) заменится суммой

$$H_0 = \Delta t \sum_{n=0}^{m-1} \mathbf{h}(\mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_n), \quad (2.22)$$

где m — количество шагов Δt , укладываемых на интервале $[0, t]$, т. е.

$$t = m\Delta t.$$

Если предположить, что вектор начального состояния $X(0)$ задан, т. е. решается задача В, то с помощью уравнения (2.20) из выражения (2.22) можно последовательно исключить векторы X_n . Действительно, при $X(0) = X^0$ имеем

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_0 + \Delta t \Phi(X_0, Y_0) = X_1(Y_0); \\ X_2 &= X_1 + \Delta t \Phi[X_1(Y_0), Y_1] = X_2(Y_0, (Y_1)); \\ &\dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Подставляя выражения (2.24) в (2.23), получаем целевой функционал в виде

$$H_0 = \Delta t \sum_{n=0}^{m-1} h_n(Y_0, \dots, Y_n) = H_0(Y_0, \dots, Y_{m-1}). \quad (2.25)$$

Если вектор X_0 не фиксирован, то аналогичным образом можно показать, что

$$H_0 = H_0(X_0, Y_0, \dots, Y_{m-1}). \quad (2.26)$$

Полученные выражения (2.25) или (2.26) показывают, что целевой функционал преобразовался в функцию конечного числа постоянных векторов, т. е. динамическая задача оптимизации приняла форму статических задач. Однако в отличие от задач оптимизации типа В и Г рассмотренные конечномерные аналоги динамических задач имеют следующую важную особенность. Вектор-функции вида (2.25) и (2.26) зависят от выбора векторов X_0, Y_0, \dots, Y_{m-1} , которые во времени включаются последовательно через интервал Δt . Такие функции называют *функциями с последовательным включением аргументов* [15]. Эта особенность, как показано ниже, позволяет строить специальные эффективные алгоритмы решения на ЭВМ.

Таким образом, с помощью замены динамического вектора управления $Y(t)$ дискретным аналогом в виде конечного набора векторов Y_0, Y_n, \dots и разностных схем типа (2.20) динамические задачи оптимизации всегда можно приближенно эквивалентировать статическими задачами. Поэтому их форма является основной для задач оптимизации, решаемых при машинном проектировании ЭТС.

Математическое описание задач типа В и Г в общем случае включает уравнения динамики и возможные дифференциально-интегральные выражения функционалов цели и ограничений. Однако с учетом (2.25) и (2.26) замена дифференциальных уравнений и ин-

тегралов их дискретными аналогами не обязательна. Достаточно дать аппроксимацию лишь вектор-функции $\mathbf{Y}(t)$ и исключить из рассмотрения управляющие переменные, зависящие от времени.

Таким образом, применяя ту или иную аппроксимацию $\mathbf{Y}(t)$, можно функционалы цели и ограничений преобразовать в функции многих переменных. Общее число переменных возрастет за счет добавления параметров, необходимых для аппроксимации временных функций. В этом случае математическое описание задач в конечной форме при переходе от векторов к скалярным составляющим принимает следующий вид (назовем ее задачей Д):

• максимизировать (минимизировать) функцию $H_0(z_1, \dots, z_p)$ по всем параметрам z_1, \dots, z_p так, чтобы удовлетворить условию $Z(z_1, \dots, z_p) \in D_z$, в котором множество D_z образуется выражениями типа

$$H_j(z_1, \dots, z_p) \geq 0, j = 1, \dots, m.$$

В такой формулировке переменными задачами z_n ($n = 1, \dots, p$) наряду с конструктивными данными и параметрами являются также параметры аппроксимации временных функций (токов, напряжений и др.). Функции цели H_0 и ограничений H_j определяются в многомерном пространстве полного числа переменных. Совокупность ограничений H_j образует в этом пространстве допустимую область (допустимое множество точек) D_z . Любое решение задачи представляется точкой многомерного пространства Z с координатами z_1, \dots, z_p , которая должна принадлежать множеству D_z .

Формулировка задачи Д относится к классу наиболее общих задач математического программирования, которые, как правило, решаются с помощью ЭВМ. С учетом нелинейного характера уравнений обобщенной модели задачу Д в общем случае можно отнести к классу задач нелинейного программирования. Последние в предположении непустого множества D_z и ограниченности, непрерывности функций H_0 и H_j по всем параметрам z_1, \dots, z_p обязательно имеют хотя бы одно оптимальное решение.

Под оптимальным решением задачи понимается одна или некоторое множество точек типа Z^* , принадлежащих множеству D_z для которых в случае максимизации выполняется условие

$$H_0(Z^*) \geq H_0(Z) \text{ для любой } Z \in D_z. \quad (2.27)$$

В точках типа Z^* достигается абсолютный максимум H_0 на множестве D_z . Изменяя направление неравенства в условии (2.27), можно получить определение абсолютного минимума. Часто вместо термина «абсолютный» используется термин «глобальный».

Таким образом, *абсолютным, или глобальным, максимумом* называется значение ϕ_0 , больше которого оно не достигается ни в одной точке D_z .

Кроме абсолютных максимумов (минимумов) функция ϕ_0 может иметь относительные оптимумы. Понятие об относительном максимуме можно получить из определения абсолютного максимума, если условие (2.27) рассматривать для нового множества точек ϕ_0 , которые образуют малую окрестность точки Z^* и принадлежат множеству D_z , т. е. D^0_z является подмножеством D^z . Аналогичным путем можно объяснить понятие относительного минимума. Относительный максимум (минимум) часто называется также *локальным*.

Если допустимое множество D включает все точки **-мерного** пространства, ..., z_p , т. е. отсутствуют ограничения, то абсолютные и относительные максимумы и минимумы являются безусловными. В подобных случаях максимумы и минимумы называются также *экстремумами*. Если же имеются ограничения H_j что обычно соответствует практическим задачам проектирования, то максимумы и минимумы могут быть условными. Условность заключается в том, что множества D_z или D^0_z могут не включать все точки даже малой окрестности z .

Действительно, при наличии ограничений в виде равенств решение задачи D следует искать только среди точек, принадлежащих линиям, образованным этими равенствами. Ограничения в виде неравенств соответственно выделяют допустимую область, точки вне которой не могут рассматриваться. Таким образом, ограничения H_j стесняют, деформируют множества D_z или D^0_z , на которых определяются максимумы (минимумы) функции ϕ_0 . Поэтому условные оптимальные решения могут не совпадать с безусловными.

Разновидности максимумов (минимумов) показывают, что во всех случаях для решения задачи D требуется найти, по крайней мере, один абсолютный максимум (минимум): их количество зависит от строгости выполнения условия (2.27). Если неравенство строгое, то абсолютный оптимум находится в единственном числе. Если же условие (2.27) допускает также возможность равенства, то количество абсолютных оптимумов может быть больше единицы.

Единственность решения задачи D может быть доказана только при наличии дополнительной информации о свойствах функций ϕ_0 и H^f . Например, если H_j образует выпуклое множество D^z , то в случае выпуклости функции ϕ_0 относительный минимум совпадает с абсолютным. Если же функция ϕ_0 вогнута, то относительный максимум совпадает с абсолютным. При этом абсолютные оптимумы

будут единственными, если выпуклость (вогнутость) строгая (задачи выпуклого программирования)¹.

Численное решение задачи Д осуществляется методами математического программирования. Применительно к проектированию ЭТС наибольшее применение получили методы дискретного, нелинейного и динамического программирования.

Для представления задачи Д в терминах динамического программирования по аналогии с принятым в § 2.4 подходом разложим параметры оптимизации и целевую функцию на составляющие типа:

$$z_n = z_{n0} + \Delta z_n, \quad n = 1, \dots, p; \quad (2.28)$$

$$H_0 = H_0^0 + \Delta H_0, \quad (2.29)$$

где z_{n0} — координата начальной точки $z_0 \in D_z$; Δz_n — приращение параметра оптимизации в процессе поиска; H_0^0 — значение H_0 в точке Z_0 , т. е. $H_0(Z_0)$.

$$\Delta H_0 = H_0(z_{10} + \Delta z_1, \dots, z_{p0} + \Delta z_p) - H_0(z_{10}, \dots, z_{p0}). \quad (2.30)$$

С помощью (2.28)—(2.30) исходную задачу Д можно сформулировать в терминах приращений (назовем ее **задачей Д_Δ**):

♦ максимизировать (минимизировать) функцию $\Delta H_0(z_{10}, \dots, z_{p0}, \Delta z_1, \dots, \Delta z_p)$ при условии, что

$$Z(z_{10} + \Delta z_1, \dots, z_{p0} + \Delta z_p) \in D_z.$$

Если начальная точка $Z_0(z_{10}, \dots, z_{p0})$ фиксирована, то переменные задачи Д_Δ являются лишь приращения $\Delta z_1, \dots, \Delta z_p$.

Для многоэтапной трактовки процесса решения задачи Д допустим, что поиск оптимальных значений Δz_n ведется в определенной и неизменной последовательности, например сначала Δz_1 , затем Δz_2 и так до Δz_p . Исходя из этого получаем последовательность точек

$$Z_n = Z_n(Z_{n-1}, \Delta z_n), \quad n = 1, \dots, p, \quad (2.31)$$

которой соответствует последовательность приращений

$$\Delta H_{0n} = \Delta H_{0n}(Z_{n-1}, \Delta z_n), \quad n = 1, \dots, p. \quad (2.32)$$

¹ Множество точек называется выпуклым, если отрезок, соединяющий любые две точки множества, также принадлежит данному множеству. Функция многих переменных, заданная на выпуклом множестве, называется **выпуклой**, если отрезок, соединяющий любые две точки, лежит на ее гиперповерхности или выше. Если отрезок находится на гиперповерхности или ниже ее, то функция будет **вогнутой**.

С учетом последовательностей (2.31) и (2.32) рассматривается сумма

$$\Delta H_{\Sigma} = \sum_{n=1}^p \Delta H_{0n}(Z_{n-1}, \Delta z_n). \quad (2.33)$$

Если функция H_0 , а следовательно, и ее приращения непрерывны по параметрам оптимизации и ограничены по значению на замкнутом множестве D_z , то в случае аддитивности H_0 имеем

$$\Delta H_{\Sigma} = \Delta H_0. \quad (2.34)$$

Если же нет аддитивности, то

$$\Delta H_{\Sigma} = \Delta \tilde{H}_0 = H_0(z_{10} + \Delta \tilde{z}_1, \dots, z_{p0} + \Delta \tilde{z}_p) - H_0(z_{10}, \dots, z_{p0}), \quad (2.35)$$

где $\Delta \tilde{z}_n$ — приращения, которые могут быть и не равны соответствующим Δz_n .

Однако неравенство Δz_n и $\Delta \tilde{z}_n$ в процессе поиска не имеет значения, так как в точке оптимума

$$\Delta H_{\Sigma} = \Delta H_0 = \Delta \tilde{H}_0 \quad \text{и} \quad \Delta \tilde{z}_n = \Delta z_n \quad \text{для всех } n = 1, \dots, p.$$

Поэтому решение задачи Д можно свести к оптимизации функции (2.33) на множестве D_z . Тогда для случая максимизации

$$\begin{aligned} \max \Delta H_0 = f(Z_0) = \max_{\Delta z_1} \max_{\Delta z_p} [\Delta H_{01}(Z_0, \Delta z_1) + \dots + \Delta H_{0p}(Z_{p-1}, \Delta z_p)] \\ \text{при } Z \in D_z. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Так как ΔH_{01} не зависит от $\Delta z_2, \dots, \Delta z_p$, а $\Delta H_{02}, \dots, \Delta H_{0p}$, наоборот, зависят от Δz_1 , то выражение (2.36) можно представить в виде

$$\begin{aligned} f(Z_0) = \max_{\Delta z_1} \{ \Delta H_{01}(Z_0, \Delta z_1) + \max_{\Delta z_2} \max_{\Delta z_p} [\Delta H_{02}(Z_1, \Delta z_2) + \dots + \\ + \Delta H_{0p}(Z_{p-1}, \Delta z_p)] \} \text{ при } Z \in D_z. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Максимальное приращение $f(Z_0)$ получается в результате p -этапного процесса поиска, где на каждом этапе оптимизируется соответствующее значение Δz_p . Соответственно вторая составляющая в фигурных скобках (2.37) представляет собой результат $(p - 1)$ -этапного процесса поиска, в котором оптимизируются значения $\Delta z_2, \dots, \Delta z_p$. Учитывая это, а также зависимость (2.31), выражение (2.37) можно привести к виду

$$f_p(Z_0) = \max_{\Delta z_1} \{ \Delta H_{01}(Z_0, \Delta z_1) + f_{p-1}[Z_1(Z_0, \Delta z_1)] \} \text{ при } Z \in D_z. \quad (2.38)$$

Полученное выражение относится к классу функциональных уравнений Беллмана. Его решение является одновременно решением задачи D_Δ или, что то же самое, задачи D . Таким образом, задача D получена при достаточно слабых предположениях относительно H_0 и Dz ,

§ 2.6. Методы линейного и нелинейного программирования

Методы линейного программирования. Методы линейного программирования предназначены для решения специального подкласса задач типа D , в котором целевые функции и функции ограничений линейно связаны с параметрами оптимизации [16]. Типичную задачу линейного программирования для случая максимизации целевой функции можно сформулировать так (назовем ее задачей E):

- максимизировать функцию $\sum_{n=1}^p a_n z_n$ по всем параметрам z_1, \dots, z_p

так, чтобы удовлетворить условиям $\sum_{n=1}^p b_{jn} z_n \leq c_j, j = 1, \dots, m; z_n \geq 0, n = 1, \dots, p.$

В задаче E форма ограничений $\sum_{n=1}^p b_{jn} z_n$ отлична от соответствующей формы задачи D ($H_j \geq 0$). Однако это отличие формальное, а не по существу. Путем переноса c_j из правой части в левую можно получить вид $\sum_{n=1}^p b_{jn} z_n - c_j \leq 0$. Неравенства типа $H_j \geq 0$ умножением на (-1) также приводятся к виду $(-H_j) \leq 0$. Любое строгое неравенство $H_j = 0$ можно также представить двумя неравенствами и $H_j \geq 0$.

Для каждой задачи E можно сформулировать следующую двойственную задачу:

- минимизировать функцию $\sum_{j=1}^m c_j \tilde{z}_j$ по всем параметрам $\tilde{z}_1, \dots, \tilde{z}_m$

так, чтобы удовлетворить условиям

$$\sum_{j=1}^m \tilde{z}_j b_{jn} \geq a_n, n = 1, \dots, p; \tilde{z}_j \geq 0, j = 1, \dots, m.$$

Двойственная задача имеет ряд особенностей по сравнению с исходной, называемой *прямой*. Если *прямая задача* требует макси-

мизации целевой функции, то двойственная задача является задачей минимизации, и наоборот. Коэффициенты целевой функции прямой задачи a_1, \dots, a_m становятся правыми частями ограничений двойственной задачи, а правые части ограничений прямой задачи c_1, \dots, c_m — коэффициентами целевой функции двойственной задачи.

Матрица коэффициентов функций ограничений двойственной задачи получается путем транспонирования соответствующей матрицы прямой задачи. Число ограничений двойственной задачи равно числу переменных прямой задачи, а число переменных двойственной задачи — числу ограничений прямой. Знаки неравенств в ограничениях двойственной задачи изменяются на обратные по сравнению с прямой задачей. Указанные особенности позволяют формализовать процесс построения двойственной задачи при заданной прямой и наоборот.

Геометрическую интерпретацию задачи Е рассмотрим для случая трех переменных, когда максимизируется функция

$$H_0 = a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3. \quad (2.39)$$

С помощью (2.39) можно осуществить замену переменной

$$z_3 = (1/a_3) (H_0 - a_1 z_1 - a_2 z_2) \quad (2.40)$$

и подставить выражение (2.40) в ограничения задачи, которые после этого примут **ВИД**

$$b'_{j1} z_1 + b'_{j2} z_2 + b'_{j3} H_0 \leq c_j, \quad j = 1, \dots, m; \quad (2.41)$$

$$z_1 \geq 0; \quad z_2 \geq 0; \quad z_3 \geq 0. \quad (2.42)$$

Посредством замены переменной z_3 задачу максимизации H_0 можно интерпретировать в пространстве ортогональных осей z_1, z_2 и H_0 (рис. 2.2, **а**). В этом пространстве условия (2.41) и (2.42) выделяют полупространства, ограниченные плоскостями, для которых со-

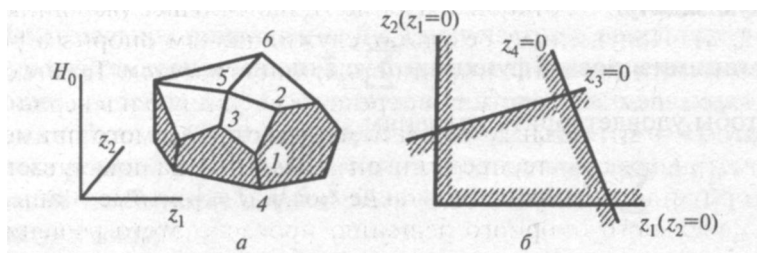


Рис. 2.2. Схема интерпретации задачи линейного программирования

ОТВЕТСТВУЮЩИЕ неравенства становятся строгими равенствами. Область, состоящая из множества точек, одновременно удовлетворяющих всем ограничениям задачи, образуется путем пересечения указанных полупространств. Если эта область пустая, то задача не имеет решения (ограничения не совместимы). Если область непустая, то она обязательно должна быть выпуклой и принимать форму многоугольника, линейного отрезка или точки. На рис. 2.2, *a* приводится пример выпуклого многоугольника.

Как показано на рис. 2.2, *a*, решением задачи в данном примере является самая высокая точка многоугольника *b*. Она может находиться только в вершине и тогда является единственной. Если она находится на грани или ребре, решение задачи не единственно. Однако во всех случаях, по крайней мере, одна самая высокая точка совпадает с одной из вершин треугольника. Таким образом, для решения задачи необходимо выбрать ту вершину, в которой функция H_0 достигает максимума.

Любая вершина многоугольника образуется путем пересечения соседних граней, которые, в свою очередь, принадлежат плоскостям; для этих плоскостей ограничения типа (2.41) выполняются в форме равенств. Поэтому для анализа вершин без ограничения общности ограничения в форме неравенств типа (2.41) можно представлять строгими равенствами. Форма задачи *E* с функциональными ограничениями в виде равенств и неотрицательными переменными называется *канонической* и является основной для методов ее решения.

Наиболее универсальным из этих методов является так называемый *симплекс-метод*. Идея симплекс-метода достаточно проста и легко понятна из рис. 2.2, *a*. Вначале определяется произвольная вершина многоугольника (допустим *1*), которая служит начальным, или опорным, решением задачи. Затем проверяются и сравниваются все соседние вершины (*2*, *3*, *4*). Если значение z_0 в вершине *1* больше, чем в соседних вершинах, то точка *1* является оптимальным решением задачи. Если нет, то осуществляется переход в ту из соседних вершин, в которой значение z_0 наибольшее (вершина *2* на рис. 2.2, *a*). Полученный результат служит новым опорным решением, для которого изложенный порядок повторяется. Таким образом, из вершины *2* совершается переход в вершину *5* и в вершину *6*, являющуюся оптимальным решением рассматриваемого примера.

Геометрическая интерпретация симплекс-метода показывает, что его алгоритм должен включать такие последовательные этапы, как выбор начального опорного решения, проверка этого решения на оптимальность и переход к другому, не худшему опорному решению в случае неоптимальности предыдущего. В силу конечного числа

опорных решений (вершин многоугольника) оптимальное решение находят через конечное число рабочих циклов (шагов) алгоритма.

Начальное опорное решение выбирают путем совместного анализа ограничений задачи Е. Последняя представляется в канонической форме, так как любая вершина **p -мерного** многоугольника определяется точкой пересечения, по крайней мере, p гиперплоскостей. При этом может быть несколько случаев. Рассмотрим сначала случай, когда $m = p$ и все уравнения ограничений задачи Е линейно независимы, т. е.

$$b_{j1}z_1 + b_{j2}z_2 + \dots + b_{jp}z_p = c_j, \quad j = 1, \dots, m. \quad (2.43)$$

Система (2.43) имеет единственное решение при условии неравенства нулю ее определителя, что выполняется во всех нетривиальных случаях. Если в этом решении хотя бы одна из величин z_1, \dots, z_p отрицательна, то это значит, что условия задачи Е не удовлетворяются и она не имеет решения. Если все z_1, \dots, z_p неотрицательны, то найденное решение является допустимым. Одновременно оно является и оптимальным решением задачи Е, так как система (2.43) не имеет других решений.

Если число ограничений-равенств больше числа переменных задачи ($m > p$), то в этом случае можно выполнять следующее. Отбрасывая любые $(m - p)$ уравнений, получаем предыдущий случай с единственным решением. Если оно окажется допустимым, то следует его подставить в исключенные $(m - p)$ уравнения. При удовлетворении последних найденное допустимое решение является одновременно оптимальным. В противном случае ограничения равенства несовместимы и применяются специальные приемы, сводящиеся либо к приближенному удовлетворению исключенных уравнений, либо к замене их неравенствами.

Если $m < p$, то система (2.43) имеет бесчисленное множество решений. При этом переменные делятся на $(p - m)$ свободных (независимых) и m базисных (зависимых). Свободные переменные могут принимать любые неотрицательные значения (по условиям задачи), а базисные однозначно определяются через свободные путем решения системы (2.43). Для выбора одного из возможных решений система (2.43) дополняется $(p - m)$ уравнениями типа

$$z_n = 0, \quad n = 1, \dots, p - m. \quad (2.44)$$

Выбор нулевых значений свободных переменных поясним на следующем примере. Допустим, что $p - m = 2$ и в качестве свободных приняты переменные z_1 и z_2 , откладываемые по положитель-

нейные задачи удается аппроксимировать линейными. Во-вторых, линейные программы могут быть составными частями других алгоритмов и методов, предназначенных для решения нелинейных задач.

Методы нелинейного программирования при отсутствии ограничений. Общая задача, решаемая в данном случае, представляет частный случай задачи Д, когда ограничения H отсутствуют, а допустимое множество точек D совпадает с полным множеством точек p -мерного пространства параметров $z^1 \dots Z^p$ в котором определяется целевая функция ϕ , т. е. когда минимумы (максимумы) являются безусловными и совпадают с экстремумами.

Для решения этого подкласса задач разработано большое количество методов, которые объединены одной общей идеей. Оптимальное решение находится в результате многошагового процесса поиска (движения) в пространстве параметров оптимизации. На каждом шаге для улучшения значения H_0 совершается переход из одной точки пространства в другую в соответствии с выбранным направлением движения и его расстоянием. Переход из произвольной точки Z_k в точку Z_{k+1} можно описать векторным соотношением:

$$Z_{k+1} = Z_k + \Delta Z_k = Z_k + \lambda_k S_k, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.49)$$

где S_k — вектор направления движения; λ_k — коэффициент, определяющий величину шага $\Delta Z_k = \lambda_k S_k$. Если нормировать (привести к единичному вектору), то λ_k будет целиком определять величину шага ΔZ_k .

Приращению вектора параметров ΔZ_k соответствует приращение целевой функции

$$\Delta H_{0k} = H_0(Z_{k+1}) - H_0(Z_k), \quad (2.50)$$

которое с учетом (2.49) является функцией векторов Z^k , S и скаляра λ_k . Обычно начальная точка многошагового процесса поиска или, что то же самое, начальный вектор Z_0 , выбирается произвольно, а все последующие точки определяются с помощью рекуррентного соотношения (2.49). Поэтому на произвольном k -м шаге Z^k можно считать фиксированным (рис. 2.3, а), а приращение ΔH_{0k} рассматривать как функцию S^k и λ_k . Различные способы определения направления поиска S^k определяют основную сущность методов нелинейного программирования, поэтому их часто называют также *методами направленного поиска*.

При заданной процедуре определения S^k в соответствии с тем или иным методом направленного поиска остается выбрать скалярный коэффициент λ_k , чтобы совершить переход из точки Z^k в точку

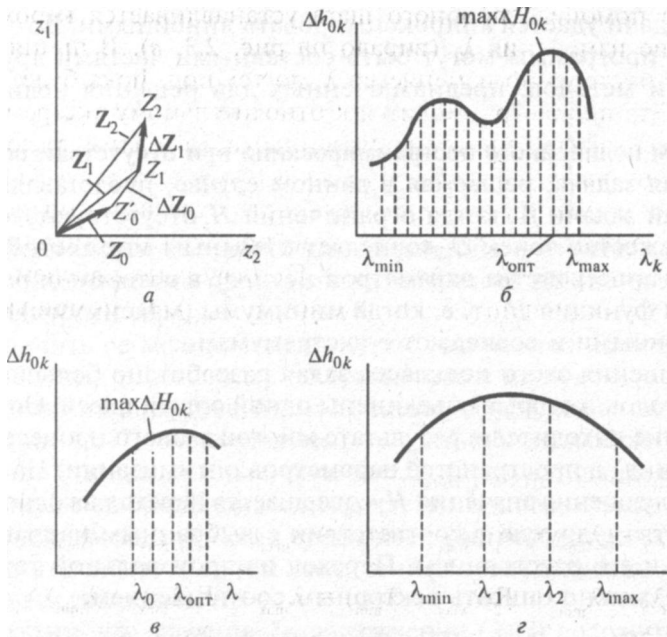


Рис. 2.3. Схемы выбора шага в процессе поиска

Z_{k+1} . Выбор λ_k в этом случае представляется на первый взгляд простой задачей, так как при фиксированном S_k приращение ΔH_{0k} становится функцией только одной переменной λ_k . Действительно, целесообразно, чтобы величина шага обеспечивала максимальное приращение H_0 , а для оптимизации $\Delta H_{0k}(\lambda_k)$ достаточно найти решения уравнения $\partial \Delta H_{0k} / \partial \lambda_k = 0$ и выделить среди них значение λ_k , соответствующее $\max(\min) \Delta H_{0k}$.

Однако для практических задач такой подход обычно неприменим из-за отсутствия аналитических выражений функции $\Delta H_{0k}(\lambda_k)$, незнания свойств дифференцируемости и т. п. Поэтому для выбора λ_k обычно пользуются численными методами одномерной оптимизации, реализуемыми на ЭВМ. Наиболее простыми среди них являются методы перебора, описанные ниже и позволяющие приближенно с желаемой точностью определить оптимальное λ_k . Однако с повышением точности количество вычислений $\Delta H_{0k}(\lambda_k)$ возрастает и поэтому такой путь не всегда приемлем, хотя он дает возможность определения абсолютного оптимума (рис. 2.3, б).

Более экономным в вычислительном отношении является метод последовательного увеличения (уменьшения) λ_k с постоянным шагом (рис. 2.3, в). При этом произвольно выбирается начальное значение

λ_k , затем с помощью пробного шага устанавливается необходимое направление изменения λ_k (вправо на рис. 2.3, в). В принятом направлении постепенно изменяется λ_k до тех пор, пока будет найден $\max \Delta H_{ok}$. Эта процедура сходится к относительному экстремуму.

Наиболее эффективными численными методами одномерной оптимизации являются *методы Фибоначчи и золотого сечения*, основанные на построении последовательности отрезков, стягивающихся в точку оптимума [14]. В качестве примера рассмотрим схему метода золотого сечения (рис. 2.3, г). Произвольно выберем начальный интеграл изменения λ_k в виде $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$. С помощью чисел Фибоначчи

$$F_1 = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \approx 0,38 \text{ и } F_2 = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \approx 0,62$$

найдем два новых значения:

$$\lambda_1 = \lambda_{\min} + F_1(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) = \lambda_{\max} - F_2(\lambda_{\max} - \lambda_{\min});$$

$$\lambda_2 = \lambda_{\min} + F_2(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) = \lambda_{\max} - F_1(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}).$$

Если $\Delta H_{ok}(\lambda_1) > \Delta H_{ok}(\lambda_2)$, то предполагается, что $\max \Delta H_{ok}$ содержится в отрезке $[\lambda_{\min}, \lambda_2]$, который рассматривается в качестве нового интервала изменения λ_k . Если $\Delta H_{ok}(\lambda_1) < \Delta H_{ok}(\lambda_2)$, то в качестве нового интервала рассматривается отрезок $[\lambda_1, \lambda_{\max}]$. Если $\Delta H_{ok}(\lambda_1) = \Delta H_{ok}(\lambda_2)$, то за новый интервал можно принять любой из отрезков $[\lambda_{\min}, \lambda_2]$ и $[\lambda_1, \lambda_{\max}]$. Далее операции сужения интервалов повторяются до тех пор, пока будет достигнута желаемая точность определения $\lambda_{\text{опт}}$. Сходимость метода также обеспечивается для относительного экстремума.

В тех случаях, когда дополнительные вычисления для определения λ_k вообще нежелательны, величину λ_k можно принять постоянной для всех шагов поиска или варьировать от шага к шагу на основании априорных соображений, которые при необходимости будут отмечены особо.

Множество методов направленного поиска для систематизации и краткого обзора отличительных свойств удобно разбить на три основные группы:

- 1) покоординатного поиска;
- 2) локальной аппроксимации;
- 3) случайных направлений.

Рассмотрим каждую группу методов в отдельности.

Методы покоординатного поиска. Эти методы отличаются тем, что выбор величины S_k производится среди ограниченного множества возможных направлений координатных осей p -мерного пространства параметров оптимизации; т. е. на каждом шаге движение осуществляется в направлении, параллельном какой-либо координатной оси. Следовательно,

$$S_k = I_n, n = 1, \dots, p, \quad (2.51)$$

где I_n — координатный вектор, а

$$\Delta Z_k = \Delta Z_n, n = 1, \dots, p. \quad (2.52)$$

Другими словами, приращение ΔZ_k определяется только путем изменения параметра z_n по n -й координатной оси, а все остальные параметры $z_1, \dots, z_{n-1}, z_{n+1}, \dots, z_p$ при этом неизменны (заморожены). Таким образом, на каждом шаге производится улучшение значений целевой функции только по одной переменной.

Изложенные методы покоординатного поиска в некоторых случаях обеспечивают отыскание относительного экстремума. Если он совпадает с абсолютным, то найденное решение является оптимальным решением задачи. Например, для H_0 , линии равного уровня которой представлены на рис. 2.4, а, оптимальное решение в виде точки Z_2 находится за один цикл поиска. Если ориентация линий равного уровня относительно координатных осей изменяется (рис. 2.4, б), то число циклов стремится к бесконечности и практически оптимальное решение можно найти лишь приближенно. С учетом конечных величин шагов, реализуемых на ЭВМ, процесс поиска может закончиться в достаточном удалении от оптимальной точки (случай ложного оптимума). Особенно большая вероятность получения ложного оптимума появляется тогда, когда линии равного уровня вытянуты и образуют так называемые овраги и гребни (рис. 2.4, в).

Несмотря на простоту реализации на ЭВМ и логику, отмеченные недостатки ограничивают применение методов покоординатного поиска в чистом виде. Для устранения недостатков предложены разные способы [18]. Наиболее общие среди них сводятся к повороту координатных осей и построению новых направлений поиска.

Поворот координатных осей осуществляется таким образом, чтобы приблизиться к схеме, показанной на рис. 2.4, а, т. е. чтобы одна из координатных осей стремилась к линейной аппроксимации кривой, вдоль которой вытянуты силовые линии. Это можно сделать, например, совершив один цикл покоординатного поиска (рис. 2.4, г), в результате которого из точки Z_0 попадем в точку Z_1 . Соединяя

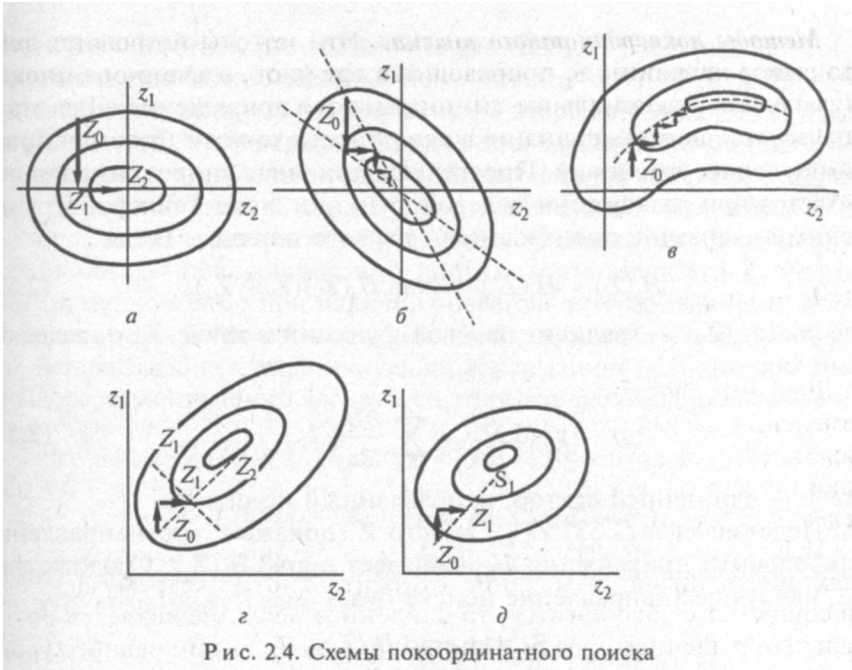


Рис. 2.4. Схемы покоординатного поиска

точку Z_1 с Z_0 прямой, получим новое направление координатной оси, а другую ось возьмем ортогональной к полученной (пунктир на рис. 2.4, г). Далее совершается один цикл поиска в новых координатных осях и снова производится поворот и т. п.

Новые направления поиска, отличные от направлений координатных осей, также можно построить с помощью одного цикла покоординатного поиска (рис. 2.4, д). Соединяя точки Z_0 и Z_1 , получаем направление S_1 , по которому решается задача одномерной оптимизации и находится точка с наилучшим значением H_0 . Исходя из этой точки процедура повторяется до тех пор, пока будет найдено оптимальное решение задачи. Для сокращения объема вычислений одномерную оптимизацию можно осуществлять только в направлении S_1, S_2, \dots , а движение вдоль координатных осей производить постоянными шагами.

Таким образом, методы покоординатного поиска могут иметь различную модификацию в зависимости от выбора последовательности координатных осей, способов преодоления «оврагов» («гребней») и т. п. Используя эти модификации, а также возможные вариации методов одномерной оптимизации, можно построить ряд эффективных алгоритмов направленного поиска, изложенных в [17].

Методы локальной аппроксимации. Эти методы позволяют выбрать такое направление поиска на каждом шаге, в котором значение H_0 получает максимальное (минимальное) приращение. Для этого исследуется целевая функция в окрестности точки Z_k путем аппроксимирующих уравнений. Простейшая линейная аппроксимация получается при разложении целевой функции в ряд Тейлора, ограниченный членами с производными первого порядка. Тогда

$$H_0(Z) \approx H_0(Z_k) + \text{grad } H_0(Z_k)(Z - Z_k), \quad (2.53)$$

где $\text{grad } H_0(Z_k)$ — градиент целевой функции в точке Z_k , определяемый как

$$\text{grad } H_0 \approx \sum_{n=1}^p \frac{\partial H_0}{\partial z_n} \hat{l}_n, \quad (2.54)$$

где \hat{l} — единичный вектор, направленный по оси z_n .

Подставляя в (2.53) Z_{k+1} вместо Z , покажем, что направление наибольшего приращения H_0 совпадает с $\text{grad } H_0(Z_k)$. Следовательно, наилучшее направление поиска будет

$$S_k = \pm \text{grad } H_0(Z_k), \quad (2.55)$$

где знак «+» относится к задачам максимизации, а знак «−» относится к задачам минимизации. Методы, выбирающие направление поиска в соответствии с (2.55), называются *градиентными*.

К выбору коэффициента λ_k для градиентных методов можно подойти двояко. Если учесть локальный характер аппроксимации, то шаг ΔZ_k , а следовательно, λ_k надо выбирать достаточно малым. Это приводит к увеличению количества шагов в процессе поиска и снижает его эффективность. Поэтому часто λ_k выбирают из условия оптимизации ΔH_{0k} , решая одномерную задачу по аналогии с методами покоординатного поиска. Такая модификация градиентного метода называется *методом наискорейшего спуска (подъема)*. Очевидно, скорейший поиск тем эффективнее, чем ближе поверхность H_0 на участке поиска к линейной аппроксимации, т. е. в достаточном удалении от экстремума. Вблизи экстремума рекомендуется перейти на чисто градиентный метод и задавать λ_k либо постоянным, либо уменьшающимся по мере приближения к оптимуму. Величина λ_k задается на основе априорных целей, а уменьшение обычно производится пропорционально модулю градиента.

Поиск градиентными методами начинается в произвольной точке Z_0 и сходится при $k \rightarrow \infty$ в стационарной точке, в которой $\text{grad } H_0$ становится равным нулю (необходимое условие относительного эк-

стремума). Поэтому результаты поиска требуют проверки на экстремальность, что можно сделать с помощью достаточных условий относительного экстремума (проверка знака вторых производных). Практически, чтобы не вычислять вторые производные, поиск повторяют из различных начальных точек, и если он везде сходится к одному результату, то считают, что найден относительный экстремум.

Вследствие конечности шагов поиска градиентные методы, так же как и методы покоординатного поиска, могут привести к ложному оптимуму, особенно при наличии «оврагов» и «гребней» (рис. 2.5, а). В этих случаях более работоспособными оказываются *методы Ньютона*, использующие квадратичную аппроксимацию H_0 с помощью ряда Тейлора, ограниченного членами со вторыми производными, а именно

$$H_0(\mathbf{Z}) \approx H_0(\mathbf{Z}_k) + \text{grad } H_0(\mathbf{Z}_k)(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_k) + 0,5(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_k)^T \text{grad}^2 H_0(\mathbf{Z}_k)(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_k), \quad (2.56)$$

где $\text{grad}^2 H_0(\mathbf{Z}_k)$ — градиент второго порядка, представляющий квадратичную матрицу Гессе типа

$$\text{grad}^2 H_0 = \begin{bmatrix} \partial^2 H_0 / \partial z_1^2 & \dots & \partial^2 H_0 / \partial z_1 \partial z_p \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial^2 H_0 / \partial z_p \partial z_1 & \dots & \partial^2 H_0 / \partial z_p^2 \end{bmatrix}. \quad (2.57)$$

Подставляя в (2.56) \mathbf{Z}_{k+1} вместо \mathbf{Z} и оптимизируя ΔH_{0k} по $\Delta \mathbf{Z}_k$, можно показать, что максимальное приращение целевой функции для задачи минимизации достигается при

$$\Delta \mathbf{Z}_k = - \frac{\text{grad } H_0(\mathbf{Z}_k)}{\text{grad}^2 H_0(\mathbf{Z}_k)}, \quad (2.58)$$

т. е. и направление, и значения шага определяются одновременно.

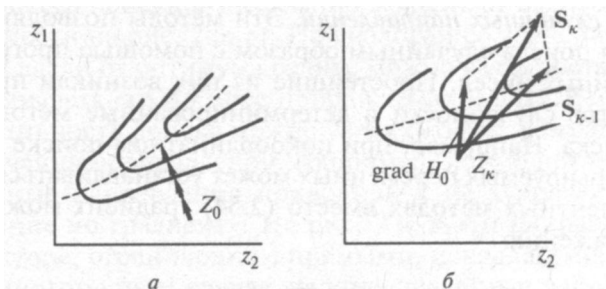


Рис. 2.5. Схемы направленного поиска

Для квадратичных функций достаточно сделать один такой шаг, чтобы найти оптимум, а в **общем** случае найденное значение ΔZ_k нормируют и принимают в качестве S_k . Величина λ_k определяется по аналогии с градиентными методами.

Сходимость метода Ньютона к локальному экстремуму гарантируется только при положительности $[\text{grad}^2 H_0(Z_k)]^{-1}$, для чего используются специальные приемы. Недостатком метода является необходимость вычисления вторых производных. Поэтому метод Ньютона может быть применен там, где он имеет очевидные преимущества, т. е. в окрестности экстремума H_0 , хорошо поддающейся квадратичной аппроксимации.

Трудности, связанные с применением метода Ньютона, привели к разработке группы методов, которые называются *квазиньютоновскими методами переменной метрики* или *градиентными методами с большим шагом*. Сущность их заключается в аппроксимации матрицы Гессе или обратной к ней матрицы таким образом, чтобы ограничиться только использованием первых производных.

К другому классу методов, улучшающих градиентный поиск, относятся *методы сопряженных направлений*. При определении направления поиска на k -м шаге они учитывают предыдущее направление, т. е.

$$S_k = \pm \text{grad } H_0(Z_k) \pm \gamma_k S_{k-1}. \quad (2.59)$$

Благодаря суммированию направлений, S_k отклоняется от $\pm \text{grad } H_0(Z_k)$ в сторону ортогональных направлений, что позволяет продолжать движение в овражных ситуациях (рис. 2.5, б). Сопряженные методы отличаются в основном способом определения γ_k и для квадратичных целевых функций заканчивают поиск за p шагов. В общем случае число шагов может быть больше. Используя понятия сопряженности, а также различные модификации и комбинации градиентных и квазиньютоновских методов, можно построить ряд эффективных алгоритмов поиска [19, 20].

Методы случайных направлений. Эти методы позволяют выбрать направления поиска случайным образом с помощью программ выработки случайных чисел. Простейшие из них возникли при включении элементов случайности в детерминированные методы направленного поиска. Например, при покоординатном поиске последовательность варьируемых переменных может устанавливаться случайно. Или в градиентных методах вместо (2.54) градиент можно определять по выражению

$$\text{grad } H_0 \approx \sum_{n=1}^l \Delta H_{0n} \xi_n, \quad (2.60)$$

где ξ_k — единичные векторы случайных направлений, а ΔH_{0k} — соответствующие приращения целевой функции.

Статистический градиент (2.60) определяется проще по сравнению с (2.54) — при заданном l не зависит от числа переменных, но в то же время может служить лишь математическим ожиданием градиента, вычисленным с вероятностью, зависящей от l .

Более развитые случайные методы исключают полностью определенность при выборе направлений поиска. Если принять, что

$$S_k = \xi_k, \quad (2.61)$$

где ξ_k — первый случайный вектор, определенный в точке Z_k и обеспечивающий улучшение H_0 , то можно построить многошаговый процесс поиска, сходящийся к локальному оптимуму (рис. 2.6, а). В каждой точке Z_k перебираются случайные направления до тех пор, пока не будет найден ξ_k . В более общем случае можно рассматривать несколько удачных случайных направлений и выбирать то, которое доставляет наибольшее приращение H_0 . Для преодоления «оврагов» и «хребтов» можно учитывать предыдущие направления поиска по аналогии с (2.59), т. е. принимать

$$S_k = \xi_k + \gamma_k S_{k-1}. \quad (2.62)$$

Чтобы избежать нормирования векторов направления, присущего детерминированным методам, можно рассматривать ξ_k в виде постоянных радиусов, исходящих из центра гиперсферы (рис. 2.6, б). Анализируя равномерно распределенные случайные точки r^2 гиперсфере, выбирают точку с наилучшим значением H_0 (точка \tilde{Z}_k на рис. 2.6, б). Направление, соединяющее центр окружности (исходную точку Z_k) с точкой \tilde{Z}_k , принимается в качестве S_k и в этом направлении совершается шаг ΔZ_k , максимизирующий по модулю ΔH_{0k} . В найденной точке \tilde{Z}_{k+1} процедура повторяется. Сходимость такого процесса поиска существенно зависит от радиуса гиперсферы (окружности на рис. 2.6, б). По аналогии со значением градиентного шага вдали от оптимума радиус можно взять достаточно большим и уменьшать его по мере приближения к оптимуму.

Эффективность поиска можно увеличить, если ограничить множество случайных направлений. Например, можно потребовать, чтобы случайные направления приводили к не худшему результату, чем движение по градиенту. На рис. 2.6, в эти направления находятся в секторе, ограниченном прямыми, исходящими из точки Z_k . В общем многомерном случае лучшие случайные направления находятся внутри так называемого направляющего конуса с верши-

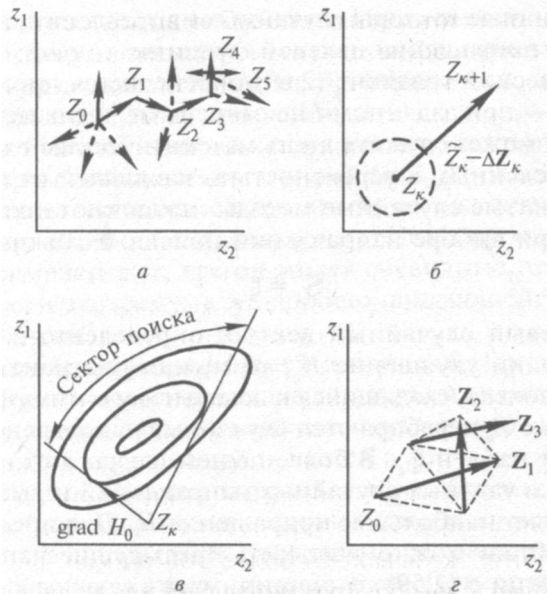


Рис. 2.6. Схемы случайного поиска

ной в исходной точке Z_k . Способы построения направляющих конусов даны в [21].

Кроме гиперсфер и направляющих косинусов для построения случайных направлений используются также многогранники, например *симплексы*. В случае двух переменных регулярный симплекс представляет равносторонний треугольник, в случае **-переменных** — многогранник с равными гранями и $(p + 1)$ вершинами. Для нерегулярных симплексов равенство сторон или одинаковость граней необязательны. Многогранники с числом вершин, превышающим $(p + 1)$, в отличие от симплексов называются *комплексами*.

В поиске с многогранником сначала случайным образом задаются вершины симплекса или комплекса. В каждой вершине вычисляются значения H_0 , сравниваются и вершина с наихудшим значением H_0 принимается в качестве начальной точки Z_0 (рис. 2.6, г). Направление поиска S_0 определяется прямой, соединяющей Z_0 с центром тяжести многогранника. Совершая шаг в направлении S_0 , получаем точку Z_1 с лучшим значением H_0 по сравнению с $H_0(Z_0)$. Затем путем замены вершин Z_0 на вершину Z_1 получаем новый многогранник и повторяем процедуру до тех пор, пока многогранник стянется в пределы заданной точности к центру тяжести.

На основе рассмотренных способов выбора случайных направлений построен ряд эффективных алгоритмов поиска.

Сравнительный анализ алгоритмов направленного поиска, принятый различными авторами, показывает, что наименьшее количество шагов в процессе поиска обеспечивают методы локальной аппроксимации (градиентный, ньютоновский и др.). Однако при расчетах на ЭВМ более важным показателем является машинное время, которое при определенных условиях можно считать пропорциональным количеству вычислений целевой функции H_0 . Для методов, требующих определения производных, это количество возрастает с увеличением числа переменных. Поэтому при решении практических задач часто более эффективными оказываются методы покоординатного поиска и случайных направлений, которые по числу шагов наименее эффективны в сравнении с детерминированными методами (по аналогии с упорядоченным и случайным перебором). Однако вследствие простой логики поиска и меньшей чувствительности к свойствам целевой функции методы случайных направлений иногда оказываются более полезными.

Методы нелинейного программирования при наличии ограничений.

Для этих методов центральной является наиболее общая постановка задачи Д, когда ограничения заданы как в форме равенств, так и неравенств. По аналогии с экстремальными задачами без ограничений решение также достигается с помощью многошаговых процессов поиска. Однако возможности выбора направлений поиска существенно уменьшаются из-за наличия ограничений.

Методы адаптированного направленного поиска. Появление ограничений в задаче Д сопровождается разделением точек пространства параметров оптимизации на допустимые и недопустимые. Допустимые точки принадлежат множеству D_2 , а недопустимые H расположены вне этой области. Допустимые точки, в свою очередь, различаются как внутренние и граничные. Для внутренних точек B ограничения выполняются в форме строгих неравенств, а для граничных Γ — строгих равенств (рис. 2.7, а).

Принадлежность точки Z_k к одной из указанных категорий существенно влияет на выбор направления поиска. Например, для внутренних точек, по крайней мере, в малой окрестности направление можно выбрать без учета ограничений. В данном случае ограничения задачи считают неактивными. Для граничных точек учет ограничений обязателен, так как даже в малой окрестности **ВОЗМОЖЕН** переход в недопустимую точку в направлении поиска. Если точка Z_k является недопустимой, то главным при выборе направления поиска служит необходимость попадания в D_2 , т. е. удовлетворения ограничений задачи Д.

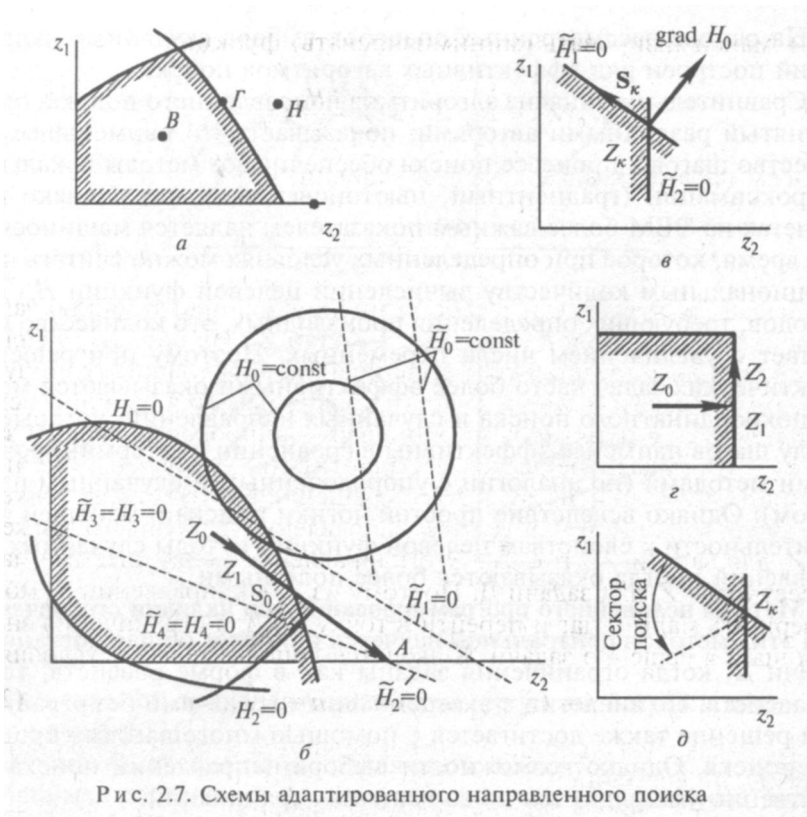


Рис. 2.7. Схемы адаптированного направленного поиска

Таким образом, в зависимости от того, где находится точка (внутри, вне или на границе D_z), можно по-разному выбрать направление поиска. Переменные условия для выбора направлений требуют соответствующего приспособления (адаптации) методов поиска. Способы адаптации являются отличительными свойствами методов данной группы. В остальном эти методы сохраняют аналогию с методами направленного поиска для экстремальных задач.

Выбор наилучших величин S_k с учетом всех видов ограничений (равенств и неравенств) в малой окрестности Z_k можно осуществлять по аналогии с методами локальной аппроксимации. Простейшая линейная аппроксимация с помощью разложения в ряде Тейлора приводит к выражениям типа (2.53) для целевой функции и ограничений. Учитывая постоянство функций и частных производных, определенных в фиксированной точке Z_k , и подставляя полученные выражения H_0 и H_j в задачу Д, получаем следующую задачу линейного программирования (назовем ее задачей Ж):

- максимизировать (минимизировать) функцию

$$\tilde{H}_0(Z) = H_0(Z_k) + \sum_{n=1}^p \frac{\partial H_0}{\partial z_n} (z_n - z_{nk})$$

по всем параметрам z_1, \dots, z_p при условии, что

$$\tilde{H}_j(Z) = H_j(Z_k) + \sum_{n=1}^p \frac{\partial H_j}{\partial z_n} (z_n - z_{nk}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, m.$$

Задача Ж представляет собой линейную аппроксимацию задачи Д, допустимую в малой окрестности точки Z_k . На рис. 2.7, б сплошными линиями представлены ограничения, образующие границу допустимой области и линии равного уровня целевой функции исходной задачи Д, а пунктирными линиями — аппроксимирующей задачи Ж. Эта задача решается стандартными методами линейного программирования (на рис. 2.7, б решение соответствует точке А). Соединяя точки Z_0 и А, получаем направление наилучшего движения из Z_0 для задачи Ж, т. е. S_0 . Это направление наилучшее и в малой окрестности Z_0 для задачи Д. Поэтому из Z_0 в направлении S_0 можно совершить малый шаг и перейти в точку Z_1 . Для ограничения значения шага в решение задачи Ж вводятся дополнительные условия:

$$\delta_{nk} - (z_{n, k+1} - z_n) \geq 0, \quad n = 1, \dots, p, \quad (2.63)$$

где δ_{nk} — максимально допустимая величина Δ -го шага по соответствующей переменной.

В точке Z_1 определяются новые коэффициенты задачи Ж — для них находится новое решение и аналогичным путем совершается переход в точку Z_2 и другие до тех пор, пока улучшение значения H_0 станет невозможным. Такой метод многократного использования линейного программирования часто называется *мелкошаговым градиентным методом*, так как полученное S_k в малой окрестности внутренних точек совпадает с $\text{grad } H_0(Z_k)$. Благодаря мелким шагам длительность процесса поиска увеличивается особенно при попадании в допустимую область, когда направление поиска отклоняется от градиента.

В отличие от мелкошаговых разработан ряд крупношаговых методов, в которых значения шага (коэффициент λ_k) выбирается путем решения одномерной задачи оптимизации, как указывалось выше. Направления поиска в этих методах классифицируются как *допустимые* (ДН), *подходящие допустимые* (ПДН) и *наилучшее подходящее допустимое* (НПДН) [22]. Движение по ДН на малый шаг не выводит за пределы допустимой области, движение по ПДН одновременно улучшает значение H_0 , а движение по НПДН бес-

печивает максимальное улучшение значения H_0 без нарушения ограничений.

Возможные направления поиска типа ДН, ПДН и НПДН определяются в тех случаях, когда точка Z_k является граничной. Если Z_k — внутренняя точка, то обычно $-\text{grad } H_0(Z_k)$. Если Z_k оказывается вне допустимой области, то осуществляется направленное движение к допустимой области с помощью минимизации выражения

$$T(Z_k) = \sum_{j=1}^m \mu_j H_j^2(Z_k), \quad (2.64)$$

где $\mu_j = 1$ для ограничений-равенств и при нарушении ограничительного неравенства, а при удовлетворении последних $\mu_j = 0$.

Выражение (2.64) дает результирующую конечную оценку отклонения Z_k от множества D_2 , а $\text{grad } T(Z_k)$ указывает направление движения к допустимой области.

НПДН для любой граничной точки является единственным и определяется путем решения простейших задач линейного или квадратичного программирования известными методами при условии, что ограничения даны только в форме неравенств. В результате решения находится S_k , имеющий максимальную проекцию в направлении $\pm \text{grad } H_0(Z_k)$ и удовлетворяющий условиям ДН. При локальной линейной аппроксимации граничной поверхности в окрестности Z_k вектор ДН либо касателен к поверхности многообразия, полученного путем пересечения аппроксимирующих гиперплоскостей, либо направлен внутрь допустимой области. Если S_k становится ортогональным $\text{grad } H_0(Z_k)$, то дальнейшее улучшение H_0 невозможно.

Число ПДН в граничных точках может быть сколь угодно большим. Соответственно может быть много способов их определения. Широко известен проективный градиентный метод, который в качестве ПДН использует проекцию $\text{grad } H_0(Z_k)$ на линеаризованную в окрестности Z_k поверхность допустимой области. В некоторых случаях проекция $\text{grad } H_0(Z_k)$ совпадает с НПДН, как, например, на рис. 2.7, в, а в общем случае определяется вектором типа

$$S_k = \pm \text{grad } H_0(Z_k) \mp \sum_{j=1}^l \sigma_j \text{grad } H_j(Z_k), \quad (2.65)$$

где σ_j — коэффициенты, определяемые из условия принадлежности S_k граничным гиперплоскостям в точке Z_k , т. е. путем решения системы уравнений

$$S_k = \text{grad } H_j(Z_k) = 0, \quad j = 1, \dots, l, \quad (2.66)$$

где $l \leq m$ — число ограничений, препятствующих движению по $\pm \text{grad } H_0(\mathbf{Z}_k)$.

Более простой способ определения ПДН дан в [23], где величина \mathbf{S}_k зависит только от одного коэффициента σ , т. е.

$$\mathbf{S}_k = \pm \text{grad } H_0(\mathbf{Z}_k) \pm \sigma \sum_{j=1}^l \text{grad } H_j(\mathbf{Z}_k). \quad (2.67)$$

Возможны и другие способы определения ПДН.

Способы определения ДН также многообразны. В простейшем случае ДН можно определить в виде

$$\mathbf{S}_k = \mp \sum_{j=1}^l \sigma_j \text{grad } H_j(\mathbf{Z}_k). \quad (2.68)$$

Независимо от способов определения НПДН, ПДН и ДН во всех случаях поиск начинается из допустимой точки \mathbf{Z}_0 и развивается, адаптируясь к местонахождению точки \mathbf{Z}_k . Если \mathbf{Z}_k — внутренняя точка, то совершается шаг по $\text{grad } H_0(\mathbf{Z}_k)$; если \mathbf{Z}_k — граничная точка, то по НПДН или ПДН, или ДН; если \mathbf{Z}_k недопустимая точка, то по $\text{grad } T(\mathbf{Z}_k)$. Наименьшее число шагов в процессе поиска обеспечивают методы НПДН и проекции градиента, но зато требуют большой трудоемкости при определении \mathbf{S}_k . Другие методы ПДН и ДН осуществляют поиск с большим количеством шагов, но менее трудоемки при определении \mathbf{S}_k . Поэтому заранее трудно предположить, какой из методов лучше по продолжительности поиска в целом.

Во всех случаях методам аппроксимирующего линейного программирования и возможных направлений присущи те же недостатки, что и методам локальной аппроксимации для решения экстремальных задач. И в тех, и в других необходимо определять частные производные функций H_0 и H_j . Поэтому нередко более целесообразна адаптация прямых методов направленного поиска (методов, не использующих частные производные) к условиям задачи Д.

Прямые методы покоординатного поиска непригодны для решения задачи Д, за исключением частного случая, когда ограничения заданы в виде гиперплоскостей, ортогональных координатным осям (рис. 2.7, з). Наоборот, прямые методы случайных направлений легко адаптируются к появлению ограничений на пути движения. Например, при выборе случайных направлений с помощью гиперсфер или направляющих косинусов достаточно дополнитель-

но учесть линеаризацию поверхности ограничений (рис. 2.7, *д*). При использовании многогранников для выбора случайных направлений вершины, принадлежащие недопустимой области, отбрасывают. Поэтому при решении задачи *D* вместо симплексов применяют комплексы с числом вершин, значительно превышающим размерность пространства поиска. Тогда, отбрасывая ряд вершин, удается сохранить многогранник достаточной размерности для определения направления движения. На основе направляющих конусов и комплексов построен ряд эффективных алгоритмов адаптируемого направленного поиска [17].

Методы преобразования задач. Преобразование задачи с ограничениями к эквивалентной задаче без ограничений можно осуществлять по-разному. Наиболее просто это делается, если ограничения заданы в форме равенств. Тогда возможны два подхода.

Первый подход использует разделение переменных на зависимые в количестве m и независимые в количестве $(p - m)$. Очевидно, при этом $m < p$, иначе все переменные определяются однозначно путем совместного решения ограничений-равенств. Разрешая ограничения-равенства относительно зависимых переменных z_1, \dots, z_m и подставляя их в целевую функцию, получаем задачу отыскания экстремума функции с $(p - m)$ переменными, т. е.

$$H_0(z_{m+1}, \dots, z_p).$$

При решении практических задач этот подход, как правило, непригоден из-за отсутствия явных функциональных выражений ограничений-равенств. Поэтому обычно применяют **второй подход**, использующий классический метод множителей Лагранжа. Он требует построения функций Лагранжа

$$Q(\mathbf{Z}, \mathbf{g}) = H_0(\mathbf{Z}) + \sum_{j=1}^m g_j H_j(\mathbf{Z}), \quad (2.69)$$

где $\mathbf{g}(g_1, \dots, g_m)$ — вектор новых варьируемых параметров, называемых *множителями Лагранжа*.

Необходимые условия экстремумов функций Q и H_0 совпадают при удовлетворении $H_j = 0$ ($j = 1, \dots, m$). Поэтому задачу оптимизации $H_0(\mathbf{Z})$ с ограничениями-равенствами можно заменить эквивалентной задачей отыскания стационарной точки функции $Q(\mathbf{Z}_1, \mathbf{g})$ без ограничений. Ее можно решить численными методами, рассмотренными выше. Однако для перехода к более простой формулировке задачи надо расширить размерность задачи за счет введенных новых переменных g_1, \dots, g_m .

Функцию Лагранжа можно построить и для ограничений, заданных в форме неравенства $H_j \geq 0$, путем их перестроения в равенства типа

$$H_j(\mathbf{Z}) \pm v_j = 0, \quad (2.70)$$

где v_j — неотрицательные переменные.

Тогда получаем

$$Q(\mathbf{Z}, \mathbf{g}, \mathbf{v}) = H_0(\mathbf{Z}) + \sum_{j=1}^m g_j H_j(\mathbf{Z}) \pm \sum_{j=1}^m g_j v_j, \quad (2.71)$$

где для ограничений-равенств соответствующие $v_j = 0$.

Теорема Куна—Таккера доказывает, что и в этом случае оптимизацию $H_0(\mathbf{Z})$ можно свести к поиску стационарной точки $Q(\mathbf{Z}, \mathbf{g}, \mathbf{v})$. Однако размерность задач при этом еще более расширяется за счет переменных v_j .

Составляющие функций Лагранжа (2.70) и (2.71), куда входят множители g_p в совокупности оказывают влияние на значение Q только при нарушении ограничений. В противном случае сумма этих составляющих равна нулю и значения Q и H_0 совпадают. Поэтому указанной сумме составляющих придается смысл штрафа за нарушение ограничений, а множители g_j трактуются как коэффициенты стоимости, определяющие величину штрафа. Исходя из этой аналогии развит метод штрафных функций, идея которого принадлежит Куранту [20].

Методы штрафных функций, так же как и метод множителей Лагранжа, преобразуют исходную задачу к задаче без ограничений. Отличие состоит в том, что вместо функции Лагранжа используется функция более общего вида, а именно:

$$H_0(\mathbf{Z}) + r_k g(\mathbf{Z}), \quad (2.72)$$

где $g(\mathbf{Z})$ — штрафная функция, отличная от нуля при нарушении ограничений; r_k — коэффициент стоимости.

Функции штрафа строятся различными способами. Широкое применение получили функции двух типов

$$g(\mathbf{Z}) = \sum \frac{\omega_j}{H_j(\mathbf{Z})}; \quad (2.73)$$

$$g(\mathbf{Z}) = \sum \omega_j [H_j(\mathbf{Z})]^2, \quad (2.74)$$

где ω_j — коэффициент стоимости нарушения j -го ограничения.

При использовании различных модификаций штрафных функций разработан ряд алгоритмов поиска, которые сводятся к ре-

шению последовательности задач оптимизации выражения (2.72). Результаты решения предыдущей задачи последовательности используются в качестве начального решения последующей задачи. Выбор последовательности $\{r_k\}$ осуществляется с учетом формы $g(Z)$.

Методы скользящего допуска. Скользящие допуски можно рассматривать в качестве параметров метода. Чтобы не увеличивать их число соответственно количеству ограничений, последние заменяют одним эквивалентным ограничением типа $T(Z_k)$, которое определяется выражением (2.64). При строгом выполнении ограничений $T(Z_k) = 0$, а во всех остальных случаях $T(Z_k) > 0$. Поэтому значение скользящего допуска на k -м шаге (d_k) также всегда положительно. Следовательно, условие выполнения ограничений с заданной погрешностью можно представить в виде

$$d_k - T(Z_k) \geq 0. \quad (2.75)$$

Таким образом, задача оптимизации Д принимает следующую формулировку:

- максимизировать (минимизировать) $f_0(Z)$ при выполнении условия (2.75), в котором d_k является элементом последовательности

$$d_0 \geq d_1 \geq \dots \geq d_k \geq \dots \geq 0. \quad (2.76)$$

Возможности образования последовательности (2.76) и выбора d_k многочисленны. В простейшем случае последовательность можно задавать заранее на основе априорных целей, лишь бы предельное значение для $d_k \rightarrow 0$ при приближении к оптимальному решению, $Z_k - Z^*$.

Вводя понятия скользящего допуска и эквивалентного ограничения и не останавливаясь на способах задания последовательности (2.76), можно получить следующую стратегию поиска. Начальная точка Z_0 задается произвольно и проверяется условие (2.75). При этом возможны два варианта. Если условие (2.75) не удовлетворяется, то производится минимизация функции $T(Z_0)$ любым из приемлемых методов поиска до тех пор, пока условие (2.75) будет выполнено. Если условие (2.75) удовлетворяется, то переходят к оптимизации функции $H_0(Z_0)$ также с помощью любого подходящего метода поиска. Как обычно, определяется направление S_0 и совершается переход в точку Z_1 , где все предыдущие процедуры повторяются. Поиск заканчивается, когда дальнейшее улучшение $H_0(Z_k)$ становится невозможным или величина d_k становится меньше наперед заданной минимальной погрешности. Процесс поиска сводится к локальному оптимуму.

Основным достоинством методов скользящего допуска является то, что независимо от выполнения условия (2.75) на каждом шаге решаются экстремальные задачи оптимизации без ограничений (минимизация $T(\mathbf{Z}_k)$ или оптимизация $H_0(\mathbf{Z}_k)$). Хотя методы преобразования задач с помощью множителей Лагранжа или штрафных функций также сводятся к оптимизации без ограничений, тем не менее поиск со скользящим допуском на ограничения приводит быстрее к цели. Эффективные алгоритмы поиска по методу скользящего допуска с использованием комплексов для определения направления движения описаны в [17].

§ 2.7 Методы динамического, геометрического и дискретного программирования

Методы динамического программирования. Динамическое программирование представляет собой математический аппарат, разработанный Р. Беллманом и его учениками [24, 25] для решения широкого круга задач, в которых время играет существенную роль. Однако понятие времени употребляется в более широком смысле и присуще любой конечной или бесконечной последовательности как дискретного, так и непрерывного характера. Поэтому динамическое программирование применяется к решению не только динамических, но и таких статических задач, в которых процессы решения можно трактовать как многошаговые, многоэтапные. Благодаря многоэтапному представлению многие процессы решения удается описать функциональными уравнениями особого типа (уравнениями Беллмана), которые являются центральными в теории динамического программирования. Непосредственное решение уравнений Беллмана удается в редких случаях.

Задача Д представлена в терминах динамического программирования функциональным уравнением (2.38). Уравнение (2.38) имеет следующие характерные особенности, определяющие стратегию динамического программирования. Во-первых, это уравнение рекуррентно, так как его вывод можно произвести для любого p (числа переменных) и любой начальной точки Z_0 , а $f_{p-1}(Z_1)$ можно определить по аналогии с $f_p(Z_0)$ и т. п., т. е. процесс решения на каждом этапе является однотипным. Во-вторых, оптимизация на каждом этапе осуществляется по одной переменной. В этом проявляется сходство динамического программирования с методами покоординатного поиска. В-третьих, оптимизация переменной на данном этапе осуществляется с учетом конечного результата всех последующих

этапов поиска. В этом заключается основное отличие динамического программирования от методов покоординатного поиска. Это отличие устанавливает связь текущего этапа поиска со всеми последующими, что позволяет оценить влияние направления и значения каждого шага поиска на конечный результат.

Поисковые методы динамического программирования основаны на численных методах решения уравнения (2.38). Общая вычислительная схема на первом этапе сводится к решению задачи одномерной оптимизации ΔH_0 по параметру Δz_1 , при фиксированной точке Z_0 и заданной функции $f_{p-1}(Z_1)$. Аналитический вид этой функции, как правило, неизвестен, но для численных решений достаточно задать $f_{p-1}(Z_1)$ хотя бы в табулированном виде. Для получения табличного представления $f_{p-1}(Z_1)$, в свою очередь, необходимо использовать семейство решений уравнения (2.38) при различных значениях Z_1 и известном $f_{p-2}(Z_2)$ и т. п.

Несмотря на внешнюю простоту общей вычислительной схемы, ее реализация при большом p практически невозможна даже с помощью современных ЭВМ. Это объясняется тем, что $f_{p-1}(Z_1)$, $f_{p-2}(Z_2)$ и другие являются функциями точек многомерного пространства (функции многих переменных) и их табуляция при $p > 3$ требует чрезвычайно большого объема памяти и времени вычислений. Поэтому общая вычислительная схема Беллмана не выдерживает столкновения с «проклятием размерности» и хорошо приспособлена лишь к решению узкого круга задач типа распределения ресурсов, где $p \leq 3$ [26].

Необходимость в задании $f_{p-1}(Z_1)$, $f_{p-2}(Z_2)$ и других отпадает, если применить вычислительную схему [1], использующую вместо одного рекуррентного уравнения (2.38) всю систему уравнений одновременно. Эту схему без ограничений общности рассмотрим на примере задачи с тремя переменными, для которой

$$f_3(Z_0) = \max_{\Delta z_1} [\Delta H_{01}(Z_0, \Delta z_1) + f_2(Z_1)] \text{ при } Z \in D_z; \quad (2.77)$$

$$f_2(Z_1) = \max_{\Delta z_2} [\Delta H_{02}(Z_1, \Delta z_2) + f_1(Z_2)] \text{ при } Z \in D_z; \quad (2.78)$$

$$f_1(Z_2) = \max_{\Delta z_3} \Delta H_{03}(Z_2, \Delta z_3) \text{ при } Z \in D_z. \quad (2.79)$$

Взаимосвязь уравнений (2.77)—(2.79) определяется структурной схемой (рис. 2.8), которая состоит из трех вложенных друг в друга контуров. Каждый контур образуется посредством обратной связи по выбору одной переменной и соответствует решению одномерной задачи оптимизации на соответствующем этапе поиска.

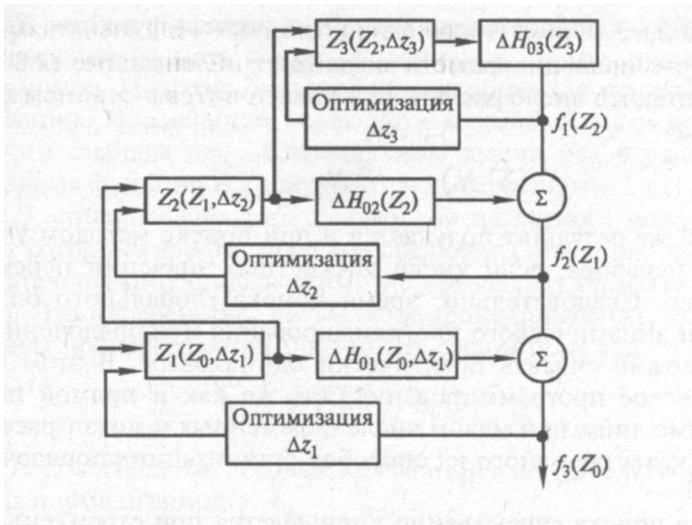


Рис. 2.8. Структурная схема динамического программирования

Процесс поиска начинается с последнего этапа, на котором решается уравнение (2.79) при фиксированной Z_2 . На следующем этапе решается уравнение (2.78) при фиксированной Z_1 . При этом для каждой новой точки Z_2 корректируются значения $f_1(Z_2)$ путем повторного решения (2.79). На первом этапе решается уравнение (2.77) при фиксированной Z_0 . Аналогично, для каждой новой точки Z_1 повторяется решение (2.78) и корректируется значение $f_2(Z_1)$. Таким образом, изменение переменной на каждом этапе производится с учетом его влияния на все последующие этапы поиска. Для реализации такой вычислительной схемы достаточно задать только начальную точку Z_0 (см. рис. 2.8).

Вычислительная схема, соответствующая полной системе функциональных уравнений, пригодна для целей как глобальной, так и локальной оптимизации.

Глобальный оптимум можно получить, осуществляя перебор табулированных значений z_n на всех этапах поиска. Переменные z_n , $n = 1, \dots, p$, табулируются в диапазоне допустимых изменений $\Delta z_1, \dots, \Delta z_p$. На каждом этапе путем сравнительной оценки отбираются наилучшие значения Δz_n . Учитывая, что для каждого значения Δz_n на n -м этапе поиска повторяются все последующие этапы, можно дать следующее рекуррентное соотношение:

$$(\sum N)_n = N_n (\sum N)_{n-1}, \quad (2.80)$$

где $(\sum N)_n$ — полное число вариантов расчета функции H_0 на n -м этапе; N_n — число дискретных значений z_n . С помощью (2.80) можно показать, что число расчетных вариантов H_0 в p -ЭТАПНОМ процессе поиска

$$(\sum N)_p = N_p N_{p-1}, \dots, N_1. \quad (2.81)$$

Такой же результат получается и при поиске методом упорядоченного перебора, если число дискретных значений переменных одинаково. Следовательно, время поиска глобального оптимума методами динамического программирования и упорядоченного перебора можно считать практически одинаковым. В этом смысле динамическое программирование, так же как и прямой перебор, применимо лишь при малом числе переменных и может рассматриваться в качестве одного из способов организации упорядоченного перебора.

Время поиска существенно уменьшается при стремлении к локальному оптимуму. В этом случае соотношение (2.81) принципиально сохраняет свою силу, однако значения N_n существенно уменьшаются и не являются постоянными. Количество расчетов H_0 на каждом этапе определяется принятым методом одномерной оптимизации и начальной точкой, с которой начинается поиск на данном этапе. Поэтому N_n изменяется при повторной оптимизации на данном этапе. На основе стратегии динамического программирования построены алгоритмы локальной оптимизации, обеспечивающие значительно меньшее время поиска по сравнению с глобальной оптимизацией.

Методы геометрического программирования. Этот раздел математического программирования предназначен для решения специального подкласса задач оптимизации типа Д [27]. Главным отличительным свойством задач геометрического программирования является принадлежность целевых функций и ограничений к особому виду функциональных связей, которые называются *позиномами* и имеют следующий вид:

$$H = \sum_k h_k, \quad (2.82)$$

где

$$h_k = c_k z_1^{a_{k1}} z_2^{a_{k2}} \dots z_p^{a_{kp}}; \quad (2.83)$$

c_k — постоянные положительные коэффициенты и a_{k1}, \dots, a_{kp} — произвольные вещественные числа.

Методы геометрического программирования базируются на использовании неравенств, приспособленных к оценке нижних граней позиномов. Поэтому они особенно удобны для решения задач минимизации. Применение неравенств к минимизации позинома рассмотрим сначала для экстремальной задачи без ограничений. Пусть целевая функция ϕ_0 определяется выражениями (2.82) и (2.83). Оценку H_0 снизу можно дать с помощью известного неравенства, согласно которому арифметическое среднее аддитивной функции с неотрицательными составляющими не превышает геометрического среднего. Это неравенство, называемое геометрическим, после определенных преобразований принимает следующий вид:

$$\sum_k h_k \geq \prod_k (h_k / \delta_k)^{\delta_k}, \quad (2.84)$$

где δ_k — положительные весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям нормализации, т. е.

$$\sum_k \delta_k = 1. \quad (2.85)$$

Левая часть (2.84) с учетом (2.82) представляет собой функцию ϕ_0 . Правая часть в форме произведения называется *преддвойственной функцией*, которая с учетом (2.83) зависит от переменных z_n , $n = 1, \dots, p$, и переменных δ_k , количество которых определяется числом аддитивных составляющих ϕ_0 . Таким образом, величина преддвойственной функции может служить нижней гранью H_0 для любых значений δ_k , которые с учетом (2.85) отражают долю, вносимую в величину ϕ_0 соответствующей составляющей.

Подставляя в правую часть (2.84) выражения (2.83), получаем

$$\sum_k h_k \geq \prod_k (c_k / \delta_k)^{\delta_k} \prod_{n=1}^p z_n^{D_n}, \quad (2.86)$$

где

$$D_n = \sum_k \delta_k a_{kn}, \quad n = 1, \dots, p. \quad (2.87)$$

Чтобы исключить новые переменные D_n (линейные комбинации δ_k) из преддвойственной функции, можно приравнять их к нулю. Тогда

$$D_n = \sum_k \delta_k a_{kn} = 0, \quad n = 1, \dots, p; \quad (2.88)$$

$$\sum_k h_k \geq \prod_k (c_k / \delta_k)^{\delta_k}. \quad (2.89)$$

Условие (2.88) отражает ортогональность вектора δ (с компонентами δ_k) всем вектор-столбцам матрицы

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1p} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & \dots & a_{kp} \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (2.90)$$

образованной показателями степеней a_{kn} . Это означает, что вектор δ ортогонален всему пространству показателей a_{kn} ¹. Нормализованные векторы, ортогональные пространству показателей a_{kn} , определяются как двойственные. Поэтому δ при выполнении условий (2.88) есть двойственный вектор. Соответственно правая часть неравенства (2.89) называется *двойственной функцией*, которая зависит только от δ_k и обозначается как

$$V(\delta) = \prod_k (c_k / \delta_k)^{\delta_k}. \quad (2.91)$$

С учетом (2.82), (2.89) и (2.91) можно показать, что

$$H_0(\mathbf{Z}) \geq \Gamma \geq V(\delta), \quad (2.92)$$

где Γ — нижняя грань $H_0(\mathbf{Z})$ и верхняя грань $V(\delta)$.

Более того, в теории геометрического программирования доказывается, что абсолютный минимум H_0 равен абсолютному максимуму V (рис. 2.9). Следовательно, в точке оптимума

$$\min H_0 = H_0(\mathbf{Z}^*) = \max V = V(\delta^*), \quad (2.93)$$

где \mathbf{Z}^* , δ^* — оптимизирующие векторы.

Таким образом, в точке оптимума геометрическое неравенство превращается в равенство (2.93). Подставляя сюда выражения H_0 и V , можно показать, что в точке оптимума составляющие h_k прямо пропорциональны $h_k^e = h_k^*(\mathbf{Z}^*) = \max V(\delta_k^*)$. (2.94)

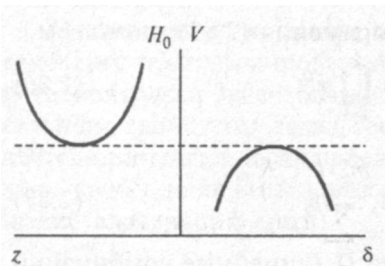


Рис. 2.9. Графическая интерпретация геометрического программирования

¹ Геометрические неравенства и представления об ортогональных векторах и пространствах послужили поводом для названия «геометрическое программирование».

Исходя из изложенного, можно представить такую последовательность процедур геометрического программирования. Сначала, пользуясь выражениями H_0 типа (2.82) и (2.83), строится двойственная функция V типа (2.91). Затем решается задача отыскания $\max V$ при выполнении условий (2.85) и (2.88). Одновременно определяются оптимальные значения δ_k^* . Затем с помощью (2.94) находятся оптимальные значения h_k^* . Таким образом, для исходной задачи минимизации сначала находится $\min H_0$, равное $\max V$, затем h_k^* и только после этого появляется возможность выбора оптимальных значений z_n^* путем решения уравнений (2.83). Они являются нелинейными уравнениями, и чтобы облегчить их решение, логарифмируют обе их части, т. е.

$$\ln h_k^* = \ln c_k + a_k \ln z_1^* + \dots + a_{kp} \ln z_p^*. \quad (2.95)$$

Уравнения (2.95) линейны относительно логарифмов переменных. Поэтому с их помощью сначала выбираются $\ln z_n^*$, а затем определяются непосредственно оптимальные значения z_n^* .

В общем случае при наличии ограничений исходная, или прямая, задача геометрического программирования формулируется следующим образом (назовем ее **задачей 3**):

- минимизировать функцию $H_0(\mathbf{Z})$ при условии, что $H_j(\mathbf{Z}) \leq 1$, $j = 1, \dots, m$; $z_n > 0$; $n = 1, \dots, p$; H_0 и H_j — **позиномы**.

Двойственная задача, соответствующая прямой задаче 3, принимает следующий вид (назовем ее **задачей И**):

- максимизировать функцию

$$V(\delta) = \left[\prod_k (c_k / \delta_k)^{\delta_k} \right] \prod_{j=1}^m \lambda_j(\delta)^{\lambda_j(\delta)}$$

при условии, **что**

$$\lambda_j(\delta) = \sum \delta_k, \quad j = 1, \dots, m, \quad k \in K_j; \quad \sum \delta_k = 1, \quad k \in K_0; \quad \delta_k \geq 0 \quad \text{для всех } k; \quad \sum \delta_k a_{kn} = 0, \quad n = 1, \dots, p,$$

где K_0, K_j — соответствующие целочисленные множества, определяющие номера аддитивных составляющих в функциях H_0 и H_j .

Таким образом, задача И отличается от двойственной задачи при отсутствии ограничений только появлением в двойственной функции сомножителей $\lambda_j^{\lambda_j}$. Они обусловлены тем, что нормализация вектора δ по условиям типа (2.90) по-прежнему выполняется только относительно функции H_0 , т. е. $\lambda_0^{\lambda_0} = 1$, а $\lambda_j^{\lambda_j} \neq 1$. Мно-

жители λ_j характеризуют чувствительность двойственной функции к уровню функций-ограничений. Появление множителей λ_j не вызывает принципиальных затруднений при решении двойственной задачи, так как значения λ_j зависят от δ и определяются как линейные комбинации δ_k .

В теории геометрического программирования показывается, что максимум двойственной функции достигается в стационарной точке, которая совпадает со стационарной точкой функции $\ln V(\delta)$, являющейся вогнутой. Следовательно, заменяя в двойственной задаче функцию V функцией $\ln V$, получаем необходимость максимизации вогнутой функции на выпуклом множестве, что представляет собой задачу вогнутого программирования, которая решается такими же методами, что и задача выпуклого программирования. Это также существенно облегчает процесс численного решения двойственной задачи.

Используя неравенства (2.92), можно построить итерационные процедуры последовательных приближений к искомому решению путем приближенных решений прямой и двойственной задач. Тогда на каждой итерации полученное значение H_0 дает верхнюю оценку искомого решения, а значение V — нижнюю оценку. Следовательно, после каждой итерации искомое решение можно аппроксимировать с известной точностью.

Основным препятствием к широкому применению методов геометрического программирования является необходимость представления целевой функции и функции ограничений в форме позиномов. Это обусловлено тем, что в инженерных задачах проектирования функции H_0 и H_j в большинстве случаев не имеют явных аналитических выражений. Поэтому различные методы аппроксимации, позволяющие обобщить геометрическое программирование путем оперирования функциями более общего вида, чем позиномы, не всегда применимы. Для формулировки задач в терминах геометрического программирования следует глубоко проанализировать конкретное содержание и провести большой объем предварительной работы. В связи с этим геометрическое программирование пока применяют лишь к решению простейших задач (в том числе и электротехнических) инженерного проектирования.

Методы дискретного программирования. Задачи дискретного программирования составляют подкласс задач типа Д, в котором множество допустимых точек D_z является конечным, или счетным, т. е. D_z состоит из конечного числа дискретных точек в пространстве

параметров оптимизации z_1, \dots, z_p . Обычно условие дискретности разделяется по отдельным переменным, т. е.

$$z_n = J_n, n = 1, \dots, p, \quad (2.96)$$

где J_n — конечный набор дискретных значений z_n .

Если наборы J_n включают только целые числа, то задача дискретного программирования сводится к частному случаю, называемому *задачей целочисленного программирования*. В общем случае задача дискретного программирования формулируется как задача Д, к которой добавляются условия типа (2.96).

Дополнение задачи Д условиями (2.96) требует на первый взгляд получить решение в два этапа. Сначала, пренебрегая условиями (2.96), заменить дискретную задачу ее непрерывным аналогом и решить одним из приемлемых методов, рассмотренных выше, а затем округлить найденное решение до ближайшего дискретного. Однако такой подход не всегда приемлем, так как из-за дискретности множества D_z область допустимых решений получается несвязной и невыпуклой.

На рис. 2.10 показана схема задачи линейного программирования, на которую наложены условия целочисленности переменных. При пренебрежении целочисленностью допустимая область решений заштрихована линиями, которые одновременно являются линиями равного уровня целевой функции. Оптимальное решение в этом случае достигается в точке А. При наложении условий целочисленности D_z определяется узловыми точками пунктирной «решетки», принадлежащими заштрихованной области. Точка А уже является недопустимой. Из ближайших целочисленных точек В, В, Г, Д допустимой является только точка Д. Однако округление до точки Д неправильно, так как наилучшее решение достигается в точке Е. Поэтому применение линейного программирования с последующим округлением оптимального решения в данном примере недопустимо.

Хорошо приспособлены к решению дискретных задач методы прямого перебора и динамического программирования. Более того, эти методы легче реализуются при дискретном характере переменных из-за отсутствия необходимости табулирования непрерывных функций.

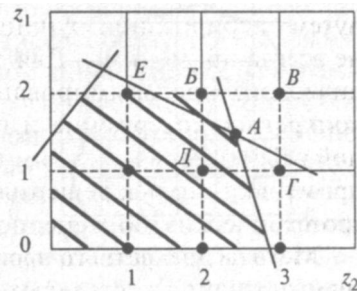


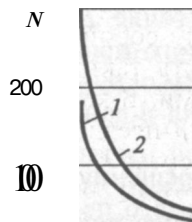
Рис. 2.10. Схема целочисленной задачи линейного программирования

Методы перебора базируются на стремлении «обозреть» допустимое множество D для выявления точки (точек) Z^* , в которой функция H_0 достигает максимального (минимального) значения, т. е. точки (точек), определяющей решение задачи D . Обзор множества D путем перебора и сравнения отдельных точек многомерного пространства параметров z . Z осуществляется по-разному, в связи с чем методы перебора делятся на упорядоченные и случайные. Типичными примерами этих методов являются соответственно метод обхода узловых точек **p -мерного** пространства и метод статистических испытаний (Монте-Карло).

Метод обхода узловых точек организует перебор следующим образом. В пространстве переменных z_n ($n = 1, \dots, p$) выделяется **p -мерная** прямоугольная область, которая полностью включает в себя множество D и образуется условиями

$$a_{n \text{ min}} < z_n \leq a_{n \text{ max}}, \quad n = 1, \dots, p. \quad (2.97)$$

Допустимый диапазон (2.97) табулируется с равномерным шагом Δz_n . Через табулированные точки проводятся плоскости, перпендикулярные соответствующим осям **p -мерного** пространства, т. е. исходный параллелепипед разбивается «решеткой» на ряд элементарных параллелепипедов со сторонами, соответственно равными Δz_n . Подобное разбиение для случая двух переменных показано на рис. 2.11, а. После разбиения в заданной последовательности обходятся узловые точки решетки, в каждой из которых вычисляется значение H_0 и проверяются ограничения на область поиска. Значения H_0 попарно сравниваются и запоминаются точки с лучшим значением H_0 . Те точки, для которых ограничения не удовлетворяются, оказываются вне множества D_z и исключаются из рассмотрения. После обхода всех узловых точек в памяти сохраняется точка с



а

б

0,1

Рис. 2.11. Характеристики перебора:

а — выделение узловых точек; б — зависимости $N(D)$ при $q = \text{const}$; 1 и 2 — упорядоченный и случайный переборы

наилучшим значением H_0 , которая соответствует решению задачи с точностью, определяемой элементарными параллелепипедами.

В понятии «точность» следует различать два аспекта: точность в определении параметров, т. е. оптимальной точки, и точность вычисления оптимального значения H_0^* . Если погрешность поиска оптимальных значений параметров z_n^* однозначно определяется выбором Δz_n , то точность вычисления $H_{0\max}(H_{0\min})$ остается неопределенной ввиду незнания действительных оптимальных значений H_0^* . Поэтому точность методов перебора обычно характеризуется объемом погрешности Δ , представляющей объем элементарного параллелепипеда в относительных единицах. Переход к относительным единицам совершается путем переноса начала координат p -мерного пространства и введения масштабных коэффициентов, преобразующих условия (2.97) к условию

$$0 \leq k_{m n} \leq 1. \quad (2.98)$$

Таким образом, исходный параллелепипед преобразуется в p -мерный куб с ребром единичной длины. Увеличение точности поиска требует соответствующего уменьшения всех Δz_n .

Время полного перебора прямо пропорционально полному числу узловых точек, определяемых произведением

$$N = \prod_{n=1}^p \frac{a_{n \max} - a_{n \min}}{\Delta z_n}. \quad (2.99)$$

Процесс случайного перебора методом Монте-Карло аналогичен описанному упорядоченному перебору с тем лишь отличием, что узловые точки выбираются случайным образом. Для этого при решении задач на ЭВМ используются специальные программы и устройства для выработки псевдослучайных чисел с равномерным законом распределения на интервале $[0, 1]$. Псевдослучайными называются числа, имеющие между собой слабую корреляционную зависимость. Последовательность таких чисел образуется особыми рекуррентными соотношениями. В каждом цикле работы программы или устройства выдается p псевдослучайных чисел, которые с учетом масштабных коэффициентов $k_{m n}$ принимаются соответственно в качестве координат узловой точки. Число узловых точек N определяется числом циклов выдачи псевдослучайных чисел.

В данном случае ввиду случайного характера объемная погрешность поиска Δ является вероятностной, причем вероятность q зависит от числа случайных выборов N . Связь между Δ , q , N определяется формулой [28]

$$q = 1 - (1 - \Delta)^N, \quad (2.100)$$

где $(1 - \Delta)$ — вероятность непопадания в объем Δ для одной случайной точки; $(1 - \Delta)^N$ — вероятность того же для N случайных точек.

С помощью (2.100) легко рассчитать число случайных точек N , которое требуется для ведения поиска с заданной вероятной точностью. В табл. 2.1 приведены значения N в зависимости от q и Δ .

Таблица 2.1

Δ	N при q , равном			
	0,8	0,9	0,95	0,99
0,10	16	22	29	44
0,05	32	45	59	90
0,025	64	91	119	182
0,01	161	230	299	459
0,005	322	460	598	914
0,001	—	—	—	4605

Относительная точность определения оптимальных значений определяется через объемную точность

$$\Delta z_n = \sqrt[p]{\Delta}. \quad (2.101)$$

Сравнение методов упорядоченного и случайного перебора целесообразно провести по времени поиска (числу N), так как точностью поиска обычно желательно задаваться **заранее**. Преобразуя (2.99) и (2.100) и пользуясь (2.101), получаем следующие выражения N для упорядоченного и случайного перебора:

$$N_{\text{уп}} = (1 / \Delta z_n^*)^p = 1 / \Delta; \quad (2.102)$$

$$N_{\text{сл}} = \frac{\lg(1 - q)}{\lg[1 - (\Delta z_n^*)^p]} = \frac{\lg(1 - q)}{\lg(1 - \Delta)} \approx \left| \frac{\ln(1 - q)}{\Delta} \right|. \quad (2.103)$$

Эти уравнения показывают, что в обоих случаях при заданной объемной точности Δ число N не зависит от числа переменных p . При этом в соответствии с (2.101) с увеличением p резко ухудшается линейная относительная точность Δz_n . На рис. 2.11, б даны кривые $N(\Delta)$, построенные согласно (2.102) и (2.103). Для случайного перебора принято $q = 0,8$. Даже при такой сравнительно низкой вероятности упорядоченный перебор требует анализа значительно меньшего количества точек, чем случайный. С увеличением q , как

показывает табл. 2.1, эта разница возрастает. Аналогичный результат получается, если вместо объемной точности задаваться линейной точностью Δz_n , которая непосредственно определяет относительную точность нахождения оптимальных значений переменных z_n . В табл. 2.2 даны результаты расчета уравнений (2.102) и (2.103) при $\Delta z_n = 0,01$ и различных p .

Таблица 2.2

Число испытаний	Результаты расчета уравнений при p , равном			
	1	2	3	4
$N_{yn} (q = 1)$	10^2	10^4	10^6	10^8
$N_{cn} (q = 0,99)$	$\sim 4,6 \cdot 10^2$	$\sim 4,6 \cdot 10^4$	$\sim 4,6 \cdot 10^6$	$\sim 4,6 \cdot 10^8$
$N_{cn} (q = 0,8)$	$\sim 1,7 \cdot 10^2$	$\sim 1,7 \cdot 10^4$	$\sim 1,7 \cdot 10^6$	$\sim 1,7 \cdot 10^8$

Таблица 2.2 показывает, что и в этом случае более предпочтителен упорядоченный перебор.

Таким образом, при одинаковой объемной и линейной точности поиска упорядоченный перебор предпочтительнее по сравнению со случайным перебором. Однако в некоторых случаях, когда поверхность целевой функции H_0 вблизи оптимума пологая, а точность определения оптимальных значений параметров z_n не имеет значения, метод Монте-Карло может быстрее привести к оптимуму.

Из методов динамического программирования для решения дискретной задачи в общем случае применима вычислительная схема, основанная на полной системе функциональных уравнений, предназначенная для отыскания глобального оптимума. Так же как и при прямом переборе, дискретные значения переменных на каждом этапе задаются условиями (2.96), что обеспечивает сходимость к точному решению.

Среди специальных методов дискретного программирования одним из наиболее общих и распространенных является *метод ветвей и границ*. Идея этого метода заключается в следующем. Каким-либо образом устанавливается нижняя (верхняя) граница $\min(\max)H_0$, т. е. оптимального решения задачи. Применительно к задачам минимизации это равносильно введению условия

$$H_0(\mathbf{Z}) \geq \Gamma(D_z), \quad (2.104)$$

где $\Gamma(D_z)$ — числовое значение границы в зависимости от допустимого множества D_z .

Если в D_z удастся найти решение \mathbf{Z}^* , для которого неравенство (2.104) превращается в равенство, то задача считается решенной; если нет, то множество D_z разбивается на ряд непересекающихся подмножеств:

$$D_z = D_z^1 U D_z^2 U \dots U D_z^p. \quad (2.105)$$

Для каждого подмножества снова отыскивается значение $\Gamma(D_z^k)$. Очевидно, что

$$\Gamma(D_z^k) \geq \Gamma(D_z), \quad k = 1, \dots, p. \quad (2.106)$$

Для дальнейшего исследования отбирается подмножество (или **подмножества**), для которого неравенство (2.106) превращается в равенство. В пределах выделенного подмножества (подмножеств) ведется поиск соответствующего оптимального решения. Если найденный

$$\min H_0(Z) = \Gamma(D_z), \quad (2.107)$$

то задача считается решенной; если нет, то выделенное перспективное подмножество (**подмножества**), в свою очередь, снова разбивается на ряд подмножеств и процедура поиска продолжается аналогичным образом до тех пор, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее (2.107). Процесс разбиения на подмножества (процесс ветвления) показан на рис. 2.12. Благодаря ветвлению количество исследуемых точек D последовательно уменьшается, что сокращает объем перебора вариантов решения.

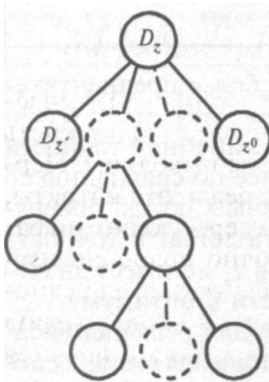


Рис. 2.12. Схема дискретного программирования

Разновидностью метода ветвей и границ можно считать *метод последовательного конструирования, анализа и отбора вариантов*, идея которого очень проста. Сначала устанавливается произвольная допустимая точка D_z , т. е. допустимый вариант решения задачи.

Затем строится последовательность вариантов таким образом, чтобы каждый последующий был не хуже предыдущего по значению целевой функции. Эта последовательность в конце концов сходится к оптимальному решению задачи. Основная сложность метода заключается в разработке правил доминирования, определяющих выбор последовательности вариантов. Эти правила пока также разработаны для частных случаев.

Таким образом, во всех достаточно общих случаях использование в том или ином виде идей упорядоченного перебора или динамического программирования является обязательным для решения дискретных задач.

Г Л А В А 3

Моделирование объектов и процессов проектирования

§ 3.1. Развитие методов и средств моделирования

Процесс проектирования базируется на предварительном моделировании объектов проектирования. Модели объектов могут иметь самую различную форму: рисунки, схемы, расчеты и таблицы. Первоначально в качестве моделей использовались реальные объекты, близкие к проектируемым по тем или иным интересующим параметрам и показателям. Их можно было достаточно подробно изучить и внести в проектируемый объект изменения, которые предположительно привели бы к желаемой цели. Такой подход получил название метода *физического моделирования*. Этот метод отличается универсальностью, но его практическое применение сильно ограничено из-за необходимости выбора реальных аналогов, особенно в тех случаях, когда требуется разработка объектов принципиально нового типа. Поэтому физическое моделирование сделало в своем развитии следующий шаг. Начали создаваться специальные физические **аналоги**, воссоздающие лишь частичное (неполное) сходство с объектом проектирования. В области электротехники таковыми стали расчетные столы постоянного и переменного тока, появившиеся в 30-х годах XX в. Одновременно стала развиваться теория подобия, формулирующая условия (критерии) подобия, которые гарантируют аналогию между реальными и проектируемыми физическими процессами [29].

Расчетные столы представляли собой сложные электрические схемы, собираемые из типовых элементов (резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов и т. д.). Эти схемы и служили частичной аналогией проектируемых физических процессов. Несмотря на гибкость сборки и перенастройки расчетных столов, их практичес-

кое использование тоже оказалось достаточно ограниченным в силу большой трудоемкости сборки схем-аналогов, их громоздкости и, самое главное, отсутствия конструктивного подобия между аналогом и проектом. В дальнейшем моделирование ЭТС развивалось в основном в двух направлениях. Первое — создание электродинамических моделей, второе — создание аналоговых электрических моделей. *Электродинамические модели* строятся так, чтобы обеспечить подобие не только физических процессов, но и по возможности конструктивное подобие. Кроме этого, электродинамические модели имеют и ряд других важных преимуществ. Они могут моделировать механическое движение, включать в себя элементы реального объекта, например автоматические регуляторы, аппараты защиты и т. п. Это делает электродинамические модели универсальными и позволяет применять их не только на стадии проектирования, но и на стадии исследований и испытаний новых образцов.

Создание *аналоговых электрических моделей* уже выходит за рамки физического моделирования и открывает новое направление в моделировании — *математическое моделирование*. Аналоговые электрические модели создаются также на основе типовых электрических схем, но преследуют иную цель — обеспечить математическое подобие с объектом проектирования и исследования. Такие модели универсального назначения называются аналоговыми вычислительными машинами (**АВМ**). Таким образом, сходство процессов в модели и проектируемом либо исследуемом объекте достигается за счет подобия их математических описаний. Для моделирования необходимо сначала составить математические уравнения, которыми описывается проектируемый или исследуемый процесс, затем набрать их и решать на универсальных АВМ. Последние включают в себя стандартный набор элементов (электрических схем) типа сумматоров, усилителей, синтезаторов и т. п. С их помощью выполняются арифметические операции суммирования (вычитания), умножения (деления) и ряд операций высшей математики, такие, как, например, интегрирование (дифференцирование), двоичная логика (И, ИЛИ) и им подобные.

К преимуществам аналоговых моделей можно отнести: большое быстродействие, возможность решения относительно сложных систем уравнений, легкость варьирования параметров моделируемой системы, удобство наблюдения и регистрации процессов, компактность и т. п. Однако при аналоговом моделировании существуют определенные трудности: трудоемкость подготовки задачи, связанная с переводом исходной системы уравнений в машинные уравнения, масштабированием коэффициентов и т. д., а также невысокая

точность решений (погрешность доходит до 10%). В связи с этим аналоговые модели получили практическое применение для систем небольшой сложности. Тем не менее аналоговые модели интересны с точки зрения присущей им двойственности. С одной стороны, они обеспечивают только математическое подобие процессов. С другой стороны, они реализуются в виде физических процессов в элементах АВМ, которые также собираются с помощью резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Эта двойственность определяет положение аналоговых моделей как переходных от физических моделей к математическим.

Чисто математическое моделирование ограничивается формулировкой критериев подобия и анализом двух разных систем уравнений. Наиболее универсальным средством математического моделирования являются ЭВМ, позволяющие решать практически любого типа системы уравнений очень высокой сложности. Однако и здесь имеется своя существенная особенность. Арифметический характер операций в ЭВМ требует преобразовать уравнения, описывающие непрерывные процессы, в уравнения дискретных аналогов этих процессов. Например, дифференциальные уравнения следует преобразовать в простые алгебраические, которые можно решать численными методами с различной степенью точности. Таким образом, чисто математическое моделирование можно реализовать в тех случаях, когда исследуемые системы уравнений имеют замкнутые решения в явном виде и алгебраической форме. Как правило, это очень простые случаи, решаемые нередко вручную и не требующие применения ЭВМ. Во всех остальных случаях необходимо непрерывные процессы аппроксимировать дискретными аналогами, чтобы получать численные решения на ЭВМ. Поэтому моделирование с помощью ЭВМ часто называют цифровым моделированием в отличие от математического моделирования.

Из рассмотренных типов моделей, воспроизводящих интересные процессы, наиболее эффективными являются *гибридные модели*, использующие преимущества физических и математических моделей в отдельности и компенсирующие их недостатки. В настоящее время гибридные модели на базе электродинамических моделей и ЭВМ получили наиболее широкое применение как в большой, так и в малой электроэнергетике в виде универсальных автоматизированных экспериментальных комплексов. В этих комплексах обеспечиваются физическая аналогия моделируемых процессов, автоматический съем и обработка результатов испытаний, гибкая смена параметров и элементов аппаратного типа, установка режимов испытаний и т. д. Более того, при моделировании транспортных и

других автономных систем с малогабаритными источниками и приемниками электроэнергии практически допустима смена любых элементов системы и гибкая вариация как параметров, так и структуры системы.

Несмотря на указанные преимущества, область применения автоматизированных экспериментальных комплексов ограничивается в основном всесторонним обследованием опытных образцов систем и их элементов. На стадии проектирования, особенно в САПР, предпочтение отдается цифровым моделям исходя из ряда известных соображений: общность средств проектирования и моделирования, информационной базы данных на всех этапах проектирования, большое быстродействие и высокая точность расчетов современных ЭВМ, широкие возможности наглядного, графического представления моделируемых процессов и т. п. Одними из первых цифровые модели начали создаваться и внедряться в практику авиационных электросистем.

Как уже указывалось, специфика ЭВМ придает цифровым моделям многокомпонентный, многослойный характер, определяемый последовательностью их составления, а именно:

- исходное (первичное) математическое описание процесса (для электрических систем в общем случае в виде системы дифференциальных уравнений);
- получение вторичной системы разностных уравнений путем преобразования первичной системы;
- выбор численных методов расчета разностных уравнений на ЭВМ;
- разработка программ и выбор технических средств, автоматически реализующих многие процедуры цифрового моделирования.

§ 3.2. Системный подход к моделированию

Системный подход к моделированию состоит в декомпозиции (расчленении) сложных систем на ряд подсистем, которые легче поддаются изучению. Рассматривая каждую подсистему в отдельности, не следует забывать о том, что она — часть исходной большой системы и связана с ней определенным образом. Иначе говоря, при автономном изучении подсистем необходимо учитывать требования, обусловленные связями части с целым. Составляя таким образом модели подсистем и объединяя их с помощью тех же связей, можно перейти к моделированию исходной системы в целом. Что касается выбора методов моделирования, то он неоднозначен и зависит от этапов проектирования. На начальных этапах проектиро-

вания используются простые модели, а по мере накопления проектной информации они все более и более усложняются. Множество моделей объектов проектирования типа ЭТС целесообразно разбить на три подмножества: модели эскизного проекта, модели технического проекта и модели рабочего проекта. Подробнее рассмотрим их на примере модели-

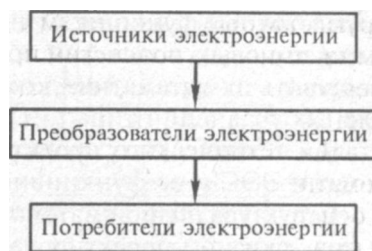


Рис.3.1. Простейшая блок-схема ЭЭС

рования самолетных электроэнергетических систем (ЭЭС).

На стадии *эскизного проекта* самолетных ЭЭС обычно пользуются графическими моделями, которые изображаются направленными графами и упрощенными блок-схемами. В самом общем и простом виде эта модель показана на рис. 3.1. Здесь всего три условных блока (подсистемы):

- 1) блок, объединяющий все источники электроэнергии;
- 2) блок, объединяющий все преобразователи электроэнергии из одного вида в другой;
- 3) блок, объединяющий всех потребителей электроэнергии (блок **нагрузок**).

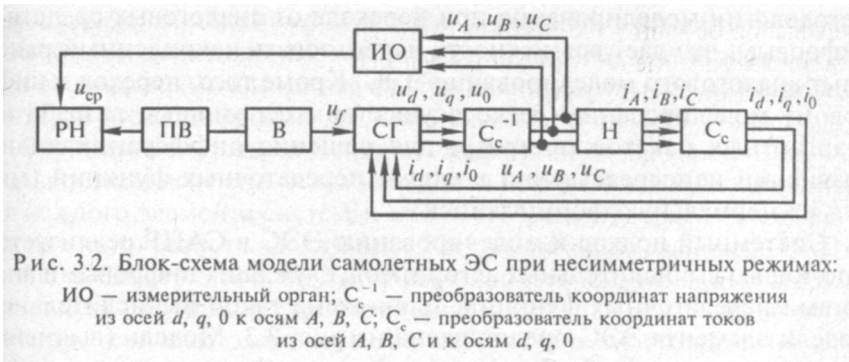
Электроэнергия в ЭЭС передается в направлении от источников к потребителям (сверху вниз на рисунке). Поэтому структура модели соответствует иерархическому расположению блоков по вертикали. Число иерархических уровней может меняться в зависимости от количества подсистем. Если в модель включать дополнительные подсистемы ЭЭС, охватывающие, например, линии передач от уровня к уровню, то общее число уровней будет равно пяти. Структурные соединения между элементами соседних уровней (верхнего и нижнего) можно изобразить ключами с двумя положениями (включен и выключен). Если ключ включен, то соответствующее соединение существует, в противном случае его нет. Более детально графические модели ЭЭС с иерархической структурой рассмотрены в гл. 4—6.

На стадии *технического проекта* предварительная информация об основных технико-экономических показателях элементов ЭЭС уже имеется. Теперь требуется оценить функциональные свойства системы и ее отдельных элементов. Поэтому декомпозиция ЭЭС делается с помощью таких структурных блоков, которые могут характеризовать их в функциональном плане, т. е. отражать динамику физических процессов. В качестве функциональных блоков широко применяются известные из теории автоматического управления

передаточные функции. Однако чтобы получить передаточные функции типовых подсистем и элементов ЭЭС, необходимо сначала составить их математическое описание на базе систем дифференциальных уравнений типа (2.1), (2.2). Таким образом, для реализации стадии технического проектирования ЭЭС нужны математические модели ЭЭС и ее функциональных составляющих.

Структура полной математической модели ЭЭС по-прежнему, как и при эскизном проектировании, определяется физической сущностью системы (направлениями передачи энергии или сигналов). Выбор математических моделей функциональных составляющих производится исходя из тех требований, которые предъявляются к изучению физических процессов и режимов. Если требуемая модель отсутствует, то ее следует разработать с помощью одного из описанных ниже методов. Чтобы стало понятнее, о чем идет речь, можно привести пример с токами и напряжениями. Проектировщики интересуются фактической динамикой фазных токов и напряжений. Однако с целью упрощения часто в математических моделях ряда элементов ЭЭС осуществляют замену реальных фазных координатных осей искусственно принятыми по тем или иным соображениям осями координат. Например, в теории электрических машин принято пользоваться переходом от фазных координат к ортогональным осям, жестко привязанным к вращающемуся ротору. К сожалению, искусственно введенные ортогональные оси пригодны в основном для исследования симметричных режимов и процессов. Чтобы рассмотреть интересующий проектировщиков спектр процессов полностью и в то же время воспользоваться преимуществами моделей в ортогональных осях, надо иметь обе модели и менять их при необходимости.

Наличие разных систем координат для переменных требует особого внимания при стыковке функциональных блоков полной математической модели ЭЭС. В уравнениях, связывающих соседние блоки, необходимо предусмотреть возможность согласования их «**ВХОДОВ—ВЫХОДОВ**». В общем случае для стыковки несогласуемых блоков надо включить в полную модель ЭЭС специальные искусственные блоки «математической стыковки». В качестве примера на рис. 3.2 приведена модель простой трехфазной системы питания несимметричной нагрузки регулируемым по напряжению синхронным генератором. Последний моделируется с помощью математических блоков описаний трехфазного синхронного генератора, его возбuditеля и подвозбудителя, регулятора напряжения и измерительного органа. Все эти элементы смоделированы в ортогональных координатных осях, а активно-индуктивная нагрузка — в фазных осях координат. Для математической стыковки координатных систем вве-



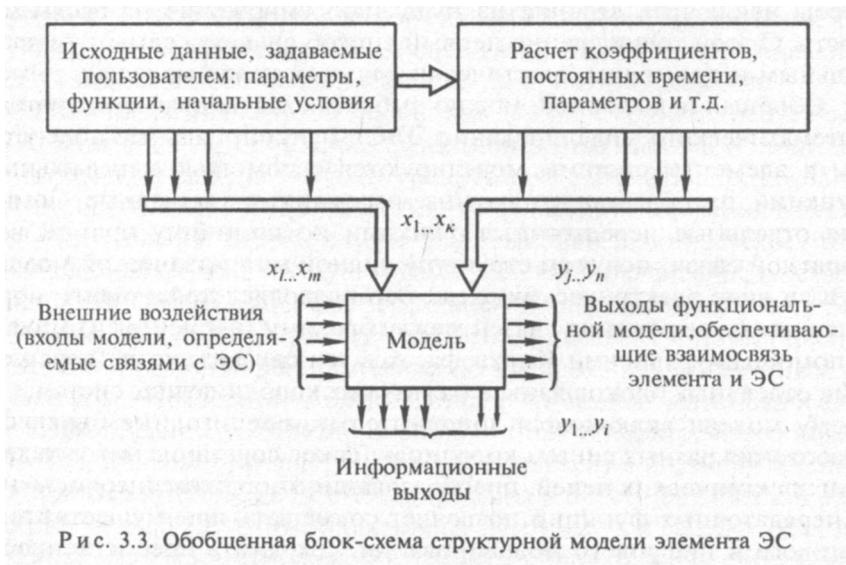
дены два специальных блока, преобразующих переменные из одной системы координат в другую.

Режимы работы функциональных математических моделей ЭЭС можно менять двояко. Один способ, уже известный и применяемый в графических моделях, — это логические ключи, встраиваемые в структурную схему. Второй способ — дискретное изменение параметров тех или иных элементов системы. Надо отметить, что второй способ достаточно ограничен и практически пригоден лишь при малом числе параметров и условии, когда параметры не принимают значения нуль или бесконечность. Если сопротивление нагрузки становится, например, равным нулю (разрыв цепи нагрузки), то уравнения оставшейся части системы должны быть записаны так, чтобы исключить деление на нуль либо умножение на бесконечность. С этой точки зрения первый способ является самым универсальным и применим практически для всех типов моделей.

Обобщая изложенное, можно выбрать следующую методологию математического моделирования ЭЭС. Функциональные подсистемы и элементы системы моделируются с помощью передаточных функций, преобразующих входные переменные в выходные. Соединяя отдельные передаточные функции по принципу прямой или обратной связи, получим структуру полной математической модели ЭЭС в виде электрических схем. Это позволяет представить математические выражения связей между блоками (элементами) модели с помощью уравнений Кирхгофа. А в тех случаях, когда переменные отдельных блоков даны в различных координатных системах, в схему модели включаются дополнительно специальные блоки согласования разных систем координат. Такое сочетание методов теории электрических цепей, преобразования координат (переменных) и передаточных функций позволяет совмещать преимущества аналогового и цифрового моделирования, сохранить преимственность

методологии моделирования при переходе от аналоговых средств к цифровым, что дает возможность использовать накопленный ранее опыт аналогового моделирования ЭЭС. Кроме того, переход к цифровому моделированию легко осуществим с помощью разработки стандартных пакетов программ для решения дифференциальных уравнений непосредственно в форме передаточных функций (минуя их нормальную форму записи).

Системный подход к моделированию ЭЭС в САПР реализуется с помощью вычислительных алгоритмов, служащих цифровыми аналогами передаточных функций. Блок-схема такой вычислительной модели элемента ЭЭС представлена на рис. 3.3. Модель (вычислительный алгоритм) обрабатывает информацию, полученную от совокупности входных переменных, и преобразует ее в информацию, которую несут выходные переменные. Предполагается, что переменные на входе уже представлены в той системе координат, которая принята для данной модели, а выходные переменные могут быть выражены в других системах координат. Выбор координат для выходных переменных определяется моделями тех элементов, к которым они направлены. Поэтому одни и те же выходные переменные могут выражаться в разных системах координат. Разделение входных воздействий на внешние воздействия и исходные данные является достаточно условным и зависит от структуры полной модели системы и связей с другими элементами. Такой же условный характер носит разделение выходных сигналов на информационные и

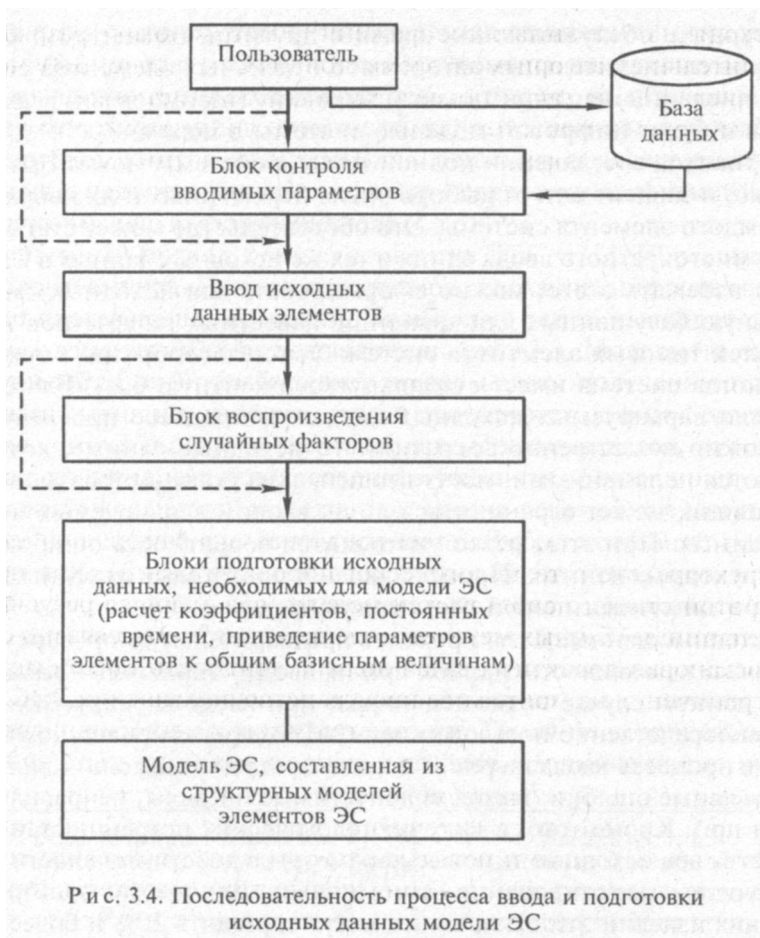


структурные, обслуживающие связи с другими элементами. Совокупность вычислительных алгоритмов отдельных элементов совместно с численными алгоритмами «стыковки» (взаимосвязи) всех элементов и будет цифровой моделью системы в целом.

Вариантов составления полной модели системы может быть несколько, и зависят они от выбора числа переменных и их координат для каждого элемента системы. Это обстоятельство может стать причиной многократного ввода одних и тех же исходных данных в САПР. Чтобы избежать этого, можно сформировать для исходных данных отдельную базу данных для хранения известных параметров и показателей типовых элементов систем. Это целесообразно в тех случаях, когда система имеет стабильную элементную базу. Благодаря ей число варьируемых исходных данных в процессе проектирования можно существенно сократить. Те исходные данные, которые считаются неизменными, могут вводиться из указанной базы, а проектировщик может ограничиться лишь вводом варьируемых исходных данных. При этом резко уменьшится вероятность ошибок при вводе исходных данных. Процесс ввода и подготовки исходных данных при наличии типовой базы показан на рис. 3.4.

Исходные данные базы проходят предварительную проверку, что исключает возможность ошибок при их вводе. Ошибочный ввод данных в данном случае возможен только при вводе варьируемых данных непосредственно пользователем САПР (проектировщиком). Поэтому в процессе ввода на рис. 3.4 предусмотрен контроль, «фильтрующий» явные ошибки (выход за допустимые пределы, неправильный знак и пр.). Кроме того, в силу технологических погрешностей производства все исходные типовые параметры в действительности имеют значительные отклонения от номиналов. Для многих электротехнических изделий эти отклонения могут составить 20% и более. Поэтому желательно оценить влияние на проект не только правильных исходных данных, но и влияние их возможных отклонений от номинальных значений. С этой целью на рис. 3.4 введен блок воспроизведения случайных факторов, который моделирует отклонения в соответствии с двумя типами распределения вероятностей ошибок: нормальным (распределение по Гауссу) и равномерным. Только после указанных проверок возможен переход к непосредственной подготовке всех исходных данных, необходимых для моделирования.

Математические модели и вычислительные алгоритмы включают большое число данных, которые в процессе вычислений остаются неизменными (коэффициенты уравнений, постоянные времени и т. д.). Эти данные также можно заранее вычислить и хранить в базе данных вместе с типовыми исходными данными. Это позво-



лит, с одной стороны, освободить проектировщика от большого объема необходимых вычислений и ввода соответствующей информации, что чревато дополнительными ошибками, а с другой стороны, более рационально составить вычислительные программы, освободив их от многократных повторных расчетов и сэкономив тем самым машинное время ЭВМ. При подготовке исходных данных следует также учесть возможность быстрой перенастройки моделей, когда необходимо изменять типономиналы тех или иных элементов системы, например мощности, напряжения, род тока, частоту, число фаз и др. Нужно также предусмотреть возможность быстрой смены задаваемых режимов работы (изменения нагрузки, холостой ход, короткое замыкание и т. п.).

Исходя из указанных соображений, методологию разработки вычислительных алгоритмов элементов ЭТС (см. рис. 3.3) можно представить в виде такой последовательности действий:

- 1) выбор электрической схемы модели элемента системы;
- 2) составление логико-математического описания модели;
- 3) выбор системы координат и их необходимых преобразований;
- 4) выбор режимов функционирования и структурных вариаций модели;

5) составление вычислительных алгоритмов и программ расчета.

Моделирование всех отдельных элементов завершается **МОДЕЛИРОВАНИЕМ** системы в целом. С этой целью составляются структурная схема системы и уравнения связи между элементами. При составлении полной модели также учитываются требования по режимам работы и соответствующие вариации структуры. Конкретные примеры моделирования физических процессов достаточно детально рассмотрены в гл. 7 и 8.

Самые сложные модели требуются на заключительной стадии конструкторского и технологического проектирования. Как правило, на этой стадии используются модели, являющиеся результатом комбинации различных методов **МОДЕЛИРОВАНИЯ**. Это связано с тем, что постановка проектных задач должна учитывать такие факторы, как ограничения на монтажное пространство размещения ЭЭС, дискретность и табличную форму задания многих искомых проектных данных, логико-математические условия их выбора и др. Поэтому при составлении проектных моделей приходится сочетать рассмотренные выше методы графического, схемного и математического моделирования с такими методами, как геометрическое, логическое и табличное моделирование. Конкретные примеры комбинированных проектных моделей приведены в гл. 9 и 10.

§ 3.3. Теоретические методы моделирования

Методы теоретической электротехники делятся на две большие группы: методы *теории цепей* и методы *теории поля*. Первая группа базируется на уравнениях Кирхгофа, которые отражают зависимости между напряжениями и токами в контурах и узлах электрических схем, а вторая группа — на уравнениях Максвелла, связывающих векторы магнитной и электрической напряженности, индукции, смещения и плотности тока в произвольной точке электромагнитного поля. Рассмотрим все эти методы на примере моделирования одной из самых сложных ЭТС — электрической машины (ЭМ), принцип действия которой основан на взаимодействии электрических цепей

и электромагнитного поля. При математическом моделировании ЭМ обычно **ограничиваются** классом цепей, которые взаимно вращаются и связаны друг с другом посредством электромагнитного поля. Параметры элементов электрических и магнитных цепей могут иметь нелинейные характеристики, но обязательно являются сосредоточенными. С помощью электрических цепей активно-индуктивного типа (цепи типа $R-L$) моделируются обмотки ЭМ, а с помощью магнитных цепей — **магнитопроводы ЭМ**.

Количество цепей, их детализация и взаимная ориентация, а также взаимодействие между ними конкретизируются для каждого типа ЭМ в отдельности. Благодаря взаимному вращению и нелинейности уравнения таких цепей получаются в общем случае нелинейными и кроме производных и интегралов включают периодические коэффициенты времени. Подобные уравнения во многих случаях недоступны не только аналитическим, но даже численным методам решения с применением ЭВМ. Поэтому как в теоретическом, так и вычислительном плане имеется необходимость в таких преобразованиях общих уравнений ЭМ, которые существенно облегчают процесс решения при сохранении требуемой общности и точности полученных результатов.

Наиболее мощные методы преобразования уравнений с периодическими коэффициентами в теории вращающихся электрических цепей объединены под названием *преобразование координат*.

Смысл преобразования координат заключается в замене переменных и переходе от исходных уравнений к новым уравнениям, которые сравнительно просто решаются стандартными методами. При этом модель ЭМ в виде системы взаимодействия цепей преобразуется к модели в виде системы условно неподвижных цепей. Принципиальная возможность преобразования координат устанавливается известной в теории дифференциальных уравнений и устойчивости теоремой Ляпунова. По этой теореме *система дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами эквивалентна некоторой системе дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, которые могут быть не только вещественными, но и комплексными*.

Следовательно, при постоянной частоте вращения и пренебрежении насыщением уравнения ЭМ с периодическими коэффициентами можно преобразовать к линейным дифференциальным уравнениям с постоянными коэффициентами, которые легко решаются хорошо известными методами. При переменной частоте и учете насыщения преобразования не исключают нелинейные члены в уравнениях. Однако и в этом случае переход от периодических коэффициентов к постоянным часто оказывается выгодным. Таким обра-

зом, хотя преобразования уравнений не всегда приводят к общим правилам их решения, все же оказываются весьма полезными при решении многих конкретных задач.

Несмотря на принципиальную важность, теорема Ляпунова не дает формальных правил **преобразования** уравнений с периодическими коэффициентами. Поэтому для выбора новой координатной системы (новых переменных) используется дополнительная информация в виде условия неизменности (инвариантности) процессов электромеханического преобразования энергии и энергетических соотношений относительно координат. Совместный учет математических условий преобразования и дополнительной информации в некоторых случаях делает выбор новой координатной системы однозначным. Иногда же выбор осуществляется путем сравнительного анализа ряда возможных координатных систем.

Для более конкретного представления характера действий, связанных с преобразованием координат, рассмотрим простейший пример симметричной явнополюсной синхронной машины с возбуждением постоянным током и без демпферных контуров при условии синусоидальности фазных токов. Идеализированная модель такой машины представлена схемой на рис. 3.5, а. Исходная система ко-

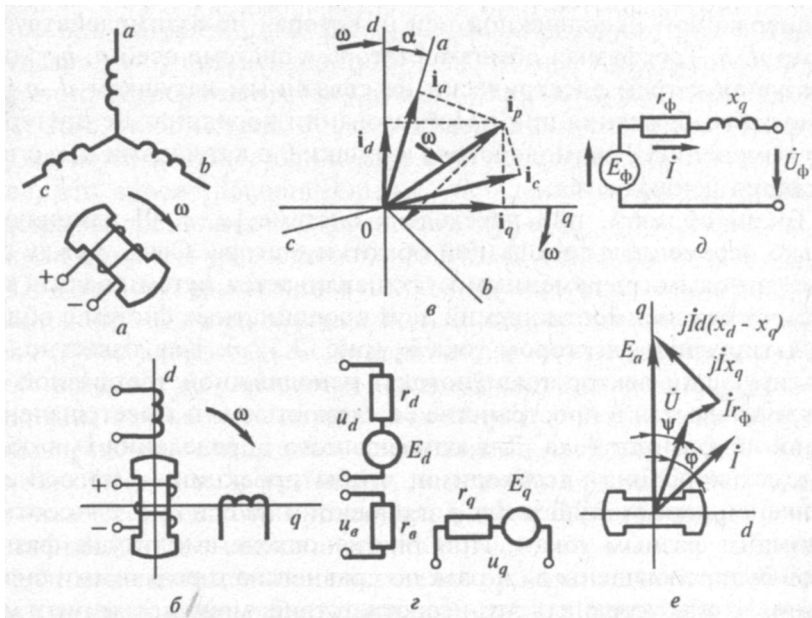


Рис. 3.5. Схемы замещения и векторные диаграммы ЭМП

ординат геометрически интерпретируется осями обмоток, т. е. на статоре неподвижная трехосная система координат, а на роторе — вращающаяся одноосная.

При выборе новой координатной системы следует учесть, что:

1) количество переменных (координат) при линейных преобразованиях остается неизменным;

2) новые переменные и коэффициенты желательно получить вещественными;

3) процесс электромеханического преобразования энергии определяется взаимодействием результирующих электромагнитных полей статора и ротора, оси которых не совпадают друг с другом;

4) в силу допущений о линейности идеализированных моделей существует прямая пропорциональность между значениями магнитных полей, токов и напряжений;

5) результирующий баланс мощности между обмотками статора и ротора должен быть неизменным в любой системе координат [30].

С учетом этих требований можно утверждать, что для рассматриваемого примера существует только одно преобразование координат, новая форма которых представлена на рис. 3.5, б. Новая система состоит из двух ортогональных осей d, q , жестко закрепленных на роторе и вращающихся вместе с ним со скоростью ω , и изолированной неподвижной оси 0 , которая не взаимодействует с осями d, q . Трехфазная обмотка статора в системе осей a, b, c преобразуется к трем электрически не связанным катушкам d, q и 0 . Обмотка возбуждения при преобразовании координат не претерпевает изменений. Взаимодействие катушки 0 с катушками d, q и возбуждения исключается.

Таким образом, при переходе к системе $[d, q, 0]$ изменяются только переменные трехфазной обмотки статора. Связь между старыми и новыми переменными устанавливается путем анализа геометрических взаимоотношений двух координатных систем с общим результирующим вектором тока \mathbf{i}_p (рис. 3.5, в). Как известно, результирующий вектор тока (потока) неподвижной трехфазной обмотки вращается в пространстве со скоростью ω и имеет значение, равное $\sqrt{3/2}$ фазного тока. Для однозначного определения \mathbf{i}_p в обеих системах координат необходимо, чтобы проекции \mathbf{i}_p на оси d, q равнялись токам катушек d и q , а проекции на оси a, b, c — соответствующим фазным токам. При таком подходе амплитуды фазных токов будут завышены в $\sqrt{3/2}$ раза по сравнению с реальными значениями. Чтобы устранить это несоответствие, **МОЖНО** изменить масштабы либо результирующего, либо фазных токов.

Если изменить масштаб i_p , принять угол α между вращающейся и неподвижной координатными системами равным ωt , то исходя из рис. 3.5, σ можно получить уравнения связи между токами в исходной и новой системах координат:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= (2/3)[i_a \cos \omega t + i_b \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_c \cos(\omega t - 4\pi/3)]; \\ i_q &= (2/3)[i_a \sin \omega t + i_b \sin(\omega t - 2\pi/3) + i_c \sin(\omega t - 4\pi/3)]; \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_d \cos \omega t + i_q \sin \omega t; \\ i_b &= i_d \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_q \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ i_c &= i_d \cos(\omega t - 4\pi/3) + i_q \sin(\omega t - 4\pi/3). \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

В симметричных режимах работы ток $i_0 = 0$, т. е. катушка O является излишней в преобразовании координат. Необходимость в ней появляется только в несимметричных режимах. В целом уравнения типа (3.1) и (3.2) позволяют осуществлять замену переменных при переходе из одной координатной системы в другую.

Преимущество эквивалентной модели в системе координат $[d, q, 0]$ заключается во взаимной неподвижности и строго фиксированном положении катушек, токи которых взаимодействуют друг с другом. Благодаря этому индуктивности L_{nj} и их частные производные по углу взаимного расположения катушек $\partial L_{nj}/\partial \alpha$ становятся постоянными. Более того, токи катушек d, q , отображающих трехфазную обмотку a, b, c , являются знакопостоянными в отличие от периодических фазных токов, что вносит дополнительные упрощения в процесс решения. Подставляя постоянные коэффициенты L_{nj} и $\partial L_{nj}/\partial \alpha$ в уравнения динамики, получаем уравнения эквивалентной модели в осях d, q .

При выборе уравнений в осях d, q следует иметь в виду, что исходная трехфазная обмотка a, b, c перемещается относительно этих осей со скоростью ω . Поэтому эквивалентные трехфазной обмотке катушки d, q являются псевдонеподвижными, т. е. они неподвижны только в геометрическом смысле относительно осей d, q . В физическом же смысле они сохраняют все свойства исходной трехфазной обмотки и, в частности, допускают как ЭДС трансформации (за счет токов соосных катушек), так и ЭДС вращения (за счет токов ортогональных катушек).

Учитывая изложенное, для рассматриваемого примера ЭМ в генераторном режиме работы можно получить известные уравнения Парка—Горевая в системе координатных осей q, d [31]:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -r_d i_d - x_d p i_d + x_{ad} p i_n - \omega x_{aq} i_q; \\ u_q &= -r_q i_q - x_q p i_q - \omega x_d i_d + \omega x_{ad} i_n; \\ u_n &= r_n i_n + x_n p i_n - x_{ad} p i_d; \\ M &= Jp\omega + k_{тр}\omega + [i_d x_q i_q - i_q (x_d i_d - x_{ad} i_n)], \end{aligned} \right\} (3.3)$$

где $r_d, x_d, r_q, x_q, r_n, i_n$ — активные и индуктивные сопротивления катушек d, q и возбуждения; x_{ad} — взаимное индуктивное сопротивление катушек по оси d ; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования по синхронному времени $\tau = \omega t$.

Уравнения (3.3) являются обычными дифференциальными уравнениями с вещественными постоянными коэффициентами, а в случае $\omega = \text{const}$ они становятся линейными. Решение подобных уравнений излагается в математических справочниках и не вызывает затруднений. Однако постоянство индуктивных сопротивлений в (3.3), достигнутое при пренебрежении насыщением, приводит к большим погрешностям в решении уравнений. Учет насыщения в осях d, q осуществляется проще, чем для исходной модели ЭМ (рис. 3.5, **a**). Обычно насыщение учитывается отдельно по каждой из осей d, q . Для этого вводятся новые переменные в виде собственных и взаимных потокосцеплений катушек, которые связываются с токами с помощью заданных функций насыщения.

В результате вместо (3.3) рассматриваются следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -r_d i_d - p\psi_d + \omega \psi_q; \\ u_q &= -r_q i_q - p\psi_q - \omega \psi_d; \\ u_n &= r_n i_n + p\psi_n; \\ M &= Jp\omega + k_{тр}\omega + (i_d \psi_d - i_q \psi_q); \\ \psi_d &= x_d i_d - x_{ad} i_n = \psi_d(i_d, i_n); \\ \psi_q &= x_q i_q = \psi_q(i_q); \\ \psi_n &= x_n i_n - x_{ad} i_d = \psi_n(i_n, i_d). \end{aligned} \right\} (3.3a)$$

Уравнения (3.3) или (3.3a) при моделировании на ЭВМ приводят к форме Коши, т. е. разрешают относительно производных токов (потокосцеплений). Последние являются переменными состоя-

ния для электрических цепей типа $R-L$. Поэтому переход к уравнениям состояния в форме Коши дает преимущества, присущие методу переменных состояния в теории цепей. Запись уравнений состояния в матричной форме позволяет использовать стандартные программы обработки матриц на ЭВМ.

В некоторых случаях, когда ЭМ рассматривается как элемент системы, уравнения (3.3) или (3.3а) удобнее представить в форме передаточных функций. Однако ни матричная форма, ни форма передаточных функций не дают ощутимого выигрыша в объеме вычислений, так как во всех случаях обращение к программам интегрирования неизбежно.

Следует отметить, что ликвидация периодических коэффициентов в исходных уравнениях ЭМ достигнута при взаимной неподвижности катушек в осях d , q . А это, в свою очередь, стало возможным благодаря взаимной неподвижности результирующих токов (потоков) статора и ротора. Это свойство характерно и является общим для ЭМ различного типа. Поэтому вещественные преобразования к ортогональным координатам оказываются возможными для большинства типов и режимов работы ЭМ. При этом выбор ортогональных координат определяется конкретным типом ЭМ. Так, для асинхронных машин более удобна система $[\alpha, \beta, 0]$, где α и β — ортогональные оси, жестко закрепленные на статоре. Возможны также случаи, когда ортогональные оси не закреплены ни на статоре, ни на роторе и вращаются с произвольной частотой. Более подробно методы и результаты преобразования координат рассмотрены в литературе по математической теории и переходным процессам ЭМ [32].

Дальнейшие упрощающие преобразования уравнений ЭМ возможны для установившихся режимов работы, в которых частота вращения постоянная, а токи и напряжения либо постоянны, либо являются периодическими функциями времени. Рассматривая пример простейшей синхронной машины, заметим, что токи катушек в осях d , q в установившемся режиме являются постоянными. Тогда оператор дифференцирования $p = 0$ и уравнения (3.3) преобразуются в следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -r_d i_d - \omega x_q i_q; \\ u_q &= -r_q i_q - \omega x_d i_d + \omega x_{ad} i_b; \\ u_b &= r_b i_b; \\ M &= k_{\text{тп}} \omega + [i_d x_q i_q - i_q (x_d i_d - x_{ad} i_b)]. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Уравнения (3.4) в отличие от (3.3) являются линейными алгебраическими и вместо катушек описывают *систему резистивных цепей* в осях d, q (см. рис. 3.5, z). Источники ЭДС, включенные в эти цепи, определяются через токи и параметры ортогональных катушек, т. е.

$$\left. \begin{aligned} E_d &= -\omega x_q i_q; \\ E_q &= \omega(x_{ad} i_d - x_d i_d). \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Выражения (3.5) определяют взаимосвязь между резистивными цепями и не позволяют рассматривать их независимо друг от друга.

Таким образом, переход от эквивалентной модели на рис. 3.1, b к системе резистивных цепей на рис. 3.5, z не дает преимуществ с точки зрения решения уравнений (3.4).

Возможность решения уравнений (3.4) методами расчета электрических цепей достигается в случае перехода к результирующему току статора, который в установившемся режиме является синусоидальным и может быть выражен в виде комплексной величины. Учитывая, что результирующий ток равен фазному, и сопоставляя плоскость координат d, q с комплексной плоскостью, можно перейти к эквивалентной *схеме замещения* фазной обмотки в установившемся режиме (см. рис. 3.5, d), **ДЛЯ** которой справедливо:

$$\dot{E}_\phi = -\dot{I}_\phi (r_\phi + jx_q). \quad (3.6)$$

Выражение (3.6) получено с помощью уравнений (3.4) при условии, **ЧТО**

$$\left. \begin{aligned} r_d &= r_q = r_\phi; \\ \dot{I}_\phi &= I_q + jI_d; \\ \dot{U}_\phi &= u_q + ju_d; \\ \dot{E}_\phi &= jE_q - j(x_d - x_q)I_d, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где $E_q = \omega x_{ad} i_d = \omega x_{ad} u_d / r_\phi$.

Из уравнений (3.7) видно, что, \dot{E}_ϕ является функцией I_d , а следовательно, \dot{I}_ϕ , т. е. ЭДС источника определяется режимом работы цепи. В частном случае неявнополюсной синхронной машины, ког-

да $x_d = x_q$, \dot{E}_ϕ определяется только ЭДС возбуждения и не зависит от тока цепи. Если учесть также влияние магнитного насыщения, то в общем случае не только ЭДС, но и параметры схемы замещения будут иметь нелинейные характеристики в зависимости от тока цепи. Тем не менее *переход к схемам замещения и векторным диаграммам позволяет использовать для решения хорошо известные методы расчета линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного тока.*

Для сохранения однородности моделей ЭМ все остальные виды расчетов (магнитные, тепловые, механические и др.) стремятся представить в такой же форме, что и электромеханические. Например, для установившихся магнитных и тепловых режимов широко применяются соответствующие схемы замещения и расчет сводится к анализу нелинейных цепей с сосредоточенными параметрами.

Таким образом, рассмотренные здесь современные методы теории цепей являются достаточно общими для моделирования различных видов расчетов при проектировании ЭМ.

Индуктивности ЭМ зависят от распределения магнитного поля в объеме конструкции и токов катушек, создающих это поле. Распределение магнитного поля в ЭМ необходимо знать также для оценки ряда важных показателей, которые принципиально не учитываются в моделях, построенных в рамках теории цепей. К таким показателям относятся форма кривой ЭДС, потери в магнитопроводе и т. п. Таким образом, моделирование в той или иной форме магнитного поля и его источников в ЭМ на стадии проектирования является **обязательным**.

Наиболее общая модель электромагнитного поля в ЭМ представляется полной *системой уравнений Максвелла*, которая в дифференциальной форме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + d\mathbf{D} / dt, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -d\mathbf{B} / dt; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho; \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}; \\ \mathbf{j}_{\text{пр}} &= \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{стоп}}), \quad \mathbf{j}_{\text{пер}} = \sigma \mathbf{V}_{\text{пер}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

где \mathbf{H} , \mathbf{B} , \mathbf{E} , \mathbf{D} , δ — соответственно векторы магнитной напряженности и индукции, электрической напряженности и смещения, плотности тока.

В проводящей среде $\delta = \delta_{\text{пр}}$ (плотности тока проводимости), а в диэлектрике $\delta = \delta_{\text{пер}}$ (плотности тока переноса, пропорциональной

скорости переноса зарядов $V_{\text{пер}}$). Все величины, входящие в (3.8), являются функциями пространственных координат в рассматриваемом объеме и времени. Эти функции непрерывны и имеют соответствующие производные во всех точках рассматриваемого пространства, за исключением поверхностей раздела различных сред. Поэтому для расчета электромагнитного поля модель (3.8) должна быть дополнена не только конкретными граничными условиями рассматриваемого объема, но и общими условиями поведения поля на границе двух сред.

Электромагнитное поле ЭМ распределено в объеме с различными средами (магнитопровод, воздушные зазоры, электропроводящие материалы и диэлектрики и т. п.), которые имеют сложную геометрическую конфигурацию поверхностей раздела. Учитывая это, а также нелинейность свойств магнитной среды и трехмерность объема ЭМ, можно представить, что расчет электромагнитного поля с помощью (3.8) в полном объеме практически невозможен даже при использовании наиболее мощных современных ЭВМ. В связи с этим обычно осуществляется *декомпозиция электромагнитного поля* на отдельные составляющие и достаточно простые участки. Так, например, в активном объеме ЭМ при определенном удалении от торцов имеется значительная средняя область, в которой трехмерное поле можно рассматривать как совокупность идентичных распределений плоскопараллельных полей, плоскость которых перпендикулярна оси вращения. Наоборот, в зоне лобовых частей ЭМ свести трехмерное поле к двумерному не удастся, но и здесь возможны определенные упрощения при учете симметрии относительно оси вращения.

Существенное упрощение дает замена распределения поля в подвижной среде ЭМ последовательностью распределений поля в неподвижных средах, которая образуется путем дискретизации непрерывного взаимного движения магнитных сред. В случае неподвижных сред полные производные по времени в (3.8) заменяются частными производными, что исключает необходимость учета угла поворота, частот и ускорений вращения ротора ЭМ. Однако при этом возникает самостоятельная задача моделирования движения ротора и его влияния на распределение поля ЭМ [33].

Благодаря декомпозиции общая модель (3.8) во многих случаях сводится к более простым моделям, описываемым уравнениями Пуассона или Лапласа. Они получаются, если электрические и магнитные поля рассматривать отдельно в ограниченных участках ЭМ с однородной средой. Например, для магнитного поля в воздушном зазоре ЭМ с неподвижной конфигурацией уравнения (3.8) имеют вид

$$\text{rot } \mathbf{H} = \delta; \text{div } \mathbf{B} = 0; \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (3.9)$$

В области вне токов ($\delta = 0$) магнитное поле является потенциальным и может характеризоваться скалярным магнитным потенциалом, который определяется из условия

$$\mathbf{H} = -\text{grad } U_m. \quad (3.10)$$

Подставляя (3.10) в (3.9) и учитывая, что $\delta = 0$, получаем уравнение Лапласа

$$\text{rot grad } U_m = \Delta U_m = 0. \quad (3.11)$$

В области с токами ($\delta \neq 0$) магнитное поле носит вихревой характер. Однако введением фиктивного понятия векторного потенциала, определяемого из условия

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{U}_m, \quad (3.12)$$

для однородной изотропной среды можно прийти к уравнению Пуассона

$$\Delta U_m = -\mu\delta. \quad (3.13)$$

Уравнения (3.11) и (3.13) используются для распределения U_m и \mathbf{U}_m в рассматриваемом объеме при заданных потенциалах или токах на заданных граничных поверхностях.

Для выполнения расчетов рассмотренные уравнения поля необходимо записать в удобной системе пространственных координат. Это выбирается таким образом, чтобы координатные поверхности совпадали или по возможности максимально приближались к граничным поверхностям объема, в котором распределено поле. Записывая уравнения в пространственной системе координат, получаем модели поля в форме дифференциальных уравнений в частных производных. Например, для плоскопараллельного магнитного поля в средней зоне активной части ЭМ обычно выбирают декартову (рис. 3.6, а) или цилиндрическую (рис. 3.6, б) систему координат, совмещая ось z с осью вращения. Так, уравнение (3.11), записанное для плоскопараллельного поля в декартовых координатах, принимает вид

$$\partial^2 U_m / \partial x^2 + \partial^2 U_m / \partial y^2 = 0, \quad (3.14)$$

а уравнение (3.13) с учетом того, что \mathbf{U}_m и δ направлены по оси z , принимает вид

$$\partial^2 U_{mz} / \partial x^2 + \partial^2 U_{mz} / \partial y^2 = -\mu\delta_z. \quad (3.15)$$

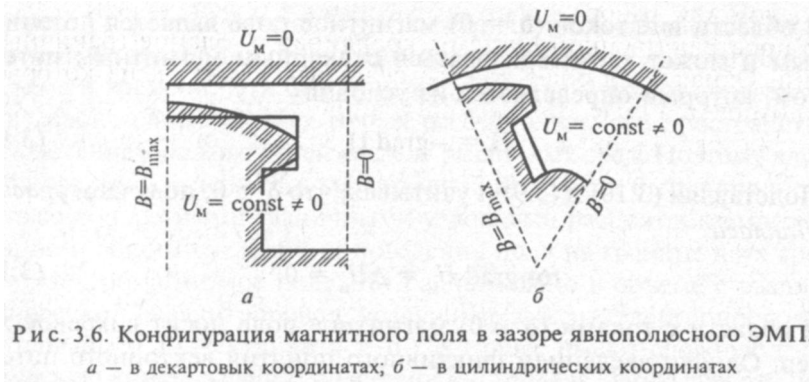


Рис. 3.6. Конфигурация магнитного поля в зазоре явнополюсного ЭМП:
a — в декартовых координатах; *б* — в цилиндрических координатах

Поиск решений (3.14) и (3.15) сводится к выбору функций $U_M(x, y)$ и $U_{Mz}(x, y)$, удовлетворяющих заданным граничным условиям.

Чтобы облегчить поиск решений (3.14) и (3.15), пользуются представлением функций многих переменных в виде комбинаций более простых функций, зависящих по возможности от одной переменной и выраженных элементарным образом. Для этого широко применяется *метод разделения переменных, который называется также методом Фурье*. Сущность этого метода можно пояснить на примере (3.14), если воспользоваться комбинацией

$$U_M(x, y) = X(x)Y(y). \quad (3.16)$$

Подставляя (3.16) в (3.14), получаем

$$Y d^2 X/dx^2 + X d^2 Y/dy^2 = 0. \quad (3.17)$$

Разделив (3.17) на X, Y , получим

$$(1/X) d^2 X/dx^2 = (-1/Y) d^2 Y/dy^2. \quad (3.18)$$

Учитывая равенство левой и правой частей (3.18) некоторой постоянной k , можно (3.18) представить двумя обыкновенными дифференциальными уравнениями

$$d^2 X/dx^2 \pm kX = 0; \quad d^2 Y/dy^2 \mp kY = 0. \quad (3.19)$$

Корни характеристических уравнений для (3.19) являются комплексными сопряженными числами. Следовательно, стандартные решения (3.19) представляются линейной комбинацией гармонических функций с частотами, пропорциональными \sqrt{kx} и \sqrt{ky} . Таким образом, для определения U_M достаточно найти амплитуды и постоянную k с помощью граничных условий задачи.

В целом для выбора удачной модели поля большую роль играет выбор пространственной системы координат и задание граничных условий. Однако для большинства реальных участков, на которые декомпозируется поле ЭМ, конфигурация границ в известных системах пространственных координат является достаточно сложной. Поэтому по аналогии с «цепными» моделями ЭМ для «полевых» моделей в общем случае также имеется необходимость в преобразовании координат. Однако в отличие от теории цепей, в которой преобразованию подвергаются физические переменные (напряжения и токи), в теории поля преобразуются пространственные переменные, а физические переменные инвариантны относительно пространственных координат.

Наиболее эффективным методом преобразования координат в теории поля является метод *конформных преобразований*. Этот метод получил широкое применение для определения магнитного поля в воздушном зазоре ЭМ с учетом явнополюсности, зубчатости, эксцентриситета и т. п. Главное ограничение в практическом использовании метода состоит в том, что граничные поверхности целесообразно подбирать так, чтобы они были параллельны или перпендикулярны силовым линиям и имели постоянную магнитную проницаемость.

Рассмотрим это на простейшем примере плоскопараллельного поля (рис. 3.7). Исходным является поле внутри прямого угла, образуемого магнитной средой с $\mu = \infty$. Совместим плоскость поля с комплексной плоскостью $z = x + jy$, как показано на рис. 3.7, а. Линии $U_m = \text{const}$ в плоскости z являются эквипотенциальными, а линии $V_m = \text{const}$ образуют трубки для прохождения постоянного магнитного потока. Прямой линии $V_m = 0$, проходящей через начало координат, соответствует уравнение $x = y$; гиперболом $U_m = \text{const}$ — уравнение $2xy = \text{const}$; гиперболом $V_m = \text{const}$ — уравнение $x^2 - y^2 = \text{const}$.

В целом характер поля на рис. 3.7, а представляет собой ортогональную систему линий $U_m = \text{const}$ и $V_m = \text{const}$. Учитывая взаимоперпендикулярность линий U_m и V_m , можно ввести в рассмотренное новую комплексную плоскость $W = U_m + jV_m$, в которой линии $U_m = \text{const}$ и $V_m = \text{const}$ будут параллельны координатным осям (рис. 3.7, б). Легко убедиться, что каждой точке в плоскости z соответствует однозначно только одна точка в плоскости W (каждой совокупности значений x и y ставится в соответствие только одна совокупность значений U_m и V_m).

Следовательно, можно показать, что существует регулярная аналитическая функция компле

$$W = W(z), \quad (3.20)$$

Используя (3.22) и полагая магнитную проницаемость магнитопровода равной бесконечности, можно показать, что распределение поля в воздушном зазоре определяется выражением

$$B_{\delta}(x, z) = \lambda_{\delta}(x, z)F_m(x, z), \quad (3.23)$$

где B_{δ} , λ_{δ} и F_m — соответственно индукция, удельная магнитная проводимость (на единицу поверхности) и магнитодвижущая сила по длине зазора δ , совпадающей по направлению с осью y (рис. 3.8, а).

Для плоскопараллельного поля в (3.23) можно пренебречь зависимостью λ от z . Тогда, учитывая периодическое изменение λ_{δ} вдоль оси x (рис. 3.8, б), $\lambda_{\delta}(x)$ можно разложить в гармонический ряд, который содержит постоянную составляющую $\lambda_{\delta 0}$ и все гармонические порядка $v = 1, 2, 3, \dots$, т. е.

$$\lambda_{\delta}(x) = \lambda_{\delta 0} + \sum_{v=1}^{\infty} \lambda_{\delta v} \cos v \frac{\pi}{\tau} x. \quad (3.24)$$

Кривую $\lambda_{\delta}(x)$, а следовательно, $\lambda_{\delta 0}$ и $\lambda_{\delta v}$ нетрудно определить по конструктивным данным ЭМ. И тогда распределение поля в зазоре в соответствии с (3.23) будет определяться F_m , которая в общем случае зависит не только от x , но и от времени t . Например, для многофазной системы обмоток ЭМ, создающей вращающуюся магнитодвижущую силу, можно использовать выражение гармонического ряда типа

$$F_m(x, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \cos \left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x + \psi_v \right), \quad (3.25)$$

где ω — частота переменного тока; ψ_v — начальная фаза v -й гармонической.

Подставляя (3.24) и (3.25) в (3.23), получаем гармонический спектр распределения поля в зазоре на длине полюсного деления. Чтобы оценить влияние вращения ротора на распределение поля,

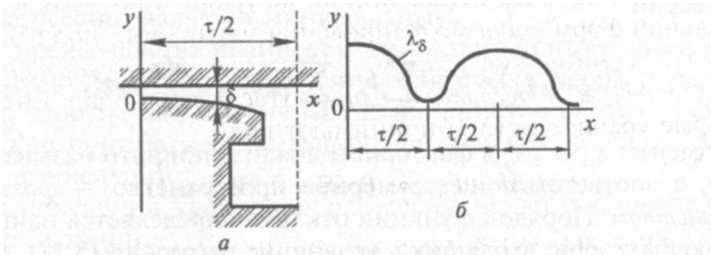


Рис. 3.8. Проводимость воздушного зазора явнополюсного ЭМП

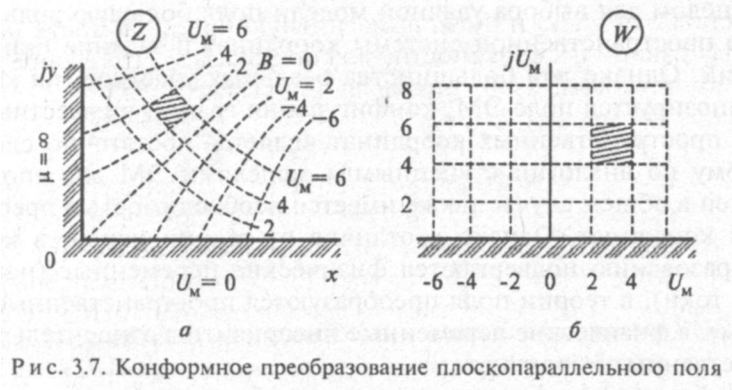


Рис. 3.7. Конформное преобразование плоскопараллельного поля

которая преобразует криволинейный характер поля (см. рис. 3.7, *a*) в прямолинейный (см. рис. 3.7, *б*). В рассматриваемом примере эта функция имеет вид

$$W = z^2, \quad (3.21)$$

так как

$$W = V_M + jU_M = (x^2 - y^2) + j2xy = (x + jy)^2.$$

Поле на рис. 3.7, *б* является наиболее простым из всех видов полей, описываемых уравнением Лапласа, и может быть смоделировано элементарно. Таким образом, реализация метода конформных преобразований требует нахождения уравнения (3.16), которое устанавливает связь исходного поля сложной конфигурации в плоскости z с элементарным полем в плоскости W . Однако общие правила для выбора (3.16) отсутствуют. Поэтому на практике задача конформных преобразований нередко решается в несколько этапов с известными промежуточными преобразованиями [34].

Наряду с методами, основанными на уравнениях поля в дифференциальной форме, для моделирования магнитного поля ЭМ, особенно в воздушном зазоре, применяют также *методы, основанные на уравнениях поля в интегральной форме*. После перехода к интегральной форме уравнения (3.9) принимают вид

$$\oint_l \mathbf{H} \, dl = F_M, \quad \oint_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (3.22)$$

где l — длина замкнутой силовой линии; S — замкнутая поверхность; F_M — магнитодвижущая сила.

надо дополнительно учесть, что кривая $\lambda_{\delta}(x)$ движется вдоль оси x вместе с ротором. Тогда вместо (3.24) надо пользоваться гармоническим рядом следующего типа:

$$\lambda_{\delta}(x, t) = \lambda_{\delta 0} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \lambda_{\delta \nu} \cos\left(\nu \frac{\pi}{\tau} x - \omega_p t - \Psi_p\right), \quad (3.26)$$

где ω_p — частота вращения ротора; Ψ_p — начальная фаза кривой λ_{δ} в плоскости x, y .

Таким образом, (3.23)—(3.26) позволяют оценить распределение поля в зазоре ЭМ как в пространстве, так и во времени.

Изложенный подход к моделированию поля положен в основу метода гармонических проводимостей, который применяется для обобщенного анализа гармонического спектра магнитного поля в воздушном зазоре ЭМ с учетом вращения ротора, явнополюсности или зубчатости статора и ротора, а также эксцентриситета и скоса пазов. Аналогичный подход используется также в методах зубцовых проводимостей и зубцовых контуров, которые отличаются от метода гармонических проводимостей тем, что в гармонический ряд разлагается магнитная проводимость одного зубцового деления при повороте противоположной зубчатой части на одно зубцовое деление. Эти методы находят применение при расчете потокосцеплений и параметров ЭМ с зубчатой конструкцией статора и ротора [34].

§ 3.4. Статистические методы моделирования

Рассмотренные выше теоретические методы не всегда позволяют получать математические модели ЭМ, удобные для реализации в САПР. В этих случаях применяют статистические методы и, в частности, методы регрессионного анализа, используемые в *теории планирования экспериментов* [35]. Математическая модель, называемая *функцией*, или *поверхностью отклика*, представляется уравнением регрессии

$$f(z_1, \dots, z_p) \approx b_0 + \sum_{n=1}^p b_n + \sum_{k < n}^p b_{kn} z_k z_n + \sum_{n=1}^p b_{nn} z_n^2. \quad (3.27)$$

Аргументы z_1, \dots, z_p в факторном анализе принято называть *факторами*, а соответствующее **p -мерное** пространство — *факторным пространством*. Порядок функции отклика определяется наивысшей степенью факторов, входящих в уравнение регрессии (3.27). Для получения возможно простых моделей форму функции отклика можно

выбирать путем последовательных приближений. При этом сначала рассматривается уравнение регрессии первого порядка. Если точность удовлетворительна, то делается попытка пренебречь нелинейными членами типа произведений факторов. Если точность недостаточна, то надо перейти к уравнению регрессии второго порядка, и так до тех пор, пока точность аппроксимации станет приемлемой.

Следует отметить, что выражение (3.27) используется также в классическом регрессионном анализе, где для определения коэффициентов регрессии обрабатываются результаты замеров (испытаний) функции f в случайных точках факторного пространства, число которых больше числа коэффициентов регрессии или равно ему. Это создает существенные недостатки:

1) коэффициенты регрессии определяются с помощью решения специальной системы уравнений, т. е. коэффициенты взаимосвязаны;

2) пренебрежение отдельными членами уравнения регрессии требует пересчета оставшихся коэффициентов;

3) большинство факторов оказывается попарно коррелированными, поэтому нельзя разделить соответствующие эффекты;

4) трудно оценить ошибку испытаний и адекватность представления экспериментальных результатов уравнением регрессии.

Вследствие указанных причин классический регрессионный анализ не нашел заметного применения в задачах аппроксимации.

Основное отличие методов планирования эксперимента заключается в том, что точки испытаний в факторном пространстве выбираются специальным образом, оптимальным в том смысле, что:

1) коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга с помощью простейших соотношений;

2) коэффициенты регрессии вычисляются с одинаковой и минимальной дисперсией;

3) приближение уравнения регрессии к результатам испытаний является более равномерным;

4) количество испытаний, необходимое для расчета коэффициентов регрессии, является минимальным.

Эти преимущества планируемого эксперимента открывают широкие возможности для получения достаточно простых расчетных формул, причем под единичным испытанием с одинаковым успехом можно понимать как результат физических замеров, так и результат вычислений.

Для получения уравнения регрессии первого порядка полное число испытаний

$$N = 2^p. \quad (3.28)$$

При переходе к уравнениям более высокого порядка число испытаний увеличивается, например для второго порядка

$$N = 2^p + 2p + p_0, \quad (3.29)$$

где p_0 — число испытаний в центре области варьирования факторов.

Из сравнения выражений (3.28) и (3.29) видно, что с увеличением порядка регрессии число испытаний увеличивается таким образом, что сохраняется ядро, образованное испытаниями для уравнения первого порядка.

Адекватность представления результатов испытаний уравнением регрессии в факторном анализе, так же как и в классическом регрессионном, оценивается с помощью дисперсионного отношения

$$F = s_R^2 / s^2\{\varphi\}, \quad (3.30)$$

где s_R^2 — остаточная дисперсия, определяемая как

$$s_R^2 = s_R / f_R, \quad (3.31)$$

$$s_R = \sum_{k=1}^N (f_k - \varphi_k)^2, \quad (3.32)$$

где f_R — число степеней свободы, равное разности чисел испытаний и коэффициентов регрессии; f_k — значение функции, замеренное в k -м испытании; φ_k — соответствующее значение функции отклика, вычисленное по уравнению регрессии; $s^2\{\varphi\}$ — дисперсия, характеризующая ошибку опыта.

Если результаты испытаний получены расчетным путем, то ошибка опыта равняется ошибке вычислений, которой в большинстве случаев можно пренебречь. Тогда вместо **F-критерия** можно рассматривать s_R^2 . Практически о точности уравнения регрессии в первом приближении можно судить по разности $(f_0 - b_0)$, где f_0 — результат испытания в центре факторного пространства, так как здесь ожидается наибольшее расхождение. С большой достоверностью точность можно оценивать по разности результатов испытаний и расчета в точках, равномерно распределенных в области факторного эксперимента. Отсюда можно оценить и максимальную погрешность. Однако такой подход применим в основном при аппроксимации известных функциональных связей, так как число испытаний резко увеличивается.

Благодаря идеям оптимального планирования точек испытаний анализ факторов регрессионных моделей является достаточно уни-

версальным средством не только для экспериментального изучения и оптимизации малоизвестных явлений, но и для аппроксимации сложных функций многих переменных с минимальной затратой усилий.

В электромеханике планируемый эксперимент широко применяется для решения следующих задач моделирования ЭМ:

1) отыскание функциональных связей между показателями динамических процессов и постоянными параметрами для исключения дифференциальных уравнений из расчетных алгоритмов и повышения степени их однородности;

2) замена сложных расчетных уравнений или их совокупности простыми функциями;

3) отыскание расчетных зависимостей для сложных процессов, не поддающихся математическому описанию с необходимой точностью и простотой.

Более подробно методы планирования эксперимента и их применение в электромеханике изложены в [1]. Рассмотрим применение методов планирования эксперимента на простейших примерах, связанных с конструированием расчетных алгоритмов синхронных машин.

Пример 1. Показатели переходных процессов ЭМ (максимальные и минимальные значения токов, напряжений, время переходного процесса и др.) можно определить путем решения уравнений динамики. Однако даже после преобразования координат решение дифференциальных уравнений вызывает затруднения, особенно при переменной частоте вращения. В то же время полные решения уравнений динамики несут значительно большую информацию, чем это необходимо для оценки качества переходных процессов. Поэтому на практике часто пользуются грубыми, косвенными оценками динамических показателей типа переходных и сверхпереходных сопротивлений, постоянных времени и т. п. Их рассчитывают с **ПОМОЩЬЮ** уравнений, аналогичных по форме уравнениям расчета установившихся процессов. Таким образом, надобность в дифференциальных уравнениях отпадает и расчетные алгоритмы приобретают большую однородность и простоту.

Недостаток косвенных оценок динамических показателей заключается в большой погрешности, которая во многих случаях неудовлетворительна. Чтобы сохранить вычислительные преимущества алгебраических уравнений и одновременно повысить точность расчетов, можно воспользоваться методами планируемого эксперимента. Если в качестве объекта эксперимента рассматривать дифференциальные уравнения динамики, а в качестве факторов — их постоян-

ные параметры, то, принимая динамические показатели за функции отклика, можно получить расчетные уравнения типа полиномов (3.27).

Для иллюстрации изложенного рассмотрим регулируемый по напряжению синхронный генератор. Переходные процессы генератора описываются *уравнениями Парка—Горева* при постоянной частоте вращения. Насыщение учитывается по продольной оси с помощью характеристики холостого хода. Система регулирования напряжения включает возбудитель и быстродействующий транзисторный регулятор. Возбудитель описывается аperiодическим звеном с нелинейным коэффициентом усиления, учитывающим магнитное насыщение возбудителя. Уравнения регулятора включают переменные коэффициенты, определяемые с помощью нелинейных статических характеристик. Нагрузка генератора является активно-индуктивной и описывается уравнениями в осях d, q .

Совокупность уравнений генератора, системы регулирования и нагрузки является предметом экспериментального исследования по оптимальному плану, составленному методами планируемого эксперимента. В результате каждого эксперимента определяются показатели заданного переходного процесса. Переход от одного эксперимента к другому осуществляется варьированием факторов в виде параметров и характеристик математической модели исследуемой системы. Таким образом, благодаря сочетанию методов математического моделирования и планируемого эксперимента можно получить уравнения, связывающие алгебраическим образом динамические показатели с варьируемыми факторами системы. Исключая несущественные факторы, для рассматриваемой системы получаем следующие уравнения в различных переходных режимах:

- при подключении нагрузки

$$\Delta u_{\max} = 23,5 - 1,39(\ln k_{\Sigma})^{-1} + 7,37\Delta S + 5,71x_{ad} - 0,9 \cos^2 \varphi - 0,6 \ln [5(k_{ud} - 1)] + 4,34T'_{db} + \quad (3.33)$$

$$+ 0,85(\ln k_{\Sigma}^{-1}r_f^{-1}) + 3,66x_{fo} / x_{ad} - 1,45(\ln k_{\Sigma})^{-1}x_{ad} + 1,71\Delta Sx_{ad} - r_f^{-1}x_{ad};$$

$$t_p = 0,274 - 0,0288(\ln k_{\Sigma})^{-1} + 0,0637\Delta S + 0,0236r_f^{-1} + 0,0606x_{ad} + 0,0663T'_{db} + 0,0236(\ln k_{\Sigma})^{-1}r_f^{-1} + 0,012x_{fo} / x_{ad} + \quad (3.34)$$

$$+ 0,0268 \ln k_{\Sigma}\Delta S - 0,0164(\ln k_{\Sigma})^{-1}x_{ad} + 0,0312r_f^{-1}x_{ad};$$

- при отключении нагрузки

$$\begin{aligned} \Delta u_{\max} = & 26,4 - 2,06(\ln k_{\Sigma})^{-1} + 6,64\Delta S + 7,85x_{ad} - 2,025 \cos^2 \varphi - \\ & - 3,2[\ln 5(k_{\mu d} - 1)] + 4,46T'_{db} + 1,2(\ln k_{\Sigma})^{-1}r_f^{-1} - 1,5x_{ad}[\ln 5(k_{\mu d} - 1)] + \\ & + 3,18x_{f\sigma} / x_{ad} - 2,28(\ln k_{\Sigma})^{-1}x_{ad} - 1,46r_f^{-1}x_{ad} + 2,24\Delta Sx_{ad}; \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} t_p = & 0,26 - 0,0212(\ln k_{\Sigma})^{-1} + 0,036\Delta S + 0,016r_f^{-1} + \\ & + 0,0537x_{ad} + 0,0364T'_{db} + 0,0312\Delta ST'_{db}; \end{aligned} \quad (3.36)$$

- при восстановлении напряжения после короткого замыкания

$$\begin{aligned} \Delta u_{\max} = & 28,8 + 1,2(\ln k_{\Sigma})^{-1} - 3,94r_f^{-1} + 6,55x_{ad} - 6,05 \ln[5(k_{\mu d} - 1)] + \\ & + 1,98T'_{db} - 2,54 \ln[5(k_{\mu d} - 1)]x_{ad} - 0,26x_{f\sigma} / x_{ad} - 0,45(\ln k_{\Sigma})^{-1}x_{ad} + \\ & + 0,93(\ln k_{\Sigma})^{-1} \ln[5(k_{\mu d} - 1)] - 2,13r_f^{-1}x_{ad}; \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} t_p = & 0,313 + 0,013x_{f\sigma} / x_{ad} + 0,0288x_{ad} + \\ & + 0,0312T'_{db} - 0,0212(\ln k_{\Sigma})^{-1}x_{ad} + 0,013r_f^{-1}, \end{aligned} \quad (3.38)$$

где Δu_{\max} — максимальное отклонение напряжения от номинального значения; t_p — результирующее время переходного процесса; k_{Σ} — суммарный коэффициент усиления системы регулирования; ΔS — изменение мощности нагрузки; x_{ad} — индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки; $k_{\mu d}$ — коэффициент магнитного насыщения по продольной оси; T'_{db} — постоянная времени возбудителя; r_f , $x_{f\sigma}$ — активное и индуктивное сопротивления рассеивания обмотки возбуждения.

В уравнениях (3.33)—(3.38) Δu_{\max} измеряется в процентном отношении к номинальному напряжению, t_p и T'_{db} — в секундах, а остальные величины — в относительных единицах.

Точность уравнений (3.33)—(3.38) оценивается путем сравнения результатов расчета и натурального эксперимента для нескольких реальных случаев. Сравнение показывает, что максимальное расхождение по Δu_{\max} не превышает 10%, а по t_p — 13%.

Пример 2. Расчет магнитной цепи явнополюсной синхронной машины в системе координат $[d, q]$ требует вычисления ряда коэф-

эффициентов, учитывающих разложение магнитного поля на оси d , q , конфигурацию воздушного зазора и конструктивные различия обмоток статора и ротора (распределенная и сосредоточенная). Достаточно точное определение этих коэффициентов является трудоемким и ведется с помощью громоздких уравнений и расчетных кривых.

Графоаналитические алгоритмы расчета коэффициентов магнитной цепи можно аппроксимировать статистическими уравнениями, полученными методами планирования эксперимента. Некоторые уравнения аппроксимации, пределы изменения факторов и максимальные погрешности аппроксимации приведены в табл. 3.1 [7].

Как видно из табл. 3.1, предельная простота аппроксимирующих выражений достигнута за счет такой потери точности, которая во многих практических случаях является приемлемой. Объем вычислений коэффициентов по уравнениям аппроксимации уменьшается более чем в два раза по сравнению с общепринятыми инженерными методиками расчета.

Таблица 3.1

Исходная расчетная зависимость	Аппроксимирующее выражение	Предел изменения факторов	Относительная максимальная погрешность, %
Коэффициент приведения реакции якоря	$k_a = 1,34 \dots 0,4\alpha$	$\alpha = 0,55 \dots 0,75$	$\pm 2,7$
Коэффициент формы якоря	$k_\phi = 0,61 + 0,54\alpha + 1,28 \delta/\tau$	$\delta/\tau = 0,005 \dots 0,04,$ $\alpha = 0,55 \dots 0,75$	$\pm 0,6$
Коэффициенты реакции якоря для равномерного воздушного зазора	$k_d = 0,75 + 0,3\alpha,$ $k_q = -0,42 + 1,32\alpha + 4,16 \delta/\tau$	$\delta/\tau = 0,005 \dots 0,04$	± 1 $-3 \dots +5$
Расчетный коэффициент полного перекрытия	$1/\alpha_i = 2,75 - 1,9\alpha - 5,31 \delta/\tau$	$\alpha = 0,6 \dots 0,75,$ $\delta/\tau = 0,005 \dots 0,2$	$-0,3 \dots +2$
Относительная расчетная ЭДС по продольной оси	$E_d = 0,99 + 0,77x_a - 0,083x_{aq}$	$x_a = 0 \dots 0,2,$ $x_{aq} = 0 \dots 2,0$	± 2

Пример 3. Расчет теплового состояния ЭМ принудительным охлаждением часто затруднен из-за отсутствия достоверных сведений о динамике движения охлаждающего агента и количественных соотношениях между потоками теплопередачи внутри машины. Тео-

ретический подход к расчету достаточно сложен и требует учета большого количества факторов, влияющих на нагревание отдельных элементов машины. Полученные теоретическим путем уравнения расчета являются в общем случае дифференциальными.

Если точность расчетов невелика из-за отсутствия необходимой информации, а расчеты достаточно сложны, целесообразно провести планируемый эксперимент на натуральных образцах изделий или их физических моделях. Так, например, для расчета превышения температуры якоря авиационного синхронного генератора с принудительным воздушным охлаждением и мощностью 60 кВт · А получаем выражение

$$\theta = 7,25 + 1,37 \cdot 10^{-10} A_{j_a} - 408G + 172\lambda, \quad (3.39)$$

где A_{j_a} — произведение линейной нагрузки на плотность тока, A^2/M^3 ; G — массовый расход охлаждающего воздуха, кг/с; λ — отношение длины якоря к внутреннему диаметру.

Пределы изменения факторов и выражений (3.39) следующие: $A_{j_a} = (45 \dots 102)10^4$; $G = 160 \dots 220$; $\lambda = 0,4 \dots 0,7$.

Уравнение (3.39) получено путем экспериментального исследования натуральных образцов авиационных генераторов. Следует отметить, что в подобных случаях не всегда возможна постановка эксперимента с необходимой полнотой из-за отсутствия образцов с нужными значениями факторов. Поэтому достоверность и точность статистических уравнений, полученных экспериментальным путем, следует постепенно повышать, используя экспериментальные данные всех новых образцов.

§ 3.5. Кибернетические методы моделирования

Уравнения ЭМ, рассмотренные выше, показывают, что общее число расчетных уравнений, как правило, меньше числа неизвестных переменных. Чем меньше число независимых переменных математической модели, тем меньше степень ее исходной неопределенности. В пределе если число независимых переменных равно нулю, то решение определяется однозначно в результате однократного просчета совокупности расчетных уравнений. Таким образом, сокращение количества независимых переменных облегчает процесс окончательного выбора расчетных решений.

Сокращение числа независимых переменных возможно при использовании дополнительных расчетных уравнений, полученных на основе кибернетического подхода. Его сущность легко выявить с помощью так называемых задач *частичной оптимизации*, которые рассмотрим на следующем примере.

ных фиксированных аргументов является постоянной величиной и не может способствовать определению оптимальных соотношений типа (3.40) или (3.41).

Например, если принять, что в исходной задаче функция H_0 зависит только от параметров z_1, \dots, z_k , то в задаче частичной оптимизации соответствующая функция h_0 не может быть критериальной, так как она не реагирует на изменение переменных v_1, \dots, v_{p-k} .

Вследствие этого появляется необходимость введения другой критериальной функции \tilde{h}_0 , обязательно зависящей хотя бы от некоторых из переменных v_1, \dots, v_{p-k} . Введение новой функции \tilde{h}_0 , которая позволила бы иметь точное соответствие между результатами частичной и полной оптимизации, представляет весьма сложную задачу и в некоторых случаях вообще невыполнимо.

Поэтому практический интерес представляет приближенное достижение соответствия между результатами полной и частичной оптимизации путем приближенной замены h_0 на \tilde{h}_0 . Подобная приближенная замена целесообразна и в тех случаях, когда h_0 зависит от v_1, \dots, v_{p-k} но зато введение \tilde{h}_0 позволяет значительно проще решить задачу частичной оптимизации. Успех частичной оптимизации во многом определяется удачной формулировкой задачи, что, в свою очередь, зависит от степени изучения физического содержания полной задачи оптимизации.

Для решения задач частичной оптимизации и конструирования дополнительных расчетных связей типа (3.41) применяются те же методы, которые применимы к полным задачам оптимизации. Более конкретное представление о кибернетическом подходе к математическому моделированию дают два примера, приводимых ниже.

Пример 1. Типичной традиционной задачей частичной оптимизации является задача о выборе оптимальной пазовой геометрии ЭМ. Приближенное решение этой задачи аналитическими методами дано в ряде работ, например [36], тем не менее до сих пор отсутствует точный выбор расчетных значений ширины и высоты паза. Соотношение ширины паза к зубцовому делению, например, для синхронных машин составляет 0,3 ... 0,7.

Такое расхождение объясняется различными постановками задач частичной оптимизации. Поэтому, прежде чем проверять корректность той или иной задачи, целесообразно проанализировать уже известные результаты. В качестве критериев оптимальности

обычно применяются показатели максимального использования объема расточки якоря или объема зубцового слоя, которые соответственно определяются выражениями:

$$M_{эм} / V_i = 4 M_{эм} / (\pi D_i^2 l); \quad (3.42)$$

$$M_{эм} / V_z = M_{эм} / [\pi (D_i - h_n) h_n l], \quad (3.43)$$

где $M_{эм}$ — электромеханический момент; V_i, V_z — соответственно активные объемы расточки якоря и зубцового слоя; D_i, l — соответственно диаметр расточки и длина якоря; h_n — высота паза.

Используя известные зависимости

$$M_{эм} / (D_i^2 l) = C A_y B_\delta; \quad A_y = j_y k_{эм} b_{пр} h_n / t_z;$$

$$B_\delta = B_{зр} b_{зр} k_{з.с} / t_z,$$

где A_y — линейная нагрузка; $B_\delta, B_{зр}$ — индукция в воздушном зазоре и в расчетном сечении зубца; j_y — плотность тока якоря; $k_{эм}, k_{з.с}$ — коэффициенты заполнения медью и сталью; $b_{пр}, b_{зр}$ — расчетные значения ширины паза и зубца.

После несложных преобразований уравнение (3.42) можно привести к виду

$$M_{эм} / v_i = (4 / \pi) C B_{зр} b_{зр}^* k_{з.с} \sqrt{A_y j_y k_{эм} h_n^* b_{пр}^* t_z}, \quad (3.44)$$

где $b_{зр}^* = b_{зр} / t_z, h_n^* = h_n / t_z, b_{пр}^* = b_{пр} / t_z$ — относительные размеры зубцового слоя, связанные соотношением

$$b_{зр}^* = 1 + (2\pi k / z) h_n^* - b_{пр}^*, \quad (3.45)$$

где k — относительная высота, соответствующая расчетным значениям ширины паза или зубца: для прямоугольного паза $k = 1/3$, для трапецидального паза $k = 1/2$; z — число зубцов.

Принимая все величины, входящие в (3.44), фиксированными, за исключением размеров зубцового слоя, и учитывая (3.45), частичный критерий оптимальности получаем в следующем виде:

$$h_{о1} = \frac{[1 + (2\pi k / z) h_n^* - b_{пр}^*]}{\sqrt{h_n^* b_{пр}^*}}. \quad (3.46)$$

Аналогичным образом исходя из (3.43) определяем другой частичный критерий

$$h_{02} = \frac{[1 + (2\pi k_1 / z) h_n^* - b_{np}^*] \sqrt{h_n^* b_{np}^*}}{h_n^* [1 + (\pi / z) h_n^*]} \quad (3.47)$$

Функции h_{01} и h_{02} в области положительных значений размеров, имеющих физический смысл, не имеют экстремума (рис. 3.9, а, б). Следовательно, найти таким путем оптимальные значения размеров не удастся. Можно лишь найти оптимальное значение одной переменной при фиксированном значении другой. Приравнявая к нулю частные производные h_{01} и h_{02} по одной из переменных, в обоих случаях получаем одну и ту же зависимость (рис. 3.9, в):

$$b_{пр.опт}^* = (1/3) [1 + (2\pi k / z) h_n^*] \quad (3.48)$$

Этот результат отличается от известных рекомендаций, несмотря на идентичность исходных показателей (3.42) и (3.43). Отличие обусловлено разными подходами к выводу выражений h_{01} и h_{02} , что, в свою очередь, зависит от конкретной постановки задачи. Следует также отметить, что (3.48) и рекомендации отличаются не только друг от друга, но и от результатов расчета синхронных машин на ЭВМ, когда вместо частичной оптимизации решается задача полной оптимизации размеров.

Таким образом, формулировка задачи требует большой осторожности и четкого определения ее места в общей последовательности расчетов. Применительно к данному случаю это означает следующее. Последовательность расчетов синхронных машин такова, что выбору

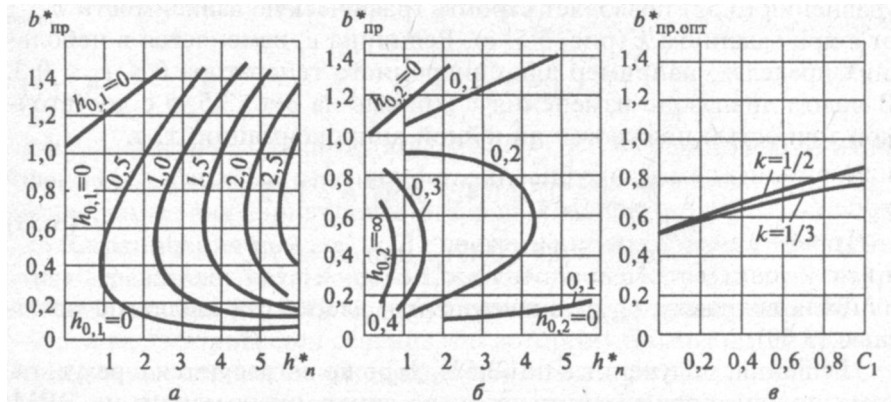


Рис. 3.9. Топология функций h_{01} , h_{02} при $k = 1/3$, $z = 12$

пазовой геометрии предшествует выбор основных геометрических размеров и обмоточных данных, а также задание номинальных данных. Следовательно, все величины, выбираемые раньше размеров паза, а также определяемые через них расчетные данные являются фиксированными. Кроме того, в максимально использованной машине температуры нагревания обмоток находятся на предельно допустимом уровне.

Учитывая изложенное, задачу частичной оптимизации пазовой геометрии более корректно можно сформулировать так:

- максимизировать функцию h_{02} при выполнении условий

$$A_{\text{я}} j_{\text{я}} = \text{const}; \quad (3.49)$$

$$b_{\text{пр}}^* h_{\text{пр}} = A_{\text{я}}^2 / (A_{\text{я}} j_{\text{я}}) k_{\text{з.м}} t_{\text{з}} = \text{const}, \quad (3.50)$$

где произведение $(A_{\text{я}} j_{\text{я}})$ косвенно характеризует удельный тепловой поток, определяющий температуру нагревания обмоток якоря. Условие (3.50) вытекает из фиксации $A_{\text{я}}$, $t_{\text{з}}$ к моменту выбора пазовой геометрии. Подставляя значения ограничений задачи в (3.47), получаем

$$h_{02} = \frac{(1 + 2kc_1 \cdot 1/b_{\text{пр}}^* - b_{\text{пр}}^*) b_{\text{пр}}^*}{1 + c_1 \cdot 1/b_{\text{пр}}^*}, \quad (3.51)$$

где $c_1 = (\pi/z) A_{\text{я}}^2 / (A_{\text{я}} j_{\text{я}}) k_{\text{з.м}} t_{\text{з}}$ — фиксированная величина. Экстремум h_{02} найдем, решая уравнение

$$\partial h_{02} / \partial b_{\text{пр}}^* = -b_{\text{пр}}^{*3} + (1/2)(1 - 3c_1) b_{\text{пр}}^{*2} + c_1 b_{\text{пр}}^{*2} + kc_1^2 = 0. \quad (3.52)$$

Численное исследование положительных решений кубического уравнения (3.52) позволяет строить графическую зависимость $b_{\text{пр.опт}}^*$ от c_1 при заданном k (рис. 3.5, *в*). Величина c_1 изменяется в небольших пределах, например для синхронного генератора $0 < c_1 < 0,3$. В малом диапазоне изменения c_1 , кривые на рис. 3.5, *в* с достаточной точностью поддаются линейной аппроксимации, т. е.

$$\begin{aligned} b_{\text{пр.опт}}^* &= 0,5 + 0,4c_1 \quad \text{при } k = 1/3; \\ b_{\text{пр.опт}}^* &= 0,5 + 0,47c_1 \quad \text{при } k = 1/2. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Зная величину $b_{\text{пр.опт}}^*$, значение $h_{\text{пр.опт}}^*$ легко определяем с помощью (3.50).

Решения, полученные по (3.53), хорошо согласуются с результатами полной оптимизации проектов синхронных машин на ЭВМ. Таким образом, используя уравнения (3.53) и (3.50), при определен-

ных условиях можно исключить размеры зубцового слоя из числа независимых переменных, уменьшая их на 2.

Пример 2. По аналогии с частичной оптимизацией пазовой геометрии якоря можно сформулировать задачу выбора геометрии индуктора синхронной машины.

В качестве показателя максимального использования индуктора принимается отношение

$$h_0 = \Phi_d F_{ад} / V_n, \quad (3.54)$$

где $\Phi_d, F_{ад}$ — поток и магнитодвижущая сила реакции по продольной оси; V_n — активный объем индуктора.

Числитель отношения (3.54) характеризует энергию магнитного поля, созданного индуктором и проникающего в якорь.

Обычная последовательность проектирования синхронной машины такова, что расчету индуктора предшествует расчет якоря, в результате которого определяется необходимый поток Φ_d . Поэтому величину Φ_d при частичной оптимизации индуктора можно полагать фиксированной. Кроме того, следует учитывать ограничения в виде предельно допустимых значений температур обмоток индуктора и механических усилий от центробежных сил вращения, а также необходимость достаточно равномерного распределения магнитного потока на поверхности полюсного наконечника.

При указанных предпосылках и косвенном учете ограничивающих требований применительно к синхронным генераторам с явнополюсным индуктором рассматриваемая задача конкретизируется следующим образом:

- максимизировать h_0 при условии, что

$$\begin{aligned} \Phi_d &= \text{const}; j_v = \text{const}; \\ \sigma_{кр} &\leq \sigma_{\text{доп}}; B_{кр} \leq B_{\text{доп}}, \end{aligned}$$

где j_v — плотность тока возбуждения; $\sigma_{кр}, B_{кр}$ — механическое напряжение и магнитная индукция в критических сечениях; $\sigma_{\text{доп}}, B_{\text{доп}}$ — допустимые значения соответствующих величин.

Ограничения на $j_v, \sigma_{кр}$ и $B_{кр}$ косвенно характеризуют требования по нагреванию, механической прочности и распределению поля в воздушном зазоре. В качестве критического по механической прочности рассматривается сечение, по которому возможно отгибание и отрыв кромки полюсного наконечника, а по распределению индукции — минимальное сечение на пути магнитного потока к поверхности полюсного наконечника.

Функция h_0 зависит от конструктивных и обмоточных данных, тока возбуждения и для своего определения требует расчета магнитной цепи индуктора с учетом рассеивания. Поэтому h_0 нельзя выразить аналитически через геометрические размеры индуктора, как в предыдущем примере. Следовательно, частные производные h_0 по геометрическим размерам неизвестны и аналитический подход к решению задачи невозможен.

Числовой подход к решению задачи требует применения ЭВМ и поисковых методов оптимизации. При решении данного примера в качестве параметров оптимизации приняты высота полюсного наконечника h_p , высота h_m и ширина b_m полюсного сердечника, высота ярма h_j . Однако независимыми являются только параметры h_m и b_m , так как h_j жестко связан с b_m , а h_p однозначно определяется одним из равенств $\sigma_{кр} = \sigma_{доп}$ или $B_{кр} = B_{доп}$. Они обусловлены тем, что возникающее в процессе оптимизации стремление увеличить окно обмотки возбуждения приводит к превращению соответствующих неравенств и равенства. Все остальные исходные данные расчета индуктора с учетом предыдущих этапов расчета генератора предполагаются фиксированными. Для поиска оптимальных решений использованы градиентный метод и метод локального динамического программирования. Числовое решение рассматриваемой задачи не достигает конечной цели, т. е. не приводит к уравнениям расчета оптимальных значений параметров оптимизации. Конечную цель можно достичь только при сочетании числовых результатов с методами планирования эксперимента. При этом в качестве единичного эксперимента следует рассматривать отдельное оптимальное решение рассматриваемой задачи, полученное для конкретного набора исходных данных. В качестве факторов можно рассматривать любые независимые исходные данные.

Преимущества такого подхода по сравнению с чисто аналитическим проявляются в том, что все необходимые расчеты можно выполнять без каких-либо упрощений. Поэтому точность получаемых статических уравнений в основном определяется выбранной формой полинома и погрешностями обработки матриц планирования. Так как формы полинома можно последовательно усложнять, то, следовательно, конечные уравнения можно практически получить с любой желаемой точностью.

В качестве факторов при постановке планируемого эксперимента приняты следующие исходные данные расчета индуктора: $B_{\delta_3} = (\Phi_d + \Phi_{\delta_d})/\alpha l$ — эквивалентная индукция, полученная в предположении, что весь поток воздушного зазора проходит через поверхность полюсного наконечника; D_p — наружный диаметр ин-

дуктора (ротора); λ — конструктивный коэффициент (l/D_p) ; j_B — плотность тока в обмотке возбуждения.

Этого набора факторов достаточно для определения оптимальных соотношений индуктора при фиксации конструктивного исполнения, числа пар полюсов и активных изоляционных материалов. Конечно, указанные данные принципиально также можно рассматривать в виде факторов, что приведет к более универсальным регрессионным уравнениям. Однако резкое увеличение числа факторов сопровождается неоправданной громоздкостью регрессионных уравнений и большими осложнениями в обработке и оценке результатов факторного эксперимента. Учитывая, что при проектировании синхронных генераторов конструкция, материалы, частота вращения, частота напряжения известны до начала расчетов, эти данные можно считать фиксированными без особой потери общности в конечных результатах.

В данном примере рассмотрим индуктор, выполненный из стали 27КХ с числом пар полюсов $p = 3$, для которого диапазон изменения факторов приведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Фактор	Верхний уровень	Нижний уровень	Основной уровень
$B_{\delta\sigma}$, Тл	1,1	0,8	0,95
D_p , мм	200	120	160
λ , о. е.	0,6	0,4	0,5
j_B , А/мм ²	30	10	20

Принимая в качестве результатов единичного эксперимента решения задачи частичной оптимизации с помощью серии факторных экспериментов, запланированных для получения полного уравнения регрессии первого порядка, получаем:

$$F_{я д \max} = 5133 - 920 B_{\delta\sigma}^* + 2188 D_p^* + 2004 j_B^* + 528 \lambda^* - 217 B_{\delta\sigma}^* D_p^* - 256 B_{\delta\sigma}^* j_B^* + 770 D_p^* j_B^*; \quad (3.55)$$

$$b_{м \text{ опт}} = 2,96 + 0,187 B_{\delta\sigma}^* + 0,831 D_p^* + 0,625 j_B^* + 0,0187 B_{\delta\sigma}^* D_p^* - 0,0375 B_{\delta\sigma}^* j_B^* + 0,0312 D_p^* j_B^*; \quad (3.56)$$

$$H_{м \text{ опт}} = 3,38 + 0,525 D_p^* - 0,231 j_B^* - 0,0437 B_{\delta\sigma}^* D_p^* - 0,1 D_p^* j_B^*; \quad (3.57)$$

$$h_{p \text{ опт}} = 1,109 - 0,02B_{\delta_3}^* + 0,312D_p^* - 0,026j_n^* - \\ - 0,046B_{\delta_3}^*D_p^* + 0,011B_{\delta_3}^*j_n^* - 0,02D_p^*j_n^*. \quad (3.58)$$

В уравнениях (3.55)—(3.58) исключены члены, не оказывающие практического влияния на конечный результат. Максимальная погрешность (%) по модулю не превышает в определении $F_{я d \text{ max}} - S$, $b_{m \text{ опт}} - 4$, $h_{m \text{ опт}} - 4$, $h_{p \text{ опт}} - 5$. Такая точность удовлетворительна для инженерной практики проектирования. Результаты расчетов по этим уравнениям хорошо согласуются с результатами полной оптимизации синхронных генераторов на ЭВМ. Дальнейшее повышение точности до 1...2% достигается путем использования регрессионных уравнений второго порядка, что, однако, связано с некоторым усложнением вида уравнений.

Основная ценность оптимальных соотношений, подобных (3.55)—(3.58), заключается в том, что они позволяют исключить из процесса оптимизации генератора расчет индуктора и однозначно определять его параметры при заданных значениях факторов. Однако в каждом конкретном случае к использованию таких оптимальных соотношений надо подходить с должной осторожностью, ибо не всегда частичный критерий оптимизации (максимальное использование индуктора) соответствует с требуемым приближением полному критерию оптимальности. Кроме того, в некоторых случаях на расчет индуктора налагается ряд дополнительных ограничений, например по диаметру вала, что не учтено при получении (3.55)—(3.58).

§ 3.6. Переход к вычислительным моделям

Математические модели ЭМ, полученные рассмотренными выше методами, непригодны для точных расчетов на ЭВМ вследствие отсутствия общих аналитических выражений для их решения. Вычислительные методы, реализуемые в ЭВМ, являются приближенными и учитывают необходимость замены операций дифференцирования и интегрирования арифметическими операциями. Точность вычислений определяется, с одной стороны, техническими характеристиками ЭВМ, а с другой — погрешностями аппроксимации математических моделей ЭМ и вычислительных методов. Математические модели, представленные в форме, удобной для реализации на ЭВМ, часто называются *цифровыми моделями*. Таким образом, для моделирования ЭМ в САПР недостаточно построить математическую модель. Это можно считать только первым этапом моделирования, после которого следует построить цифровую модель, выбрать вычислительный алгоритм и состав-



Рис. 3.10. Графическая дискретизация непрерывных функций

вить программу вычислений на ЭВМ. Эти действия в совокупности принято называть *численным методом моделирования*.

Основу численных методов моделирования ЭМ составляют методы перехода от дифференциальных уравнений динамики и электромагнитного поля к разностным уравнениям, которые легко вычисляются на ЭВМ. Этот переход осуществляется путем аппроксимации непрерывных функций и процессов их дискретными аналогами. На рис. 3.10, а приведена непрерывная функция $x(t)$. Если учесть, что дискретным аналогом непрерывной величины является совокупность ее дискретных значений на интервале, на котором определена непрерывная величина, то дискретный аналог $x(t)$ можно представить совокупностью точек на рис. 3.10, б. Эти точки называются *узловыми точками* и делят область определения непрерывной величины (функции) на подобласти (элементы). В простейшем случае функции одной переменной каждый элемент образуется двумя соседними узловыми точками. На рис. 3.10, в, г эти элементы обозначены 1, 2, 3, 4, 5. Через две точки можно провести прямую линию. Следовательно, на каждом элементе $x(t)$ можно аппроксимировать линейным уравнением типа

$$x = a_0 + a_1 t, \quad (3.59)$$

где a_0 и a_1 определяются с помощью значений x и t в соответствующих узловых точках.

Используя (3.59), $x(t)$ на интервале $[0, t_3]$ можно представить приближенно кусочно-линейной функцией (рис. 3.10, в).

С помощью двух узловых точек можно не только провести прямую (3.59), но также найти новую характеристику функции — среднее значение для k -го элемента:

$$x_{\text{ср.}k} = [x(t_{k-1}) + x(t_k)]/2. \quad (3.60)$$

Используя (3.60), непрерывную $x(t)$ можно аппроксимировать кусочно-постоянной функцией с разрывами первого рода в узловых точках (рис. 3.10, *з*). На точность аппроксимации во всех случаях влияет отклонение аппроксимирующей функции от исходной на каждом интервале (рис. 3.10, *д*, *е*), и она тем выше, чем меньше величина элемента по аргументу.

При применении (3.59) интеграл от $x(t)$ на k -м элементе имеет вид

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} x(t) dt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left[x(t_{k-1}) + \frac{x(t_k) - x(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} (t - t_{k-1}) \right] dt =$$

$$= \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left[\frac{(t_k - t_{k-1})x(t_{k-1}) + (t - t_{k-1})x(t_k)}{t_k - t_{k-1}} \right] dt = x_{\text{ср.}k} (t_k - t_{k-1}). \quad (3.61)$$

Таким образом, при аппроксимации элемента $x(t)$ и трапецией (3.59) и прямоугольником (3.60) значение интеграла (3.61) получается одинаковым. Однако выражения полных интегралов для случая постоянства аргументов всех элементов ($\Delta t = t_k - t_{k-1} = \text{const}$) получаются разными:

- при интегрировании методом трапеций

$$\int_{t_0}^{t_N} x(t) dt = \Delta t [x(t_0)/2 + x(t_0 + \Delta t) + x(t_0 + 2\Delta t) + \dots + x(t_N)/2]; \quad (3.62)$$

- при интегрировании методом средней точки

$$\int_{t_0}^{t_N} x(t) dt = \Delta t [x(t_0 + \Delta t/2) + x(t_0 + 3\Delta t/2) + \dots + x(t_N - n\Delta t/2)]. \quad (3.63)$$

Как показано в [37], точность вычислений по (3.63) выше, чем по (3.62).

В общем случае элементы $x(t)$ можно создать большим числом узловых точек. Например, в случае трех узловых точек для аппроксимации можно использовать квадратичные функции (рис. 3.10, *ж*). В зависимости от вида аппроксимирующей функции используются различные формулы численного интегрирования: Эйлера—Маклорена, Симпсона, **Ньютона—Котеса** и др. Во всех случаях оценка интеграла осуществляется последовательностью арифметических действий. Применительно к цифровому моделированию ЭМ можно рекомендовать наиболее простые формулы типа (3.62)

и (3.63), для которых имеются стандартные программы расчетов на ЭВМ.

Линейная аппроксимация $x(t)$ на дискретных элементах позволяет определить производную в k -й узловой точке в виде

$$(dx/dt)_k = x(t_{k+1}) - x(t_k)/\Delta t, \quad (3.64)$$

что приводит к рекуррентному соотношению Эйлера

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + \Delta t(dx/dt)_k, \quad (3.65)$$

в котором производная $(dx/dt)_k$ определяется непосредственно из дифференциального уравнения, описывающего $x(t)$ в момент t_k , например из уравнения (2.1). Используя совместно (3.65) и (2.1), можно последовательно вычислять значения $x(t)$ и ее производной во всех узловых точках, если заданы начальное условие и дискретный аналог $y(t)$ в тех же узловых точках.

Точность решения уравнений динамики ЭМ с помощью (3.65) и (2.1) зависит в основном от выбранного значения Δt и количества дискретных элементов (шагов). Накопление ошибки от шага к шагу не только увеличивает систематические отклонения между $x(t)$ и ее дискретным аналогом, но и создает возрастающую погрешность смещения фазы и запаздывание. Поэтому вычисленные значения $x(t_{k+1})$ обычно корректируются путем предсказания (прогноза) будущих значений $x(t)$ на основании настоящих и прошлых. Различные методы прогноза и коррекции приводят к многообразию рекуррентных уравнений для числовых расчетов дифференциальных уравнений (Рунге—Кутта, Адамса, Милна и др.). Указанные численные методы, как правило, реализованы в стандартном программном обеспечении современных ЭВМ.

Разностную оценку производных типа (3.64) можно использовать для числовых расчетов дифференциальных уравнений, в которые входят лишь производные первого порядка. При наличии производных второго порядка, например, в уравнениях электромагнитного поля (3.14) и (3.15) линейная аппроксимация непрерывной функции на дискретных элементах непригодна, так как вторая производная тождественно равна нулю. В этом случае пользуются разностными оценками вторых производных, получаемых также путем разбиения на дискретные элементы, но уже с помощью квадратичной аппроксимации.

Переход к дискретной модели электромагнитного поля покажем на примере уравнения Лапласа (3.14). Для простоты допустим, что дискретный аналог поля в воздушном зазоре ЭМ получается нало-

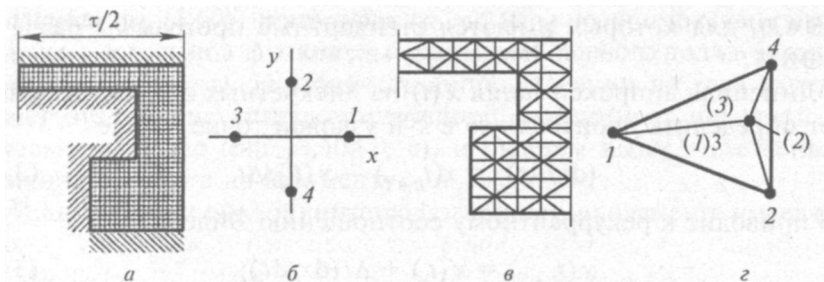


Рис. 3.11. Графическое изображение метода конечных элементов

жением прямоугольной сетки с квадратными ячейками (рис. 3.11, а), причем стороны ячеек одинаковы для всех элементов. Тогда значение $U_m(x, y)$ в каждой узловой точке можно связать со значениями в соседних точках, используя выражение ряда Тейлора и пренебрегая членами выше второго порядка. Если при этом поместить начало координат в произвольную внутреннюю точку O сетки и соседние узловые точки обозначить, как на рис. 3.11, б, то получим

$$\left. \begin{aligned} U_{m1} &= U_{m0} + h(\partial U_m / \partial x)_0 + (1/2!)h^2(\partial^2 U_m / \partial x^2)_0; \\ U_{m2} &= U_{m0} + h(\partial U_m / \partial y)_0 + (1/2!)h^2(\partial^2 U_m / \partial y^2)_0; \\ U_{m3} &= U_{m0} - h(\partial U_m / \partial x)_0 + (1/2!)h^2(\partial^2 U_m / \partial x^2)_0; \\ U_{m4} &= U_{m0} - h(\partial U_m / \partial y)_0 + (1/2!)h^2(\partial^2 U_m / \partial y^2)_0; \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

где h — расстояние между соседними узловыми точками.

Перенося U_{m0} в левую часть, умножая уравнения (3.66) на h и складывая их попарно соответственно осям x и y , получаем

$$\left. \begin{aligned} (\partial^2 U_m / \partial x^2)_0 &= (U_{m1} - U_{m0}) + (U_{m3} - U_{m0}) / h^2; \\ (\partial^2 U_m / \partial y^2)_0 &= (U_{m2} - U_{m0}) + (U_{m4} - U_{m0}) / h^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.67)$$

Складывая (3.67), получаем дискретный аналог уравнения Лапласа в виде алгебраического уравнения

$$\frac{1}{h^2} \sum_{i=1}^4 (U_{mi} - U_{m0}) = 0. \quad (3.68)$$

Аналогично (3.68) можно получить цифровые модели поля и для более сложных случаев, когда, например, расстояния между узло-

выми точками не равны. В целом точность вычислений по уравнениям типа (3.68) возрастает с уменьшением h . Следует также отметить, что в отличие от (3.41), которое справедливо для любой точки поля, уравнение (3.68) справедливо только для конкретной узловой точки. Поэтому для моделирования поля во всем рассматриваемом участке необходимо пронумеровать все узловые точки и записать (3.68) для каждой внутренней узловой точки. В результате получим систему алгебраических уравнений с переменными типа U_{mi} , которую можно решить, задавая значение U_m в граничных точках. Так как число уравнений (число внутренних узловых точек) выбирается большим, чтобы обеспечить нужную точность, то эта система уравнений решается обычно на ЭВМ итерационным методом.

Сущность итерационного метода заключается в следующем. На первой итерации значения U_m в узловых точках на границе рассматриваемой области назначаются исходя из граничных условий. В остальных точках они назначаются произвольно, однако по возможности с учетом физических соображений относительно распределения $U_m(x, y)$. Для простоты их можно назначить одинаковыми и равными, например, нулю. После этого оценивается точность результатов первой итерации с помощью расчета так называемого остатка в каждой узловой точке по формуле

$$R = \frac{1}{h^2} \sum_{i=1}^4 (U_{mi} - U_{m0}). \quad (3.69)$$

Если бы $R = 0$ для всех точек, то значит в каждой из них выполняется (3.68) и, следовательно, первая итерация является решением задачи. Однако это практически невозможно даже при очень большом числе итераций. Поэтому устанавливают условие приближенного равенства нулю

$$|R| \leq \epsilon. \quad (3.70)$$

Если (3.70) не выполняется хотя бы в одном узле, то надо перейти к следующей итерации, изменить соответствующее значение U_m по правилу

$$U_m(n+1) = U_{mn} + cR_n/4, \quad (3.71)$$

где n — номер предыдущей итерации; c — коэффициент, выбираемый в пределах 1—2.

При $c \rightarrow 1$ сходимость решения замедляется (увеличивается число итераций). При $c \rightarrow 2$ сходимость может нарушиться.

Таким образом, установив порядок обхода узлов, легко формализовать алгоритм итерационного метода поиска значений в узло-

вых точках. Как только во всех узлах будет выполнено (3.70), на этом процесс поиска заканчивается. Имеется ряд способов ускорения сходимости итерационного метода, которые изложены в [38].

Изложенный подход к цифровому моделированию составляет основу так называемого *метода конечных разностей*, который отличается простотой алгоритма числовых расчетов поля, но требует большого машиносчетного времени для решения практических задач с удовлетворительной точностью. Основными недостатками этого метода являются необходимость экспериментального выбора коэффициента s и требование дифференцирования $U_M(x, y)$ до второй производной включительно. Эти недостатки не присущи методу конечных элементов, который в последние годы составляет конкуренцию методу конечных разностей при решении полевых задач.

Метод конечных элементов допускает любую геометрическую форму дискретных элементов, на которые делится рассматриваемая область, и любой порядок полинома для аппроксимации $U_M(x, y)$ в пределах элемента. Наиболее широкое применение получили простейшие линейные полиномы первого порядка, которые для двумерной функции принимают вид

$$U_M = a_1 + a_2x + a_3y. \quad (3.72)$$

Плоскость, описываемую (3.72), можно построить заданием трех точек. Поэтому в случае (3.72) выступает треугольная форма элементов с тремя узловыми точками в вершинах (рис. 3.11, в). Треугольники можно строить произвольно, не равными друг другу и с не равными сторонами и углами. Это позволяет охватывать области практически с любой конфигурацией.

Рассмотрим произвольный треугольник с фиксированными вершинами i, j, k . Значения U_M в узловых точках обозначим соответствующими индексами. Тогда в соответствии с (3.72) получим

$$\left. \begin{aligned} U_{Mi} &= a_1 + a_2x_i + a_3y_i; \\ U_{Mj} &= a_1 + a_2x_j + a_3y_j; \\ U_{Mk} &= a_1 + a_2x_k + a_3y_k. \end{aligned} \right\} \quad (3.73)$$

Решая совместно (3.73), получаем значения a_1, a_2, a_3 в зависимости от фиксированных координат узловых точек и величин U_{Mi}, U_{Mj}, U_{Mk} . Подставляя значения a_1, a_2, a_3 в (3.72), получаем новое выражение

$$U_M = N_i U_{Mi} + N_j U_{Mj} + N_k U_{Mk}, \quad (3.74)$$

где N_p, N_r, N_k — коэффициенты формы, которые также являются линейными функциями x, y :

$$\left. \begin{aligned} N_i &= a_i + b_i x + c_i y; \\ N_j &= a_j + b_j x + c_j y; \\ N_k &= a_k + b_k x + c_k y. \end{aligned} \right\} \quad (3.75)$$

Коэффициенты a, b, c постоянны и однозначно определяются через координаты узловых точек. Коэффициенты формы N_p, N_r, N_k отличаются тем, что они равны единице в соответствующих узловых точках и нулю во всех остальных.

Используя (3.74) для каждого элемента, можно составить систему уравнений для любой многоэлементной системы, что покажем на простейшем примере рис. 3.11, г. Заклячая номера элементов $I, 2, 3, 4$ в скобки, получим

$$\left. \begin{aligned} U_m^{(1)} &= N_1^{(1)} U_{m1} + N_2^{(1)} U_{m2} + N_3^{(1)} U_{m3}; \\ U_m^{(2)} &= N_1^{(2)} U_{m1} + N_2^{(2)} U_{m2} + N_3^{(2)} U_{m3}; \\ U_m^{(3)} &= N_1^{(3)} U_{m1} + N_2^{(3)} U_{m2} + N_3^{(3)} U_{m3}. \end{aligned} \right\} \quad (3.76)$$

Таким образом, поле в рассматриваемой области моделируется элементами с кусочно-линейными плоскостями, допускающими разрывы первого рода на границах треугольных элементов. Решение (3.76) должно удовлетворять уравнениям (3.14) или (3.15) и граничным условиям, заданным в узловых точках границы. Однако линейная форма аппроксимирующих функций не позволяет получать оценки вторых производных для (3.14) или (3.15). Поэтому в методе конечных элементов используется вариационный подход к составлению уравнений поля.

С вариационной точки зрения выполнение, например, (3.14) равносильно минимизации интегрального функционала

$$J = \int_V (1/2) [(\partial U_m / \partial x)^2 + (\partial U_m / \partial y)^2] dV. \quad (3.77)$$

С учетом (3.76) подставим необходимое условие минимизации J :

$$\partial J / \partial U_m = 0, \quad (3.78)$$

которое должно выполняться во всех узловых точках. С помощью (3.74)—(3.77) в [38] показывается, что условие (3.78), записанное в

узловых точках, приводит в конечном счете к системе линейных алгебраических уравнений с неизвестными значениями U_m в узловых точках. При задании граничных условий эту систему можно решить на ЭВМ известными численными методами, например итерационным по аналогии с методом конечных разностей.

Во многих случаях для решения уравнений по методу конечных элементов удобным оказывается *метод прогонки (исключения)*, обеспечивающий более высокую точность вычислений. Ряд эффективных алгоритмов расчета электромагнитных полей на ЭВМ приведен в [39].

§ 3.7. Моделирование процессов оптимизации

Конечной целью автоматизированного проектирования является отыскание решения, оптимального в глобальном смысле. Однако поиск локального оптимума в большинстве случаев является составной частью процесса поиска глобального оптимума. Кроме того, в определенных формулировках задачи (задача выпуклого программирования и др.) локальный оптимум совпадает с глобальным. Поэтому конструирование алгоритмов локального поиска имеет важное, а иногда и самостоятельное значение при разработке алгоритмов оптимального проектирования ЭМ.

Поиск локального оптимума в общем виде представлен схемой, приведенной на рис. 3.12, а. Блок формирования задачи включает алгоритмы формального описания задачи проектирования, а также алгоритмы преобразования исходной формулировки задачи с ограничениями к форме задач без ограничений.

Преобразование задачи осуществляется путем введения новой целевой функции в течение всего процесса поиска или на отдельных его этапах. Систематическая смена целевой функции характерна для методов штрафных функций, а эпизодическая — методов скользящего допуска. Указанные методы наиболее эффективны для преобразования задач, а сами преобразования целесообразны в тех случаях, когда ограничения задачи носят нелинейный характер. В тех случаях, когда в формулировку задачи включены как нелинейные, так и линейные ограничения, нередко используется комбинированный подход. Преобразование задачи осуществляется только относительно нелинейных ограничений, т. е. исходная задача сводится к задаче с новой целевой функцией и прежними линейными ограничениями.

Идеи методов штрафных функций и скользящего допуска описаны в § 2.7. Однако выбор формы непосредственно функции штрафа и характера последовательности коэффициентов стоимости штрафа осуществляется двояко в зависимости от вида ограничений.

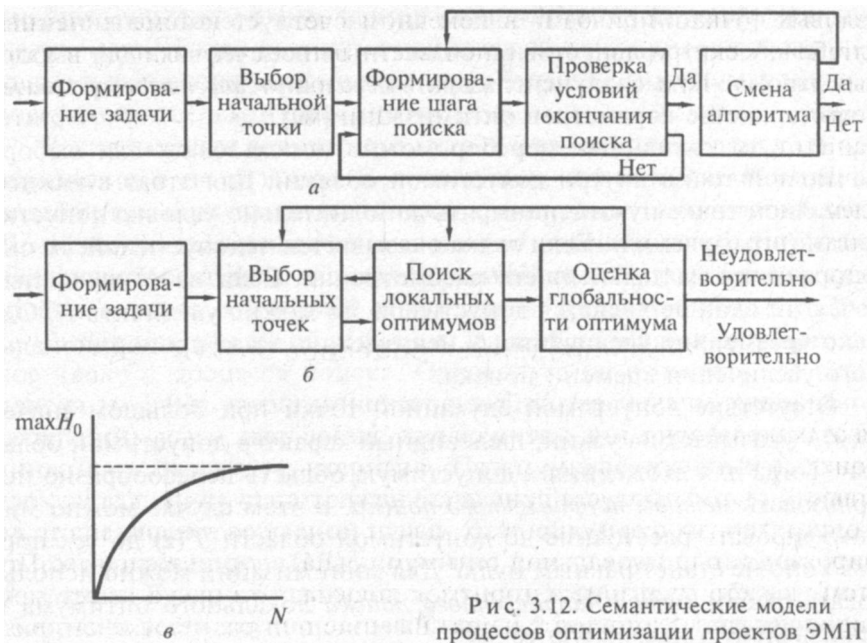


Рис. 3.12. Семантические модели процессов оптимизации проектов ЭМП

В общем случае, когда ограничения представлены как в форме равенств, так и неравенств, целесообразно включать следующую целевую функцию общей и неизменной формы:

$$H_0(\mathbf{z}) + r_{1k} \sum \omega_{1j} [H_{1j}(\mathbf{z})]^2 + r_{2k} \sum [\omega_{2j} / H_{2j}(\mathbf{z})], \quad (3.79)$$

где r_{1k} — принадлежит возрастающей $\{r_{1k}\}$; r_{2k} — принадлежит убывающей к нулю $\{r_{2k}\}$; ω_{1j} и ω_{2j} — коэффициенты, задаваемые или принимаемые за единицу; H_{1j} и H_{2j} — соответственно ограничения равенства и неравенства.

При отсутствии ограничений в виде равенств или неравенств соответствующая последовательность коэффициентов r_k принимается тождественно равной нулю. Если преобразование задачи вообще нецелесообразно, то одновременно $\{r_{1k}\}$ и $\{r_{2k}\}$ принимаются равными нулю в (3.79) и отдельно рассматриваются $H(\mathbf{z})$.

Выбор начальной точки поиска осуществляется в зависимости от формулировки задачи. При отсутствии ограничений или их преобразований к функциям штрафа с внешней точкой начальная точка выбирается произвольно. При наличии ограничений или их преобразовании к функциям штрафа с внутренней точкой начальная точка выбирается внутри допустимой области. Учитывая это, для

целевой функции (3.79) в общем случае следует выбирать начальную точку внутри допустимой области. Во всех случаях для выбора начальной точки можно использовать *метод случайного перебора точек* в пространстве параметров оптимизации [40].

Этот же случайный перебор можно использовать для выбора начальной точки внутри допустимой области. Для этого в каждой случайной точке нужно проверять дополнительно условия допустимости (ограничения). Если точка оказывается недопустимой, то она исключается из дальнейшего рассмотрения. Если из N случайных точек ни одна не является допустимой, то можно увеличить N . Однако чрезмерное увеличение N невозможно из-за пропорционального увеличения времени поиска.

Отсутствие допустимой случайной точки при большом значении N указывает на узкий, шелевидный характер допустимой области. Тогда для вхождения в допустимую область целесообразно использовать *методы направленного поиска*. В этом случае можно минимизировать расстояние до допустимой области $T(\mathbf{z})$ до тех пор, пока оно не станет равным нулю. Для минимизации можно использовать любой *метод направленного поиска* локального оптимума и произвольную начальную точку.

Таким образом, в блок выбора начальной точки на рис. 3.12, а целесообразно включать рассмотренный выше алгоритм случайного перебора, указания по вычислению $H_0(\mathbf{z})$, $H_j(\mathbf{z})$ и $T(\mathbf{z})$ в точках пространства параметров оптимизации, ограниченных снизу и сверху по величине, а также указания по привлечению методов направленного поиска для минимизации $T(\mathbf{z})$ и переходу от случайного перебора к минимизации $T(\mathbf{z})$.

Этот блок должен позволять и априорное задание начальной точки с учетом условий той или иной формулировки задачи. Формирование шага (текущей итерации) поиска требует определения направления и его величины в фиксированной точке пространства параметров оптимизации. Направление поиска можно определить любыми методами направленного поиска или их комбинациями, которые позволяют в общем случае учитывать наличие линейных ограничений и овражных ситуаций. Нелинейные ограничения в исходной формулировке задачи целесообразно исключить путем соответствующих преобразований.

В комбинированных алгоритмах направление поиска выбирается по-разному в зависимости от приближения к оптимуму. Вдали от оптимума целесообразны направления, обеспечивающие улучшение значений целевой функции. По мере приближения к оптимуму бо-

лее предпочтительными становятся направления максимального улучшения. Вблизи оптимума наиболее эффективны направления в сторону вероятного расположения оптимума с учетом кривизны поверхности целевой функции.

Величина **шага** для каждого метода или алгоритма поиска может определяться по-разному. В простейших случаях шаг выбирается постоянным или изменяется пропорционально модулю градиента H_0 . Максимальная величина шага (до достижения границы или наилучшего в данном направлении значения H_0) выбирается с помощью методов *одномерной оптимизации*, рассмотренных в [16].

Выбор максимальной величины шага обеспечивает их минимальное число в процессе поиска. Однако это не означает, что время поиска на ЭВМ также минимально. С уменьшением числа шагов (итераций) возрастает время, необходимое для определения величины шага на каждой итерации. Поэтому эффективный подход к выбору величины шага должен быть индивидуальным в зависимости от специфики решаемой задачи. Тем не менее опыт оптимального проектирования на ЭВМ позволяет дать следующие общие рекомендации. Вдали от оптимума и границ допустимой области целесообразно вести крупношаговый поиск с максимальной величиной шага. Вблизи оптимума или границ допустимой области следует переходить на мелкошаговый поиск с шагом, пропорциональным модулю градиента H_0 или постоянным.

Таким образом, блок формирования шага поиска на рис. 3.12, *a* должен содержать различные методы выбора направления и величины шага, а также указания по их целесообразным комбинациям. Указания могут быть не только строго фиксированными, но и изменяться по командам извне.

Условия окончания поиска должны определяться заданной степенью близости между искомым и полученным оптимальными решениями. При отсутствии априорной информации и достаточно общих предположениях о конечности функций и параметров оптимизации эти условия можно получить с помощью неравенств

$$\left| H_0(\dot{\mathbf{Z}}) - H_0(\dot{\mathbf{Z}}_n) \right| \leq \varepsilon_0; \quad (3.80)$$

$$\left| \dot{z}_n - \dot{z}_{ni} \right| \leq \varepsilon_n, \quad n = 1, \dots, p, \quad (3.81)$$

где \dot{z}_n и \dot{z}_{ni} — соответственно полученные и искомые параметры оптимизации; $H_0(\dot{\mathbf{Z}})$ и $H_0(\dot{\mathbf{Z}}_n)$ — полученное и искомое оптималь-

ные значения H_0 ; ϵ_0 и ϵ_n — допустимые погрешности поиска оптимальных значений H_0 и z_n .

Неравенства (3.80) и (3.81) практически нельзя использовать, так как искомый результат заранее не известен. Поэтому вместо близости искомого и полученного результата практическое применение нашло понятие близости полученных результатов на соседних итерациях (шагах), т. е. вместо (3.80) и (3.81) используются следующие неравенства:

$$\epsilon_{0k} = |H_0(Z_k) - H_0(Z_{k+1})| \leq \epsilon_0; \quad (3.82)$$

$$\epsilon_{nk} = |z_{nk} - z_{n(k+1)}| \leq \epsilon_n, \quad n = 1, \dots, p, \quad (3.83)$$

где k — номер текущей итерации.

Отсюда следует, что число итераций надо увеличивать до тех пор, пока не будет одновременно удовлетворено (3.82) и (3.83).

Вместо условий (3.82) и (3.83) часто пользуются одним интегральным условием

$$\sqrt{[H_0(Z_k) - H_0(Z_{k+1})]^2 + \sum_{n=1}^p [z_{nk} - z_{n(k+1)}]^2} \leq \epsilon. \quad (3.84)$$

При наличии априорной информации о решаемой задаче или методах решения можно сформулировать условия окончания поиска, имеющие частный характер, но улучшающие точность или время решения. Например, если известно, что H_0 — полая функция в

окрестности оптимума, то можно минимизировать $\sum_{n=1}^p [z_{nk} - z_{n(k+1)}]^2$

при выполнении (3.82). Или же при поиске экстремума градиентным методом вместо (3.82)—(3.84) удобнее пользоваться оценкой модуля градиента. Когда модуль становится меньше заданной малой величины, поиск прекращается.

Условия окончания поиска различной степени общности, а также указания по их применению при решении конкретных задач составляют содержание блока, который принимает решение о прекращении процесса поиска (см. рис. 3.12, а). Однако поиск может быть прекращен не только в достаточной близости от искомого оптимума, но и в особых ситуациях типа «овражных», когда метод поиска становится неэффективным. Поэтому после окончания поиска тем или иным методом желательно выяснить, имеется ли в наличии более эффективный метод, позволяющий вести поиск дальше. Эта проверка осуществляется в последнем блоке (см.

рис. 3.12, а), и если нет более эффективного метода, то поиск завершается окончательно.

При наличии в допустимой области нескольких локальных оптимумов требуется выбрать наилучший из них, т. е. найти *глобальный оптимум*. Процесс поиска в этом случае организуется с помощью двух основных подходов. Первый подход использует непосредственное стремление к глобальному оптимуму; второй подход, наоборот, сначала предполагает поиск локальных оптимумов, а затем путем их сравнения выбор глобального оптимума.

С точки зрения конечной цели поиска первый подход более естествен и предпочтителен, так как не требует избыточной информации о локальных оптимумах. Однако известно, что методы поиска глобального оптимума (методы перебора и динамического программирования) имеют на практике ограниченное применение из-за большого машиносчетного времени. Поэтому при решении практических задач часто более эффективными оказываются алгоритмы, включающие в себя поиск локальных оптимумов. Обобщения по использованию методов локального поиска для решения задач глобальной оптимизации даны в [41].

Пусть в допустимой области поиска имеется l локальных оптимумов ($l > 1$ — конечное число). Допустимое множество точек разбито на ряд подмножеств, т. е.

$$\bigcup_{k=1}^l D_{zk} = D_z, \quad (3.85)$$

таким образом, что D_k унимодально (содержит одно оптимальное значение H_0). Следовательно, если найти оптимальное решение для всех D_{zk} , то отыскание глобального оптимума для D_z путем сравнения решений для D_{zk} ($k=1, \dots, l$) гарантируется. В силу унимодальности D_{zk} оптимальное решение для каждого из них можно получить алгоритмами локального поиска. Таким образом, с помощью разбиения (3.85) поиск глобального оптимума реализуется в виде независимых локальных поисков с последующим сравнением их результатов.

Для практической реализации изложенной схемы поиска достаточно в каждом D_{zk} найти по одной произвольной точке, из которой можно начинать соответствующий локальный поиск. Однако именно этот этап вызывает наибольшие затруднения, так как заранее неизвестны l и правила разбиения (3.85). Поэтому начальные точки в D_{zk} находятся вероятностно-статистическим путем с помощью методов перебора. Чем больше число перебираемых точек, равномерер-

но распределенных в D_2 , тем больше вероятность того, что в каждом D_{zk} окажется хотя бы по одной начальной точке. Вероятность этого события стремится к единице при стремлении числа перебираемых точек к бесконечности.

Из-за случайного характера определения начальных точек в D_{zk} соответствующие алгоритмы глобальной оптимизации относятся к классу вероятностно-статистических алгоритмов. Общая схема этого алгоритма представлена на рис. 3.12, б, с помощью которого рассмотрим основные процедуры вероятностного глобального поиска.

Блок формирования задачи по своему содержанию аналогичен соответствующему блоку для алгоритмов локального поиска (см. рис. 3.12, а). Блок выбора начальных точек включает методы перебора (обычно метод Монте-Карло). Число перебираемых точек N фиксируется заранее. Выше указывалось, что с ростом N увеличивается вероятность отыскания глобального оптимума. Однако реализация соответствующего количества локальных поисков может оказаться очень трудоемкой даже для мощных современных ЭВМ. В таких случаях из N начальных точек производится отбор приемлемого числа точек, что требует включения в рассматриваемый блок также правил отбора.

Блок поиска локальных оптимумов на рис. 3.12, б по существу включает в себя схему на рис. 3.12, а, за исключением первых двух блоков. Содержание этого блока составляют алгоритмы локального поиска совместно с правилами их смены и условиями окончания поиска. Локальный поиск повторяется столько раз, сколько отобрано начальных точек в предыдущем блоке. Для сокращения суммарного времени **ЛОКАЛЬНЫХ** поисков иногда применяется следующий прием. Результаты поисков из разных начальных точек сравниваются на промежуточных стадиях через равные отрезки времени. При этом поиски, которые за одинаковое время показывают существенно худшие результаты, прекращают, не дожидаясь окончательных результатов.

Если локальные поиски ведутся алгоритмами случайных направлений, то выбор начальных точек существенно упрощается и чередуется с процессами поиска. Сначала выбирается одна начальная точка в D_2 , из которой начинается поиск. После отыскания соответствующего локального оптимума организуется поисковое движение в случайных направлениях до попадания в подмножество D_{zk} , которое является областью притяжения нового локального оптимума. Найденная в этом подмножестве случайная точка рассматривается как новая начальная точка, из которой снова начинается локальный поиск, и т. д. до тех пор, пока общее число начальных точек не

станет равным N . Обычно локальный поиск совершается мелкими шагами, а перемещение в область притяжения нового оптимума — крупными.

Другой модификацией метода случайных направлений является совмещение операций формирования шага локального поиска со случайным скачкообразным смещением исходной точки. Эффект случайного скачка исходной точки эквивалентен эффекту выбора новой начальной точки, а вероятностная сходимости к глобальному оптимуму достигается экспериментальным выбором соотношений шагов поиска и скачка.

Кроме алгоритмов направленного поиска в блок поиска локальных оптимумов можно включать также *алгоритмы вероятностной аппроксимации* целевой функции. Применяя идеи сглаживания и фильтрации путем усреднения результатов случайных испытаний, эти алгоритмы позволяют строить такие аппроксимирующие функции, которые унимодальны и имеют оптимум, совпадающий с глобальным оптимумом H_0 . Тогда поиск глобального оптимума H_0 сводится к поиску локального оптимума аппроксимирующей функции.

В блоке оценки глобальности оптимума (см. рис. 3.12, б) производится сравнительный анализ найденных ранее локальных оптимумов, выбор оптимального решения, подозреваемого на глобальность, и оценка его удовлетворительности. При неудовлетворительной оценке выбранного решения производится смена алгоритмов или параметров в блоках выбора начальных точек и поиска локальных оптимумов, что указано соответствующими обратными связями на рис. 3.12, б.

Необходимость оценки наилучшего из локальных оптимумов на глобальность вызвана вероятностным характером процессов поиска и, следовательно, асимптотической сходимостью к глобальному оптимуму. Поэтому необязательно, чтобы наилучший из найденных локальных оптимумов совпадал с искомым глобальным оптимумом. Для повышения вероятности этого совпадения (уверенности в глобальной оптимальности полученного решения) требуется дополнительная информация, получаемая либо за счет дополнительных вычислений, либо за счет априорных предположений.

Дополнительные вычисления в простейшем случае организуются путем выбора новых начальных точек, т. е. расширением получаемого отрезка кривой сходимости (см. рис. 3.12, в) до тех пор, пока наступит насыщение и новые точки практически не будут улучшать найденные ранее результаты. В более сложных случаях новые начальные точки выбираются одновременно с усовершенствованием и усложнением алгоритмов выборки и отбора, что описано выше.

Во всех случаях увеличение N ограничено ростом машиносчетного времени поиска. Поэтому оценка полученного решения обычно производится с помощью дополнительной априорной информации.

Простейшим априорным допущением может служить задание нижней грани глобального оптимума. Величина нижней грани устанавливается априори на основе обобщения имеющегося опыта проектирования тех или иных конструкций. Как только нижняя грань будет достигнута или превзойдена, полученное решение считается удовлетворительным и поиск прекращается. Однако такой подход дает уверенность лишь в том, что полученный проект будет не хуже известных аналогичных проектов. Поэтому на практике поиск повторяется несколько раз при постепенном увеличении нижней грани. Более сильные априорные допущения приведены в [42].

Во многих практических случаях качество проектов оценивается несколькими важными показателями, каждый из которых с одинаковым успехом может быть принят за критерий оптимальности. В таких случаях *задача оптимального проектирования становится многокритериальной*, а понятие оптимального решения теряет однозначный смысл. Действительно, при наличии нескольких критериев целевая функция заменяется целевой вектор-функцией \mathbf{H}_0 , о которой известно лишь следующее. Заданы все составляющие \mathbf{H}_0 и желательные направления их улучшения в сторону увеличения или уменьшения. Однако остается неясным, какие комбинации составляющих \mathbf{H}_0 предпочтительны, когда нет реальной возможности оптимизировать (максимизировать или минимизировать) каждую составляющую в отдельности.

Одновременная оптимизация составляющих \mathbf{H}_0 возможна лишь в том случае, когда все критерии достигают наилучшего значения в одной и той же точке допустимого множества параметров оптимизации D_2 . Но этот случай является тривиальным, так как для решения задачи достаточно вести поиск оптимума только по одному (любому) из заданных критериев, т. е. свести задачу к однокритериальной. Во всех остальных случаях, когда оптимальные значения отдельных критериев достигаются в различных точках D_2 , остается неопределенной та точка множества D_2 , которая должна быть найдена в процессе поиска.

Неопределенность в формулировке цели поиска является следствием не полностью сформулированной задачи оптимизации, в которой отсутствует информация об имеющихся или предпочтительных связях между составляющими \mathbf{H}_0 . Подобные задачи считаются некорректными в оптимизационном смысле и для своего решения требуют дополнительных преобразований и исследований. При этом

в первую очередь следует выяснить возможности использования известных методов решения корректных (однокритериальных) задач оптимального проектирования.

Переход от не полностью сформулированной задачи к обычной корректной формулировке достигается путем введения единого общего критерия оптимальности. Этот критерий можно представить в виде скалярных или логических функций либо от исходных частных критериев (составляющих \mathbf{H}_0), либо от параметров оптимизации. Если общий критерий сводится к функции частных критериев, то происходит *свертывание частных критериев* или их объединение в единый критерий. Если же общий критерий представляется функцией параметров оптимизации, то общность старой и новой задач сохраняется лишь в отношении формирования D_2 , а связь между новой и старыми целевыми функциями отсутствует. В этом случае задачу с новым критерием можно рассматривать как независимую однокритериальную задачу, которая решается известными методами. Поэтому в дальнейшем будем предполагать, что новый критерий вводится лишь путем свертывания частных критериев.

Свертывание частных критериев осуществляется логико-математическими способами, которые систематизированы в [12]. При выборе того или иного способа следует иметь в виду возможность разделения критериев на качественные и количественные. *Качественные критерии* могут иметь только два вида значений: удовлетворительные и неудовлетворительные. Поэтому качественным критериям можно поставить в соответствие лишь два числа: единицу (в случае успеха) и нуль (в случае неудачи). *Количественные критерии* оперируют полным спектром значений в зависимости от совокупности переменных задачи. Оптимизация качественных критериев в силу их особенностей кажется проще, чем количественных. Однако эта простота обманчива, так как зависимости качественных критериев от параметров оптимизации могут быть намного сложнее, чем у количественных критериев.

Дополнительная информация для свертывания частных критериев не всегда может быть убедительно обоснована. Поэтому с целью применения поисковых методов для решения многокритериальных задач иногда вводится понятие *эффективного вектора* по аналогии с оптимальным вектором в однокритериальных задачах. Эффективным называется такой вектор $\mathbf{H}_0(\mathbf{Z}_{эф})$, у которого все составляющие (частные критерии) одновременно удовлетворяют условию

$$H_{0k} = (Z_{эф}) \geq H_{0k}(Z), k = 1, \dots, l \quad (3.86)$$

для всех точек D_z , за исключением $Z = Z_{эф}$, где эти неравенства превращаются в строгие равенства. Из определения следует, что эффективные векторы (точки) можно рассматривать как в пространстве параметров оптимизации, так и в пространстве частных критериев в отличие от оптимальных векторов (точек), которые рассматриваются только в пространстве параметров оптимизации.

Геометрическую интерпретацию эффективных векторов (точек) можно дать следующим образом (рис. 3.13, а). Если H_{0k} — непрерывные функции от z_1, \dots, z_p , то условия (3.86) выполняются одновременно для всех частных критериев в точках касания их линий и поверхностей равного уровня, а также в точках оптимума H_{0k} . Так как таких точек много, то эффективные точки образуют соответствующее подмножество $D_{zэф}$ в множестве D_z . На рис. 3.13, б, в приведены примеры $D_{эф}$ в виде отрезка кривой и участка плоскости, опирающихся на максимум частных критериев. Отрезок эффективной кривой, включая границы плоскости, в любой точке перпендикулярен линиям (поверхностям) равного уровня тех частных критериев, на максимумы которых он опирается.

Более наглядно и при более общих предположениях множество эффективных точек (векторов) можно рассматривать в пространстве координат H_{0k} . В силу однозначных зависимостей $H_{0k}(Z)$ каж-

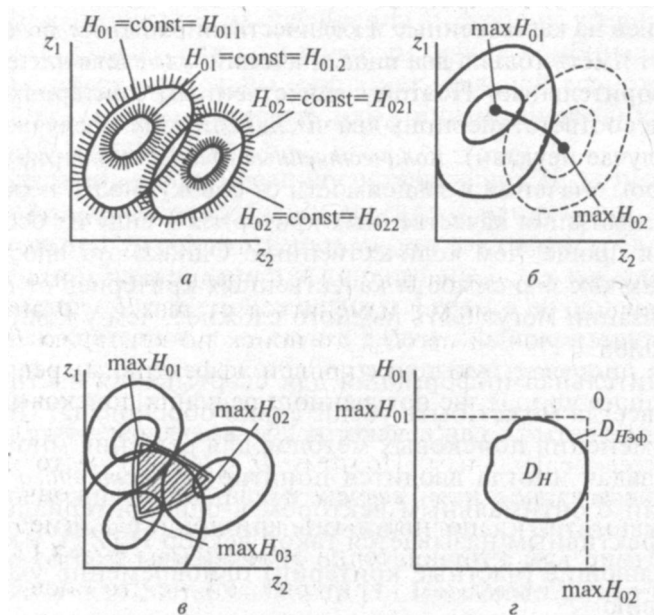


Рис. 3.13. Топология множества неулучшаемых решений

дой точке в пространстве параметров оптимизации соответствует единственным образом определенная точка в пространстве частных критериев. Следовательно, множеству D_z можно поставить в соответствие эквивалентное замкнутое множество D_H (рис. 3.13, *з*), а подмножеству $D_{z\text{эф}}$ — подмножество $D_{H\text{эф}}$ (жирный отрезок кривой на рис. 3.13, *з*). Точки $D_{H\text{эф}}$ являются граничными и ближайшими к идеальному, но не допустимому решению многокритериальной задачи, в котором все H_{0k} максимальны (точка 0 на рис. 3.13, *з*). Таким образом, в пространстве координат H_{0k} подмножество $D_{H\text{эф}}$ легко выделяется с помощью линий и плоскостей, перпендикулярных координатным осям в точках максимума соответствующего частного критерия.

Понятие эффективных решений позволяет организовать их целенаправленный поиск следующим образом. Направлением поиска может служить любое направление, вдоль которого движение, по крайней мере, на малый шаг улучшает хотя бы один частный критерий и не ухудшает ни одного из них. Среди возможных направлений этого типа целесообразно выбрать такие, которые обеспечивают интенсивное улучшение большинства частных критериев. Если же любое направление ухудшает хотя бы один частный критерий, то это означает, что исходная точка является эффективной и дальнейший поиск следует прекратить.

В [12] доказано, что поиск эффективных решений по существу эквивалентен решению однокритериальных задач при наличии неопределенных факторов. Действительно, поиск эффективной точки завершается в произвольной точке $D_{z\text{эф}}$ ($D_{H\text{эф}}$), которая отличается от других эффективных точек совокупности значений частных критериев. Произвольную точку из $D_{z\text{эф}}$ можно получить также при поиске по критерию H_{0p} если входящие в него дополнительные величины не определены в заданном диапазоне их изменения. Например, если для случая на рис. 3.13, *б* предполагать, что H_{02} является ограничением и может изменяться от $\max H_{02}$ до значения в точке, соответствующей $\max H_{01}$, то поиск по критерию H_{01} может привести в произвольную точку кривой эффективных решений.

Дальнейшее улучшение полученного решения поисковыми методами невозможно, так как неясно, какое же решение из $D_{z\text{эф}}$ ($D_{H\text{эф}}$) считать более правильным. Поэтому $D_{z\text{эф}}$ ($D_{H\text{эф}}$) часто называют *множеством неулучшаемых решений* и для выбора окончательного решения используют дополнительные критерии, например кратчайшее расстояние эффективной точки **ОТ ТОЧКИ 0** на рис. 3.13, *з*. Однако введение дополнительного критерия есть не что иное, как формирование H_{0l} с исключением неопределенных факторов и оно также требует дополнительных обоснований.

Таким образом, ни методы свертывания частных критериев, ни поиск эффективных решений не позволяют выбрать окончательное решение многокритериальной задачи до тех пор, пока не будет установлен единый, однозначно определяемый критерий оптимальности типа $H_{ог}$. Обоснованное формирование $H_{ог}$ в конечном счете выполняется с помощью дополнительных исследований связей между $H_{ок}$ хотя бы на подмножестве $D_{z\text{эф}}$ ($D_{H\text{эф}}$). Численными методами дополнительных исследований могут быть методы поиска оптимума в однокритериальных задачах. Обычно сначала ведется поиск оптимумов по каждому $H_{ок}$ в отдельности, независимо друг от друга. Таким путем находятся опорные граничные точки $D_{z\text{эф}}$ ($D_{H\text{эф}}$) и с их помощью определяются диапазоны изменения $H_{ок}$ в точках $D_{z\text{эф}}$. Затем, фиксируя в полученных диапазонах значения частных критериев, решая однокритериальные оптимизационные задачи и задачи планируемого эксперимента, можно построить и исследовать различные зависимости типа $\max H_{о1}(H_{о2})$ или $\max H_{о1}(H_{о2}, H_{о3}, \dots)$. Анализ подобных зависимостей позволяет во многих случаях достаточно обоснованно формировать $H_{ог}$.

При численном моделировании процессов поиска оптимума целесообразно ограничения задачи учитывать в виде равенств, так как они сокращают размерность задач за счет уменьшения числа переменных. Следствием этого является экономия машинного времени. Однако не все равенства могут быть использованы явным образом. Неявные решения при расчетах на ЭВМ находятся приближенно путем введения в вычислительные модели обратных итерационных связей. С их помощью осуществляется варьирование тех переменных, которые оказывают заметное влияние на выполнение неравенств. В качестве примера на рис. 3.14 показан диапазон изменения переменной, который соответствует выполнению ограничивающего равенства с заданной точностью $0 < \epsilon \leq 1$. На выбор точности сильно влияет шаг варьирования переменной. При большом шаге переменная δ может вообще не попасть в заданный коридор и тогда начнется заикливание процесса поиска, как показано на рис. 3.14. Чтобы исключить возможность заикливания, надо выполнить условие $K \geq 2$, где K — число шагов изменения переменной в заданном диапазоне. В то же время K нельзя выбирать большим, так как это приводит к увеличению зоны нечувствительности соответствующей итерационной связи и преждевременной остановке процесса поиска. Опыт автоматизированного проектирования показывает, что хорошие результаты дают значения $K = 3..4$ и выбор точности из условия

$$\epsilon K_{\min} = K(\delta + \Delta\delta) - K(\delta).$$

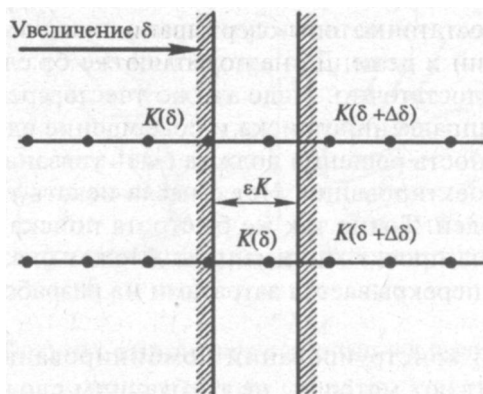


Рис. 3.14. Выбор шага и точности поиска

Разработка алгоритмов поиска оптимума требует сравнительной оценки и выбора наиболее эффективных методов оптимизации для решения каждой конкретной задачи. Апробацию в практике проектирования ЭТС получило подавляющее большинство методов программирования, рассмотренных выше. Исходя из полученного опыта можно утверждать, что ни один из методов программирования непригоден для реализации поисковых процессов в полном объеме. Реальные задачи проектирования ЭТС столь сложны и многообразны, что для их решения приходится комбинировать несколько разных методов, чтобы получить эффективные алгоритмы поиска оптимума. Во всех комбинациях использование методов упорядоченного перебора или динамического программирования в той или иной мере и форме является, как правило, необходимым. От комбинированных алгоритмов требуются низкая погрешность и высокая вероятность нахождения глобального оптимума, невысокая чувствительность к функциональным свойствам задачи, малый объем вычислений и быстрота поиска.

Обычно сначала конструируется несколько алгоритмов, конкурентоспособных на первый взгляд. Затем эти алгоритмы исследуются в процессе решения интересующей задачи или группы задач, после чего отбирается наилучший вариант. Сравнительный анализ алгоритмов и выбор конечного варианта выполняется главным образом по двум критериям: качества (точность поиска оптимума) и эффективности (время поиска). Эти критерии получили широкое признание, несмотря на отсутствие единых методов их количественной оценки. Для оценки быстродействия алгоритмов с простой логикой

поиска иногда достаточно знать суммарное число вычислений функций ограничений и цели. Для алгоритмов же со сложной логикой поиска этого недостаточно. Надо также учесть время, затрачиваемое на выбор направления поиска и совершение единичного шага. Кроме того, точность решения должна быть увязана с точностью модели объекта проектирования. Нет смысла искать точные решения для грубых моделей. Точно так же быстрота поиска еще не означает, что затраты на проект минимальны. Может оказаться, что экономия с лихвой перекрывается затратами на разработку алгоритмов и программ.

Поэтому при конструировании комбинированных алгоритмов предпочтение отдают методам, не требующим сложных математических надстроек и длительной настройки параметров. Например, проектировщики ЭТС быстро освоили комбинацию методов случайного перебора, покоординатного поиска и динамического программирования для поиска локального оптимума. Метод Монте-Карло хорош вначале, когда требуется найти начальную точку поиска в допустимой области варьируемых переменных задачи. Если за приемлемое число случайных испытаний начальную точку не удастся найти, то переходят к методу покоординатного поиска. Последний стремится к локальному оптимуму при допустимой области типа многомерного параллелепипеда, если априорно заданная точка оказывается внутри. Если же она снаружи, то поиск выведет на границу допустимой области, откуда его можно продолжать методом динамического программирования. В данной ситуации этот метод с большой вероятностью сходится к локальному оптимуму, так как он малочувствителен к функциональным свойствам задачи, а логика поиска неизменна как внутри допустимой области, так и на границе.

Несмотря на сравнительно малую чувствительность метода, все же не исключается возможность преждевременной остановки процесса поиска. На рис. 3.15, *a* показан случай преждевременной остановки на границе допустимой области в ситуации, подобной глубоким овражным ситуациям. В то же время видно, что движение вверх по границе улучшает целевую функцию и может быть продолжено, например, увеличением шага по z_1 , или уменьшением шага по z_2 . Кроме изменения шагов по отдельным переменным для продолжения поиска методом локального динамического программирования могут быть использованы и другие способы, например повторение нескольких последующих этапов при неудачном шаге на предыдущем этапе.

Г Л А В А 4

Структурно-параметрический синтез систем

§ 4.1. Постановка задачи синтеза

Задачи структурно-параметрического синтеза электрических систем в числе первых привлекли внимание специалистов в области бортовых систем электроснабжения. В этом направлении первой отечественной работой можно считать [9], где решается задача структурно-параметрического синтеза систем электроснабжения самолетов путем минимизации суммарной массы при заданной надежности. Для решения используется метод *линейного программирования*, адаптированный к скачкообразному изменению линейных характеристик в начале координат. Благодаря этому задача синтеза сводится к классической транспортной задаче. Этот подход получил дальнейшее развитие в [44], где также рассматриваются транспортные задачи с промежуточными узлами и вогнутой функцией цели. Решение проводится в два этапа. На первом этапе производится регуляризация кусочно-линейной аппроксимацией функции цели, а на втором этапе организуется итерационный процесс поиска оптимума по типу известного алгоритма **Форда—Фалкерсона**. В данной работе излагается другой подход к постановке задачи, предложенный автором [45] и отличающийся тем, что на основе иерархических представлений о структуре проектируемой системы развиваются многоэтапные процессы решения, использующие принцип *динамического программирования*. Этот подход привлекателен тем, что позволяет легко осуществлять декомпозицию проектируемой системы по иерархическим уровням и соответственно на каждом этапе решения использовать наиболее подходящие методы оптимизации.

С целью достаточно общей и по возможности простой графической интерпретации задачи выделим в ЭЭС три основные группы

структурных элементов: источники, преобразователи и потребители (стоки) электроэнергии. Под *источниками* будем понимать совокупность устройств и систем, обеспечивающих генерирование электроэнергии заданного качества; под *преобразователями* — совокупность устройств и систем, обеспечивающих преобразование электроэнергии с заданным качеством на входе и выходе; под *потребителями* — совокупность устройств и систем, обеспечивающих выполнение заданных функций при питании электроэнергией заданного качества. Исходя из определений структурных элементов связи между ними определяются направлениями передачи электроэнергии того или иного качества.

Таким образом, в качестве *структурной модели* ЭЭС рассматриваются структуры, обладающие следующими свойствами. Структурные элементы располагаются на трех фиксированных иерархических уровнях. На верхнем уровне располагаются источники, на среднем — преобразователи, на нижнем — потребители. Энергетические структурные связи допускаются между элементами, расположенными на различных, но соседних уровнях, т. е. продольные связи в направлении сверху вниз. При наличии поперечных энергетических связей, например при питании одного преобразователя от другого преобразователя, можно ввести дополнительные иерархические уровни для преобразователей и тем самым преобразовать поперечные связи в продольные.

Реальные ЭЭС не полностью удовлетворяют указанным структурным свойствам. Например, часть потребителей питается непосредственно от источников, что требует учета сквозных продольных связей между элементами соседних уровней. В этих случаях можно ввести понятие о преобразователе с единичным коэффициентом преобразования, т. е. с одинаковым количеством и качеством электроэнергии на входе и выходе. Тогда сквозные связи между источниками и потребителями можно исключить.

Не учитывается также многоканальность реальных систем, создаваемая с целью повышения надежности. В этих случаях, учитывая, что все каналы питания обычно идентичны, можно ограничиться рассмотрением одноканальных структур с суммированием мощности по реальному числу каналов. Наконец, не учитываются обратные связи между элементами, возникающие, например, из-за автоматических регуляторов. В этих случаях, учитывая информационный характер этих связей, ими можно пренебречь.

Многовариантность задачи синтеза в структурной модели учитывается следующим образом. С точки зрения функциональной равнозначности все варианты одного и того же структурного элемента

должны быть эквивалентны по выходу. Например, все варианты одного и того же источника или преобразователя должны иметь на выходе одинаковое количество электроэнергии одного и того же требуемого качества. Однако питание вариантов структурных элементов на входе может **осуществляться** по-разному. Например, варианты одного и того же электромеханизма могут питаться постоянным или переменным током.

С учетом изложенного можно построить *обобщенную графическую структурную модель* ЭЭС, охватывающую совокупность возможных вариантов выбора элементов и структур. Пример такой графической модели для случая трех уровней, трех элементов на каждом уровне и двух вариантов исполнения каждого элемента приведен на рис. 4.1. Структурные элементы на графе соответствуют узловым точкам и обозначаются буквами И (источники), П (преобразователи), С (стоки) с индексами, определяющими номер элемента на соответствующем уровне. Варианты элемента показаны кружками и имеют двойную индексацию. Первый индекс означает номер эле-

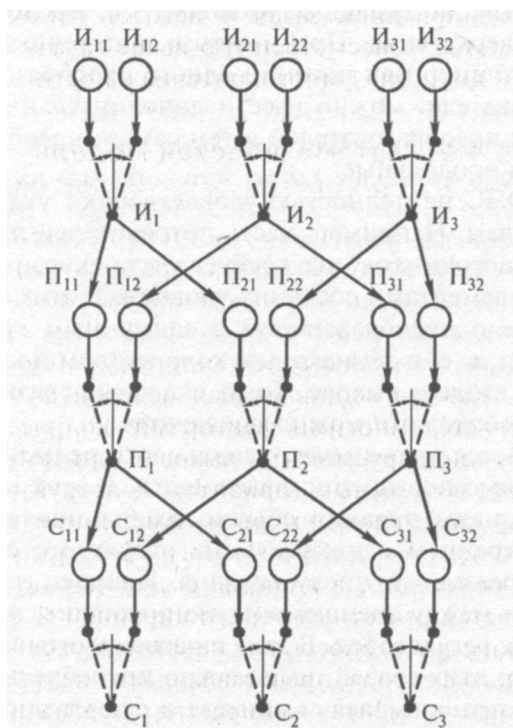


Рис. 4.1. Пример обобщенного графа системы

мента, второй — номер варианта. Выбор того или иного варианта элементов определяется положением ключей, расположенных в узловых точках графа на рис. 4.1. Направления передачи энергии на графе показаны стрелками на ветвях, соединяющих узловые точки с кружками.

Представленная графическая модель ЭЭС позволяет свести процесс выбора структурно-параметрического варианта системы к однозначному определению положения всех ключей. Следовательно, задача структурно-параметрического синтеза ЭЭС в данной графической интерпретации формируется как задача поиска оптимального положения всех ключей. Такая постановка задачи удовлетворяет случаю однокритериальной оптимизации. Однако задачи синтеза ЭЭС в большинстве случаев ставятся как задачи многокритериального выбора. В случае **многокритериальности** задача синтеза обычно сводится к построению конечного множества конкурентоспособных вариантов, на котором производится выбор конечного варианта решения. Конкурентоспособные варианты, как правило, находятся с использованием задач и методов однокритериальной оптимизации. Поэтому рассмотренную выше задачу синтеза будем считать опорной для случая **многокритериальности**.

§ 4.2. Математическая модель однокритериальной задачи синтеза

Для построения математической модели однокритериальной задачи синтеза сделаем дополнительное предположение о том, что подлежащая оптимизации целевая функция имеет детерминированную структуру, является аддитивной и представляет сумму составляющих, определяющих долю отдельных элементов системы в целевой функции. Каждая составляющая целевой функции, в свою очередь, определяется многими факторами: количеством энергии или мощностью, генерируемой (на выходе) или потребляемой (на входе) элементом, возможным вариантом конструктивного выполнения элемента, характером потерь и изменением качества энергии, резервированием и т. д. Среди многих факторов один выбирается в качестве основного, а влияние остальных по отношению к основному считается известным или, по крайней мере, может быть установлено каким-либо способом, например расчетным. Здесь в качестве основного фактора, представляющего независимый варьируемый показатель элемента, выбирается энергия или мощность, генерируемая на выходе. Потребляемая мощность на входе элемента для каждого варианта определяется через соответствующее изве-

тное значение коэффициента полезного действия. Передача энергии по сети (от элемента к элементу) предполагается без искажений и потерь, так как эти факторы могут быть приведены к тем элементам, к которым они направлены.

С учетом сделанных предположений задачу *однокритериального синтеза* можно сформулировать так. Пусть дана система, состоящая из конечного числа элементов, каждый из которых расположен на фиксированном уровне и может быть реализован в виде конечного числа вариантов. Текущий номер элемента на каждом уровне обозначим через i , а варианта — через j . Тогда для трехуровневой системы целевая функция примет следующий вид:

$$F = \sum_{i=1}^{n_{II}} \sum_{j=1}^{m_{IIi}} f_{ij}^H(z_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_{II}} \sum_{j=1}^{m_{PI}} f_{ij}^P(y_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_C} \sum_{j=1}^{m_{CI}} f_{ij}^C(x_{ij}), \quad (4.1)$$

где n_{II} , n_{PI} , n_C — соответственно число источников, преобразователей и стоков; m_{IIi} , m_{PIi} , m_{CI} — соответственно количество вариантов для i -ГО источника, преобразователя и стока; f_{ij}^H , f_{ij}^P , f_{ij}^C — соответственно составляющие целевой функции для j -го варианта i -го источника, преобразователя и стока; z_{ij} , y_{ij} , x_{ij} — соответственно энергия (мощность) на выходе для j -го варианта i -го источника, преобразователя и стока.

Условия реализуемости каждого элемента системы одновременно только в одном варианте можно получить, придав переменным z_{ij} , y_{ij} , x_{ij} булевский смысл. Если вариант элемента реализован, то соответствующая переменная равна выходной мощности самого элемента. В противном случае она равна нулю. Следовательно, выходная мощность каждого элемента может рассматриваться как сумма выходных мощностей всех его вариантов, т. е. справедливы условия

$$\sum_{j=1}^{m_{IIi}} z_{ij} = z_i, \quad i = 1, \dots, n_{II}, \quad z_{ij} = \{z_i, 0\}; \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{PIi}} y_{ij} = y_i, \quad i = 1, \dots, n_{PI}, \quad y_{ij} = \{y_i, 0\}; \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{CI}} x_{ij} = x_i, \quad i = 1, \dots, n_C, \quad x_{ij} = \{x_i, 0\}, \quad (4.4)$$

где z_i , y_i , x_i — соответственно энергия (мощность) на выходе i -го источника, преобразователя и стока.

Ресурсы на выходах элементов определяются в соответствии с обобщенным графом системы как суммы ресурсов на выходе для тех вариантов нижестоящих элементов, которые соединены с данным элементом. Вводя булевы коэффициенты соединений узлов и кружков графа системы, равные 1 при наличии соединения и 0 при его отсутствии, а также учитывая, что ресурсы на выходах стоков обычно известны, выходные ресурсы элементов системы можно представить так:

$$z_i = \sum_{j=1}^{n_{II}} \sum_{j=1}^{m_{IIj}} K_{i(j)}^{\text{ИП}} q_{ij}^{\text{п}}(y_{ij}), \quad i = 1, \dots, n_{II}, \quad K_{i(j)}^{\text{ИП}} = \{1, 0\}; \quad (4.5)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^{n_C} \sum_{j=1}^{m_{Cj}} K_{i(j)}^{\text{ПС}} q_{ij}^{\text{с}}(x_{ij}), \quad i = 1, \dots, n_{II}, \quad K_{i(j)}^{\text{ПС}} = \{1, 0\}; \quad (4.6)$$

$$x_i = a_i, \quad i = 1, \dots, n_C, \quad (4.7)$$

где $K_{i(j)}^{\text{ИП}}$ — коэффициент соединения i -го источника с j -м вариантом i -го преобразователя; $K_{i(j)}^{\text{ПС}}$ — коэффициент соединения i -го преобразователя с j -м вариантом i -го стока; $q_{ij}^{\text{п}}(y_{ij})$, $q_{ij}^{\text{с}}(x_{ij})$ — соответственно энергия (мощность) на выходе j -го варианта i -го преобразователя, стока, определенная как функция ресурсов на выходе; a_i — заданное значение мощности на выходе i -го стока.

Функции $q_{ij}^{\text{п}}(y_{ij})$ и $q_{ij}^{\text{с}}(x_{ij})$ являются непрерывными, монотонно возрастающими и выпуклыми вверх подобно кривым насыщения (рис. 4.2). Характер кривых объясняется известным увеличением коэффициента полезного действия с ростом установленной мощности элемента электрической системы, а также наличием в нем потери даже при нулевой мощности на выходе.

Функции $f_{ij}^{\text{п}}$, $f_{ij}^{\text{с}}$, $f_{ij}^{\text{с}}$, дающие оценку вариантам элементов системы, фактически должны иметь характер кривых на рис. 4.2 в силу известной закономерности уменьшения удельных показателей изделия с ростом его единичной мощности.

С учетом дискретности стандартных шкал мощностей для отдельных элементов электрических систем функции f_{ij} будут ступенчатыми, как показано на рис. 4.3. Здесь скачки имеют место не только в начале координат, но и при величинах выходных мощностей, равных дискретным значениям стандартной шкалы. Именно эти точки определяют выбор стандартного изделия для всех про-

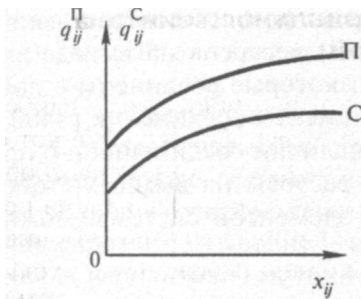


Рис. 4.2. Монотонные зависимости мощности на входе элемента от выходной мощности

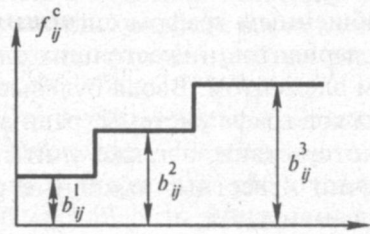


Рис. 4.3. Ступенчатая зависимость составляющей критерия оптимальности от выходной мощности

межуточных значений мощностей. Следовательно, при дискретном изменении мощности элементов системы оценка элементов будет также дискретной, т. е.

$$f_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_{ij} = 0; \\ b_{ij}^1 & \text{при } 0 \leq x_{ij} \leq x_{ij}^1; \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ b_{ij}^r & \text{при } x_{ij}^{r-1} \leq x_{ij} \leq x_{ij}^r, \end{cases} \quad (4.8)$$

где $b_{ij}^1, \dots, b_{ij}^r$ — постоянные значения функции для указанных диапазонов изменения мощности; r — количество дискретных точек шкалы мощностей, охватывающих максимально возможный диапазон мощности элемента; $x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^r$ — значения мощностей по стандартной шкале.

Выражения, аналогичные (4.8), можно записать для всех составляющих целевой функции системы. Таким образом, функции f_{ij} (так же как и q_{ij}) считаются для каждого варианта отдельного элемента известными и заданными в общем случае дискретным способом. В первом приближении или при большой частоте дискретных точек в стандартных шкалах ступенчатые функции могут быть аппроксимированы непрерывными монотонно возрастающими функциями.

В результате задача синтеза получает следующую формулировку:

- найти значения z_{ij}, y_{ij}, x_{ij} для всех i и j , доставляющие $\min(\max) F$ при выполнении условий (4.2)–(4.7) и заданных функций f_{ij}, q_{ij} и значениях постоянных коэффициентов $K_{i(j)}$ и a_i для всех i и j .

§ 4.3. Алгоритмы однокритериального синтеза (общий случай)

Задача синтеза в самом общем случае относится к классу наиболее сложных дискретных комбинаторных задач, для решения которых в той или иной мере необходимо использовать идеи перебора возможных вариантов. Однако даже в том случае, когда каждая переменная имеет всего два допустимых значения, при большом числе переменных количество вариантов решения возрастает настолько, что их перебор может оказаться не под силу современным ЭВМ. Поэтому в процессе перебора стремятся отсеять (не рассматривать) возможно большее количество заведомо худших вариантов. К таким отсеивающим методам относятся методы ветвей и границ и динамического программирования.

Основная трудность применения *метода ветвей и границ* заключается в отыскании эффективного способа разбиения и ветвления множества вариантов решения на подмножества и их последовательном анализе путем вычисления граничных оценок целевой функции для отдельных подмножеств. Эти процедуры зависят от специфики конкретной задачи и во многих случаях не могут быть алгоритмированы без дополнительных математических исследований и конструкций. Метод *динамического программирования* представляется более наглядным и универсальным, если процесс решения задачи можно разбить на ряд взаимосвязанных последовательных этапов.

Многоэтапность синтеза ЭЭС следует из их иерархической структуры (см. рис. 4.1), определяющей последовательность построения различных уровней. Обычно исходной информацией для синтеза служат выходные параметры потребителей. Поэтому на первом этапе анализируются и устанавливаются возможные варианты реализации стоков системы, а также выходные параметры и количество преобразователей, необходимых для питания всех вариантов стоков одновременно. На этом этапе завершается построение нижнего уровня обобщенного графа системы и определяются предпосылки для построения следующего уровня. На втором этапе определяются возможные варианты реализации преобразователей, их выходные параметры, а также количество источников, т. е. строится средний уровень обобщенного графа и устанавливаются данные для построения следующего уровня. Наконец, на третьем этапе определяются возможные варианты реализации источников, т. е. верхний уровень, и на этом заканчивается построение обобщенного графа.

В соответствии с указанной последовательностью этапов построения обобщенного графа можно осуществлять также процесс выбора оптимальных вариантов всех элементов системы.

Введем в рассмотрение векторы

$$\mathbf{x} = (x_{ij}) \in D_x, \quad i = 1, \dots, n_c, \quad j = 1, \dots, m_{c_i}; \quad (4.9)$$

$$\mathbf{y} = (y_{ij}) \in D_y, \quad i = 1, \dots, n_{\Pi}, \quad j = 1, \dots, m_{\Pi_i}; \quad (4.10)$$

$$\mathbf{z} = (z_{ij}) \in D_z, \quad i = 1, \dots, n_{\text{И}}, \quad j = 1, \dots, m_{\text{И}_i}, \quad (4.11)$$

где D_x, D_y, D_z — счетные (конечные) множества векторов, определяемые соответственно условиями (4.4) и (4.7), (4.3) и (4.6), (4.2) и (4.5). При этом получим компактную запись выражения целевой функции (4.1):

$$F = F^C(\mathbf{x}) + F^{\Pi}(\mathbf{y}) + F^{\text{И}}(\mathbf{z}),$$

где

$$\begin{aligned} F^C(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{m_{c_i}} f_{ij}^C(x_{ij}); \\ F^{\Pi}(\mathbf{y}) &= \sum_{i=1}^{n_{\Pi}} \sum_{j=1}^{m_{\Pi_i}} f_{ij}^{\Pi}(y_{ij}); \\ F^{\text{И}}(\mathbf{z}) &= \sum_{i=1}^{n_{\text{И}}} \sum_{j=1}^{m_{\text{И}_i}} f_{ij}^{\text{И}}(z_{ij}). \end{aligned} \quad (4.12)$$

Из условий (4.2)—(4.7), определяющих множества D_z, D_y, D_x , следует, что вектор \mathbf{x} — функция постоянных коэффициентов (2.7), а векторы \mathbf{y} и \mathbf{z} зависят соответственно от вектора \mathbf{x} и вектора \mathbf{y} , т. е.

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(\bar{\mathbf{x}}), \quad (4.13)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}(\bar{\mathbf{y}}). \quad (4.14)$$

Вектор-функции (4.13) и (4.14) позволяют записать выражение (4.12) следующим образом:

$$F = F^C(\mathbf{x}) + F^{\Pi}[\mathbf{y}(\bar{\mathbf{x}})] + F^{\text{И}}[\mathbf{z}(\bar{\mathbf{y}})]. \quad (4.15)$$

Тогда процесс минимизации целевой функции по всем векторам $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ представляется так:

$$\min F = \min_{\mathbf{x}} \{F^C(\mathbf{x}) + \min_{\mathbf{y}} [F^{\Pi}(\mathbf{y}) + \min_{\mathbf{z}} F^{\text{И}}(\mathbf{z})]\}. \quad (4.16)$$

Выражение (4.16) относится к классу функциональных уравнений Р. Беллмана и описывает трехэтапный процесс минимизации, который разбивается на такие последовательные процессы:

$$\min F = \lambda_3(\mathbf{a}) = \min_x \{F^c(\mathbf{x}) + \lambda_2(\mathbf{x})\}; \quad (4.17)$$

$$\lambda_2(\mathbf{x}) = \min_y [F^p(\mathbf{y}) + \lambda_1(\mathbf{y})]; \quad (4.18)$$

$$\lambda_1(\mathbf{y}) = \min_z F^u(\mathbf{z}), \quad (4.19)$$

где $\mathbf{a} = \{a_i\}$, $i = 1, \dots, n_c$ — вектор, компонентами которого являются заданные коэффициенты (4.7).

Вычислительная процедура динамического программирования реализует последовательность решения задач (4.17)—(4.19) с конца. Сначала определяется $\lambda_1(\mathbf{y})$, затем $\lambda_2(\mathbf{x})$ и, наконец, $\lambda_3(\mathbf{a})$, т. е. решение исходной задачи. Определение $\lambda_1(\mathbf{y})$ не представляет затруднений, так как на этом этапе выбирается наилучшая совокупность вариантов источников в **предположении**, что стоки и преобразователи известны. В этом случае (при независимости источников друг от друга) простым сопоставлением возможных вариантов реализации выбирается наилучший. Основные трудности динамического программирования связаны с решением задач (4.17) и (4.18). На этих этапах для выбора компонентов векторов \mathbf{x} и \mathbf{y} можно применить любые удобные методы решения комбинаторных задач, в том числе и динамическое программирование. Во всех случаях переход к уравнениям (4.17)—(4.19) позволяет разбить исходную задачу на последовательность подзадач значительно меньшей размерности и **сложности**.

Применение метода динамического программирования к решению рассматриваемой задачи возможно при достаточно слабых допущениях о свойствах целевой функции в области ее определения. Требуется, чтобы целевая функция и ее составляющие однозначно определялись по параметрам оптимизации и были ограничены по величине на замкнутом множестве параметров оптимизации. Учитывая конечное множество вариантов структур и элементов в обобщенном графе ЭЭС, а также невозможность выделения бесконечно больших энергий в физических системах, можно показать, что условия применимости метода динамического программирования в данном случае удовлетворяются.

§ 4.4. Алгоритмы однокритериального синтеза (линейный случай)

Решение задачи синтеза существенно упрощается, если появляется возможность аппроксимации функций f_{ij} и q_{ij} прямыми, проходящими через начало координат, а именно:

$$f_{ij}^n(z_{ij}) = C_{ij}^n z_{ij}; \quad (4.20)$$

$$f_{ij}^n(y_{ij}) = C_{ij}^n y_{ij}; \quad (4.21)$$

$$f_{ij}^c(x_{ij}) = C_{ij}^c x_{ij}; \quad (4.22)$$

$$q_{ij}^n(y_{ij}) = d_{ij}^n y_{ij}; \quad (4.23)$$

$$q_{ij}^c(x_{ij}) = d_{ij}^c x_{ij}, \quad (4.24)$$

где C_{ij}^n, d_{ij}^n — заданные постоянные положительные коэффициенты. Тогда выражения (4.1) и (4.5), (4.6) превращаются в линейные уравнения, (4.2)—(4.4) и (4.7) остаются без изменений, а вместо условий (4.8) записываются выражения (4.20)—(4.24). В результате рассматриваемая задача синтеза преобразуется в задачу линейного программирования, для решения которой известен ряд эффективных алгоритмов. Простые алгоритмы синтеза для линейного случая можно получить также на основе специфики иерархической структуры синтезируемой системы.

Линеаризация функций f_{ij} и q_{ij} позволяет оптимально выбрать элементы системы независимо от их выходной мощности, определяемой соединениями с вариантами элементов нижнего уровня (см. рис. 4.1). Вследствие этого при выборе оптимального варианта элемента достаточно учитывать лишь влияние соединений с элементами вышестоящих уровней, снабжающих рассматриваемые варианты энергией. Таким образом, для каждого элемента можно построить пучок (дерево) вариантов с ветвлением вариантов на вышестоящих уровнях (рис. 4.4) и выбрать наилучший вариант рассматриваемого элемента независимо от других элементов.

Указанные особенности линейного приближения задачи в соответствии с последовательностью этапов динамического программирования приводят к следующей простой процедуре решения.

Сначала определяется функция $\lambda_1(y)$ в виде суммы

$$\lambda_1(y) = \sum_{i=1}^{n_H} F_{i \min}^n, \quad (4.25)$$

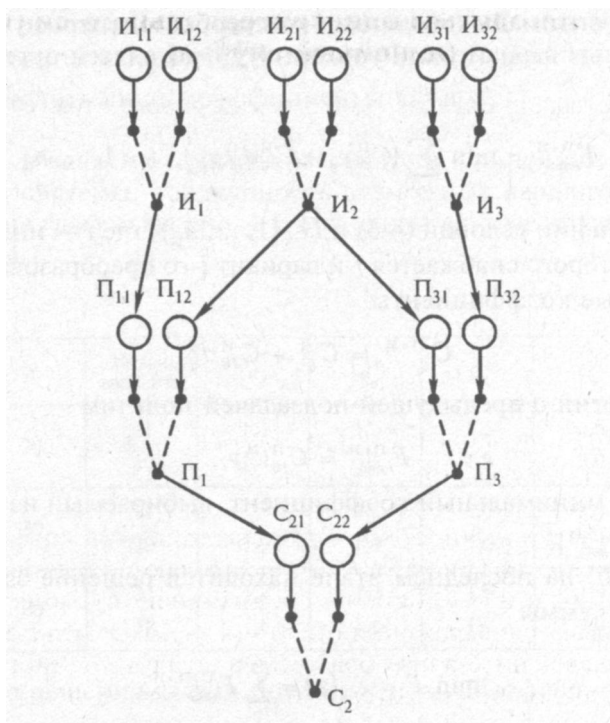


Рис. 4.4. Пример дерева вариантов одного потребителя

где $F_{i \min}^И$ — оптимальная оценка i -го источника, полученная независимо от других элементов. Функции $F_{i \min}^И$ находятся в результате независимого решения подзадачи

$$F_{i \min}^И = \min \sum_{j=1}^{m_{Иi}} C_{ij}^И z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n^И$$

при выполнении условий (4.2). С учетом положительности коэффициентов $C_{ij}^И$ и условий (4.2) получаем

$$F_{i \min}^И = C_{i0}^И z_i, \quad i = 1, \dots, n^И, \quad (4.26)$$

где $C_{i0}^И$ — минимальный коэффициент, выбираемый из множества $\{C_{i1}^И, \dots, C_{im_{Иi}}^И\}$.

На следующем этапе определяется функция $\lambda_2(x)$ в виде суммы

$$\lambda_2(x) = \sum_{i=1}^{n^И} F_{i \min}^И, \quad (4.27)$$

где $F_{i \min}^{П+И}$ — оптимальная оценка i -ГО преобразователя с учетом дерева возможных вариантов. Функции $F_{i \min}^{П+И}$ находятся путем решения подзадач

$$F_{i \min}^{П+И} = \min \sum_{j=1}^{m_{Пi}} (C_{ij}^{П} y_{ij} + C_{i0}^{И} d_{ij}^{П} y_{ij}), \quad i = 1, \dots, n_{П}$$

при выполнении условий (4.3) и $l \in \{1, \dots, n_{П}\}$, где l — индекс источника, от которого снабжается j -й вариант i -го преобразователя. Если ввести новые коэффициенты

$$C_{ij}^{П+И} = C_{ij}^{П} + C_{i0}^{И} d_{ij}^{П}, \quad (4.28)$$

то по аналогии с предыдущей подзадачей получим

$$F_{i \min}^{П+И} = C_{i0}^{П+И} y_i, \quad (4.29)$$

где $C_{i0}^{П+И}$ — минимальный коэффициент, выбираемый из множества $\{C_{i1}^{П+И}, \dots, C_{im_{Пi}}^{П+И}\}$.

Наконец, на последнем этапе находится решение задачи в целом в виде суммы

$$\min F = \lambda_3(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^{n_C} F_{i \min}^{C+П+И}, \quad (4.30)$$

где $F_{i \min}^{C+П+И}$ — оптимальная оценка i -го стока с учетом дерева возможных вариантов. Значения $F_{i \min}^{C+П+И}$ находятся в результате решения подзадач

$$F_{i \min}^{C+П+И} = \min \sum_{j=1}^{m_{Ci}} (C_{ij}^C x_{ij} + C_{i0}^{П+И} d_{ij}^C x_{ij}), \quad i = 1, \dots, n_C$$

при выполнении условий (4.4), (4.7) и $l \in \{1, \dots, n_{П}\}$, где l_0 — индекс преобразователя, от которого снабжается j -й вариант i -ГО стока. Вводя новые коэффициенты

$$C_{ij}^{C+П+И} = C_{ij}^C + C_{i0}^{П+И} d_{ij}^C, \quad (4.31)$$

по аналогии с предыдущими подзадачами получаем

$$F_{i \min}^{C+П+И} = C_{i0}^{C+П+И} x_i, \quad x_i = C_{i0}^{C+П+И} a_i, \quad (4.32)$$

где $C_{i0}^{C+П+И}$ — минимальный коэффициент, выбираемый из множества $\{C_{i1}^{C+П+И}, \dots, C_{im_{Ci}}^{C+П+И}\}$.

Следует отметить, что при вычислении $\min F$ нет необходимости в последовательном вычислении $\lambda_1(y)$ и $\lambda_2(x)$. Достаточно на этих этапах вычислить лишь коэффициенты $C_{j0}^И$ и $C_{j0}^{П+И}$.

Пример. В качестве примера рассмотрим в линейном приближении синтез системы, совокупность возможных вариантов которой представлена графом на рис. 4.1. Исходные данные задачи приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Номер элемента	a_i	Номер варианта	d_{ij}^C	$d_{ij}^И$	C_{ij}^C	$C_{ij}^И$	$C_{ij}^И$
1	20	11	1,1	1,5	1,5	0,5	0,5
		12	1,4	1,2	1,8	2,0	0,8
2	30	21	1,5	1,1	2,0	3,0	1,0
		22	1,3	1,4	1,6	1,5	0,6
3	50	31	1,2	1,3	1,9	1,0	0,9
		32	1,6	1,6	1,7	4,0	0,7

Процесс решения задачи показан с помощью табл. 4.2.

Таблица 4.2

Номер элемента	Номер варианта	Начальный этап		Промежуточный этап		Конечный этап	
		$C_{ij}^И$	$C_{j0}^И$	$C_{ij}^{П+И}$	$C_{j0}^{П+И}$	$C_{ij}^{C+П+И}$	$C_{j0}^{C+П+И}$
1	11	0,5	0,5	1,25	1,25	2,87	2,87
	12	0,8	—	2,72	—	5,27	—
2	21	1,0	—	3,55	—	3,87	3,87
	22	0,6	0,6	2,48	2,48	3,91	—
3	31	0,9	—	1,78	1,78	4,88	—
	32	0,7	0,7	5,12	—	4,55	4,55

На начальном этапе записываются заданные коэффициенты $C_{ij}^И$ и путем сравнения для каждого источника в отдельности определяется минимальная оценка $C_{j0}^И$. Варианты с минимальной оценкой запоминаются, а все остальные вычеркиваются. На промежуточном этапе с помощью выражения (4.28), оценок $C_{j0}^И$ и заданных

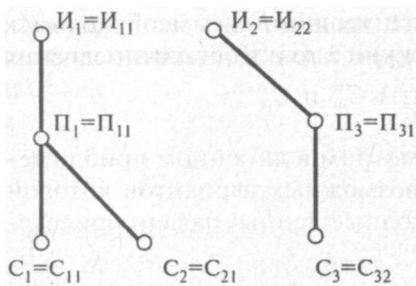


Рис. 4.5. Пример оптимального графа системы

на рис. 4.1 соединений для каждого варианта преобразователей вычисляется оценка $C_{ij}^{п+и}$. Путем непосредственного сравнения для каждого преобразователя в отдельности выбирается минимальная оценка $C_{in}^{п+и}$, соответствующий вариант запоминается, а остальные вычеркиваются. Наконец, на последнем этапе с помощью выражения (4.31), оценок $C_{io}^{п+и}$ и рис. 4.1 вычисляются для каждого ва-

рианта стока оценки $C_{ij}^{с+п+и}$ и аналогичным образом выбираются и запоминаются оптимальные варианты стоков.

Используя оптимальные оценки табл. 4.2, легко построить поэтапно оптимальный структурный граф системы (рис. 4.5) и вычислить с помощью уравнений (4.30) и (4.32) минимальное значение целевой функции, равное

$$\min F = 2,87 \cdot 20 + 3,87 \cdot 30 + 4,55 \cdot 50 = 401.$$

§ 4.5. Многокритериальный синтез

Опыт формализации и решения задач структурно-параметрического синтеза самолетных ЭЭС показал, что учет практических условий построения новых систем резко сужает круг допустимых к рассмотрению вариантов. В частности, ориентация на реальную элементную базу систем (существующую в производстве или хотя бы в проектах) и на совокупность требований, предъявляемых к системам стандартами и другими нормативными документами, ограничивает число допустимых для рассмотрения вариантов до нескольких сотен. В такой ситуации наиболее целесообразным методом синтеза является *полный перебор* всех допустимых вариантов синтеза. По сравнению с рассмотренными выше методами синтеза полный перебор имеет ряд известных и существенных достоинств:

- 1) минимальный уровень формального описания задачи и алгоритмов решения;
- 2) гарантированное решение в условиях **многокритериальности** синтеза и нелинейных дискретных характеристик синтезируемой системы;

3) наибольшая приемственность с традиционным подходом к проектированию систем, что очень важно с точки зрения внедрения в практику проектирования.

В задаче синтеза методом полного перебора можно выделить три самостоятельные подзадачи: 1) генерации вариантов; 2) анализа вариантов; 3) принятия решений. Рассмотрим каждую из этих подзадач самостоятельно.

Для построения эффективного алгоритма полного перебора (перечисления) всех допустимых структурно-параметрических вариантов ЭЭС воспользуемся уже изложенной ранее стратегией динамического программирования и достаточно общими ограничениями (правилами) на процесс построения допустимых вариантов. С этой целью предположим, что структурная элементная база ЭЭС известна для обобщенной структуры (см. рис. 4.1), т. е. на каждом структурном уровне заданы n элементов, каждый из которых имеет m вариантов реализации. Известны также все возможные соединения между элементами различных уровней. Тогда путем перебора можно из обобщенной структуры выделить все возможные конкретные структуры и сформировать множество последних. Однако количество конкретных структур в таком множестве все еще может быть очень большим. Чтобы сузить это множество далее, введем в рассмотрение еще одно, достаточно общее для различных типов ЭЭС ограничение, а именно ограничение на число источников и число их реализаций:

$$\left. \begin{aligned} n_{И} &\leq n_{И\max}; \\ m_{Иi} &\leq m_{И\max}, \quad i = 1, \dots, n_{И}. \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

Например, существующие стандарты для самолетных ЭЭС разрешают иметь на борту не более двух основных источников электроэнергии.

Количество различных видов электроэнергии в ЭЭС, а следовательно, и число преобразователей энергии, включая и единичные преобразователи, обычно также ограничивается, т. е.

$$\left. \begin{aligned} n_{П} &\leq n_{П\max}; \\ m_{Пi} &\leq m_{П\max}, \quad i = 1, \dots, n_{П}. \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

Потребители (стоки) электроэнергии вместе с возможными вариантами их исполнения тоже задаются, т. е. n_C и m_{Ci} известны.

Кроме указанных ограничений учитываются также некоторые общие логические условия структурного построения ЭЭС. Напри-

мер, если возможно прямое подключение какого-либо стока к источнику (через единичный условный преобразователь), то подключение этого стока к другому источнику через действительный преобразователь уже нецелесообразно. Или же каждый вид электроэнергии в системе, как правило, целесообразно получить единственным образом: либо прямо от источника, либо от одного преобразователя, если нет соответствующего источника.

С учетом изложенного задача *генерации структурно-параметрических вариантов* ЭЭС формулируется так: на заданном множестве структурных элементов системы и правил соединений между ними найти и перечислить все структурно-параметрические варианты системы, удовлетворяющие заданным количественным и логическим условиям их построения. Решение этой задачи путем обычного перебора, т. е. генерации всех возможных вариантов с последующей проверкой выполнения заданных **ограничений**, как уже указывалось, невозможно даже на современных ЭВМ из-за очень большого количества возможных вариантов. Поэтому необходима такая схема перебора, которая одновременно с генерацией структурно-параметрического варианта учитывает все заданные **ограничения**. Такую схему генерации вариантов можно построить, если воспользоваться аналогией с уравнениями динамического профаммирования (4.17)–(4.19). Тогда можно предложить следующий трехэтапный процесс генерации вариантов, описываемый уравнениями

$$D_{\text{ЭЭС}} = D_3(D_{\text{С}}, D_{\text{СЭ}}, S_{\text{ЭЭС}}); \quad (4.35)$$

$$D_{\text{СЭ}} = D_2(D_{\text{П}}, D_{\text{СГ}}, S_{\text{СЭ}}); \quad (4.36)$$

$$D_{\text{СГ}} = D_1(D_{\text{И}}, S_{\text{СГ}}), \quad (4.37)$$

где $D_{\text{ЭЭС}}, D_{\text{СЭ}}, D_{\text{СГ}}$ — соответствующие счетные множества структурно-параметрических вариантов ЭЭС, системы электроснабжения (СЭ) и системы генерирования (СГ) электроэнергии; $D_{\text{С}}, D_{\text{П}}, D_{\text{И}}$ — счетные множества размещения структурных элементов на соответствующих иерархических уровнях обобщенной структуры ЭЭС, а $S_{\text{ЭЭС}}, S_{\text{СЭ}}, S_{\text{СГ}}$ — правила формирования структур соответственно для ЭЭС, СЭ и СГ.

Реализацию процесса генерации удобно начинать с конца (4.37). Правила $S_{\text{СГ}}$, формирующие $D_{\text{СГ}}$, можно свести к перебору всех вариантов возможных сочетаний источников, учитывающих ограничения на максимальное число источников и их реализаций. Таким образом, можно легко перечислить все допустимые варианты из

множества системы генерирования D_{CT} . На следующем этапе формируется множество D_{C3} исходя из уже полученного D_{CT} . Правила S_{C3} сводятся к поочередному расширению каждого из вариантов D_{CT} путем перечисления всех возможных подключений преобразователей, учитывающих ограничения по допустимому числу видов электроэнергии в системе. Наконец, на третьем этапе формируется $D_{ЭЭС}$ исходя из уже полученного D_{C3} . Правила $S_{ЭЭС}$ при этом можно свести к двум **процедурам**:

1) перечислению сочетаний вариантов электропитания стоков, удовлетворяющих ограничениям по допустимому числу видов электроэнергии;

2) перечислению полностью стыкуемых вариантов систем электроснабжения и потребления, которые в совокупности составляют $D_{ЭЭС}$!

Таким образом, алгоритм генерации вариантов включает в основном логические процедуры и не требует сложной формализации процесса перебора.

Поэтапный процесс генерации структурно-параметрических вариантов ЭЭС позволяет перечислять не только варианты системы в целом, но и варианты подсистем генерирования и электроснабжения, т. е. задача генерации решается на каждом иерархическом уровне обобщенной структуры. Использование личного опыта проектировщика ЭЭС в решении задач каждого уровня достигается в процессе перечисления получаемых вариантов. При этом проектировщик может исключить из дальнейшего рассмотрения варианты, которые формально допустимы, но заведомо неэффективны. Все варианты, принятые к дальнейшему рассмотрению, составляют основу следующей **подзадачи—анализа** вариантов.

Для *анализа вариантов* необходимо иметь математические модели критериев, по которым оценивается тот или иной вариант. Критерии оценки ЭЭС достаточно разнообразны и зависят от многих факторов, в том числе функционального назначения, параметров электроэнергии и т. п. В каждом конкретном случае набор критериев является индивидуальным, особенно уровень и глубина их математического описания. Поэтому решение этой подзадачи целесообразно рассмотреть на примере конкретной ЭЭС (см. § 4.6).

Следующая, последняя подзадача *принятия решений* по существу сводится к сравнительному отбору наилучших вариантов по критериальным показателям и выбору одного или нескольких конкурентоспособных вариантов. С этой целью организуется процедура попарного сравнения вариантов по всем критериальным показателям. При сравнительном анализе первой же пары вариантов могут быть два исхода:

- 1) один вариант хуже другого по всем критериям;
- 2) каждый из вариантов имеет преимущества перед другим хотя бы по одному из критериев.

В первом случае худший вариант можно отбросить и более не рассматривать, а лучший вариант включить в множество конкурентоспособных вариантов (так называемое Паретто-множество). Во втором случае оба варианта включаются в Паретто-множество. Далее выбирается новый вариант из множества принятых к рассмотрению и поочередно сравнивается с вариантами, включенными в Паретто-множество. Если он имеет преимущество перед вариантами Паретто-множества хотя бы по одному критерию, то новый вариант также включается в это множество. При этом если в Паретто-множестве имеется вариант, по всем критериям худший по сравнению с новым вариантом, то он исключается из Паретто-множества. Организованный указанным образом процесс сравнения вариантов продолжается до тех пор, пока множество принятых к рассмотрению вариантов не станет пустым, т. е. все варианты будут поочередно сравнены. После этого можно перейти к выбору конечного (конечных) варианта из Паретто-множества, используя дополнительные или неформальные соображения. Например, можно отбирать конечные варианты, отдавая предпочтение какому-нибудь одному критерию, но в то же время контролируя степень ухудшения остальных критериев и не давая им стать хуже какой-то критической границы. Можно усложнить процесс принятия решений, сравнивая варианты не по абсолютному значению критериев, а по их попаданию в заданные интервалы, по их отклонениям в пределах допустимых границ и т. п. Логических и эвристических процедур для формирования Паретто-множества и выбора конечных вариантов предложено достаточно много, однако выбор конкретных процедур остается за проектировщиком ЭЭС.

§ 4.6. Критерии анализа самолетных ЭЭС

Анализ структурно-параметрических вариантов самолетных ЭЭС начинается с оценки надежности систем электроснабжения (СЭ). Минимальная величина надежности обычно ограничивается государственными, отраслевыми или **международными** стандартами. Основным показателем надежности принято считать вероятность безотказной работы СЭ в течение фиксированного времени работы ЭЭС. Под *безотказной работой* понимается такое функционирование СЭ, при котором все приемники электроэнергии (или приемники первой категории) обеспечиваются питанием электричес-

кой энергией требуемого качества. Общепринятыми допущениями при оценке показателей безотказности СЭ являются пуассоновский характер потока отказов, исправное состояние СЭ и ее структурных элементов перед началом работы и единичная вероятность срабатывания аппаратуры защиты при выходе из строя элемента системы.

С учетом указанных соображений и стандартных подходов к оценке надежности вероятность безотказной работы структурного элемента за время T можно представить в виде

$$P_э = e^{-\lambda_э T}, \quad (4.38)$$

где $\lambda_э$ — эквивалентная частота отказов, определяемая известными способами. Вероятность отказа нерезервированного элемента за это же время будет

$$Q_э = 1 - P_э, \quad (4.39)$$

а резервированного элемента

$$Q_{эр} = (1 - P_э)^{K_{рэ}},$$

где $K_{рэ}$ — коэффициент резервирования, который равен 1 при отсутствии резерва, 2 — при однократном резервировании, 3 — при двукратном резервировании и т. д. Тогда вероятность безотказной работы резервированного элемента будет

$$P_{эр} = 1 - Q_{эр} = 1 - (1 - P_э)^{K_{рэ}}, \quad (4.40)$$

а вероятность безотказной работы СЭ за время T

$$P_{сэ} \geq \prod P_{эр}. \quad (4.41)$$

Величина $P_{сэ}$ ограничивается снизу, т. е.

$$P_{сэ} \geq P_{сэ \min}, \quad (4.42)$$

где $P_{сэ \min}$ — заданная минимальная оценка надежности.

Удовлетворение условиям (4.42) является конечной целью анализа структурно-параметрического варианта СЭ на надежность. Однако однозначная оценка $P_{сэ}$ требует фиксации $K_{рэ}$ для всех элементов СЭ. В то же время коэффициенты резервирования для элементов предварительно могут быть неизвестны. Тогда появляется необходимость решения дополнительной задачи по выбору неизвестных $K_{рэ}$. Последняя решается с учетом достаточно общего ограничения следующего вида:

$$K_{рэ} \leq K_{рэ \max}, \quad (4.43)$$

где $K_{pz \max}$ — **максимально** допустимое резервирование элемента, определяемое для каждого элемента в отдельности из условий построения конкретных типов СЭ. Выбор неизвестных K_{pz} начинается с того, что они приравняются к единице, после чего оценивается P_{cs} и проверяется условие (4.42). Если оно не удовлетворяется, то нужно последовательно увеличивать неизвестные K_{pz} на единицу. Последовательность элементов, для которых осуществляется однократное увеличение резерва, выбирается так, чтобы после каждого увеличения K_{pz} приращение P_{cs} было наибольшим и выполнялось условие (4.43). Если для какого-либо элемента выполняется $K_{pz} = K_{pz \max}$, то этот элемент включается в число тех, для которых коэффициенты резервирования фиксированы. Рассмотренный процесс последовательного увеличения неизвестных K_{pz} продолжается до тех пор, пока либо будет выполнено условие (4.42), либо для всех элементов с варьируемыми K_{pz} условие (4.43) превратится в равенство. Последний случай означает, что данный структурно-параметрический вариант не удовлетворяет требованиям надежности и поэтому должен быть отсеян из числа допустимых к дальнейшему анализу вариантов. Таким образом, процесс выбора неизвестных K_{pz} косвенно стремится минимизировать число резервных элементов для тех структурно-параметрических вариантов, для которых удовлетворяется условие (4.42).

Задачу выбора K_{pz} можно рассматривать и в другой постановке: выбрать неизвестные K_{pz} так, чтобы достигнуть максимальной надежности. Однако для математического описания надежности с помощью уравнений (4.38)—(4.42) решение этой задачи получается сразу при превращении (4.43) в равенство для всех элементов с переменными K_{pz} . Если при этом выполняется также (4.42), то данный структурно-параметрический вариант считается допустимым и имеющим максимально возможную надежность. Если же (4.42) не выполняется, то данный вариант отсеивается из множества структурно-параметрических вариантов.

Математическая модель надежности структурно-параметрического варианта СЭ не нуждается в детализации структурных элементов и оперирует их агрегированными параметрами λ_3 и K_{pz} , причем задается как исходный только параметр λ_3 , определяемый на основе статистического анализа систем-прототипов. Такой подход к математическому моделированию технико-экономических показателей СЭ на начальных стадиях проектирования является единственно возможным, так как детальное рассмотрение структурных элементов осуществляется на более поздних стадиях проектирования.

По аналогии с моделью надежности моделируются и другие показатели в виде аналитических или алгоритмических зависимостей от небольшого числа агрегированных параметров. Учитывая функциональное назначение СЭ, к числу основных параметров структурных элементов следует отнести энергетические параметры типа напряжение, ток (или мощность), КПД и т. п. Следовательно, дальнейшему анализу допустимого структурно-параметрического варианта ЭЭС должен предшествовать анализ распределения энергии между структурными элементами системы.

Энергетический расчет ЭЭС выполняется при следующих исходных предпосылках. Для каждой группы потребителей электроэнергии заданы альтернативные виды электроэнергии питания (род тока, напряжение, частота и т. п.) и суммарная установленная мощность питания каждого вида с учетом коэффициентов одновременности включения приемников. Тогда энергетический расчет сводится к оценке распределения мощностей электроэнергии между элементами СЭ в соответствии со структурной схемой передачи электроэнергии. Если обозначить через N_c количество групп приемников (стоков), а через N_ε количество альтернативных видов электропитания, то суммарную установленную мощность потребителей электроэнергии каждого вида можно представить так:

$$\sum S_{Cj} = \sum_{i=1}^{N_c} S_{ij}, \quad j = 1, \dots, N_\varepsilon. \quad (4.44)$$

Расчетная мощность потребления каждого вида электроэнергии будет

$$S_{Cj}^* = \sum_{i=1}^{N_c} K_{oi} S_{ij}, \quad j = 1, \dots, N_\varepsilon, \quad (4.45)$$

где K_{oi} — коэффициент одновременности включения для i -й группы приемников электроэнергии.

В свою очередь, расчетная выходная мощность преобразователя i -го вида электроэнергии в j -й вид будет

$$S_{np\ ij} = S_{Cj}^* \frac{K_{p\ ij}}{n_{k\ ij}}, \quad (4.46)$$

где $K_{p\ ij}$ — коэффициент резервирования преобразователя по мощности; $n_{k\ ij}$ — число каналов преобразования.

Установленная мощность отдельного преобразователя рассматриваемого вида получается округлением $S_{np\ ij}$ до ближайшего большего значения по стандартной шкале мощностей преобразователей.

С учетом включения единичных преобразователей в структурную схему ЭЭС для случая прямого подключения приемников электроэнергии к источникам в общем случае расчетная выходная мощность источника электроэнергии i -го вида будет

$$S_{иi} = \left(\sum S_{npj} \frac{1}{\eta_{ij}} \right) \frac{K_{pi}}{n_{ki}}, \quad (4.47)$$

где η_{ij} — КПД преобразователя; K_{pi} — коэффициент резервирования источника; n_{ki} — число каналов генерирования. Установленная мощность источника оценивается округлением $S_{иi}$ до ближайшего большего значения по стандартной шкале мощностей источников.

Рассмотренный алгоритм оценки мощностей структурных элементов оперирует полной мощностью, не делая различия между активной и реактивной электрической мощностью. Это допустимо для большинства ЭЭС, так как обычно в таких системах $\cos \varphi$ поддерживается **ВЫСОКИМ** ($\cos \varphi \geq 0,8$)

Зная установленные мощности структурных элементов, можно оценить их **конструктивные массы** с помощью таблиц прямого соответствия, построенных для элементной базы ЭЭС, или с помощью функциональных зависимостей типа

$$M_s = a_0 + a_1 S_s, \quad (4.48)$$

построенных методами обработки статистических данных, прогнозной информации и т. п. Конструктивная масса всей системы получается суммированием масс отдельных элементов. Таким образом, масса оценивается в функции только одного агрегированного параметра структурного элемента — мощности. Аналогичным образом в функции агрегированных параметров можно оценить и другие технико-экономические показатели ЭЭС, например массу с учетом топлива, расходуемого транспортным средством на функционирование электросистемы.

Для учета массы топлива вводится понятие стартовой (взлетной) массы, которая определяется следующим образом:

$$M_{ст} = M_k + \sum_{m=1}^{\gamma} M_T(T_m) + \sum_{m=1}^{\gamma} M_{тр}(T_m), \quad (4.49)$$

где γ — число этапов полета; T_m — продолжительность m -ГО этапа; M_k — конструктивная масса ЭЭС; M_T — масса топлива, необходимая для функционирования ЭЭС с учетом охлаждения на m -М этапе; $M_{тр}$ — масса топлива, необходимая для транспортировки M_k и

M_t на m -м этапе. В ряде случаев, например для пассажирских лайнеров, оценка $M_{ст}$ с достаточной точностью производится по основному, крейсерскому режиму полета. Тогда выражение $M_{ст}$ упрощается и сводится к так называемой полетной массе:

$$M_{пол} = M_k(1 + A) + M(1 + B), \quad (4.50)$$

где A , B и M — постоянные коэффициенты, зависящие от продолжительности крейсерского полета (T) и расхода топлива на единицу механической мощности авиадвигателя (q). Для конкретного типа самолета A и B определяются по известным данным, а M — по формуле

$$M = qT \sum_{i=1}^{N_r} S_{ri} \left[\frac{1}{\eta_{ni}} + \left(1 + \frac{\eta_{ni}}{\eta_{ri}} \right) \right] \cos \varphi_i, \quad (4.51)$$

где $\cos \varphi_i$, η_{ni} , η_{ri} — соответственно коэффициенты мощности, полетный и лабораторный коэффициенты полезного действия; S_{ri} — суммарная мощность i -й подсистемы генерирования электроэнергии.

Наконец, для оценки самолетных ЭЭС используются также *экономические показатели*, для описания которых предложен ряд математических моделей. В качестве примера приведем подход, изложенный в [46, 47].

В основу построения модели положены следующие компоненты, отражающие различные материальные затраты на создание и функционирование электросистемы:

- приведенные затраты на создание и установку оборудования;
- годовые эксплуатационные затраты на оборудование и обеспечение его функционирования.

Приведенные затраты на создание и установку оборудования рассчитываются, как сумма себестоимости установленных на летательных аппаратах (ЛА) изделий электрооборудования, соответствующая моменту их установки, и дополнительных капитальных вложений в производственные фонды строительной организации воздушного судна, взятых с учетом их годовой нормативной эффективности:

$$З = C + E_n K, \quad (4.52)$$

где C — себестоимость; E_n — коэффициент нормативной эффективности; K — дополнительные капитальные вложения.

В связи с тем, что изделия систем электроснабжения имеют различные сроки службы, для их сравнительной оценки необходим анализ затрат, приходящихся на каждый год функционирования

оборудования. Однако в конкретной электросистеме сроки службы оборудования часто различаются на порядок. Для оценки индивидуального срока службы каждого изделия применяется соотношение

$$T_{cl} = \frac{T_{pl} \Delta p}{T_0}, \quad (4.53)$$

где T_{pl} — ресурс изделия, ч; T_0 — годовой налет ЛА, ч; Δp — коэффициент, учитывающий изменения ресурса и налета во времени, зависит от продолжительности жизни ЛА.

Для оценки срока службы всей электросистемы применяется показатель, рассчитываемый как среднее арифметическое индивидуальных сроков службы, взвешенное по приведенным затратам на каждый вид оборудования:

$$T_c = \frac{\sum 3_i T_{cl}}{\sum 3_i}. \quad (4.54)$$

Указанный показатель имеет конкретное экономическое содержание, так как он характеризует срок, в течение которого суммарные отчисления на реновацию по системе полностью компенсируют его первоначальную стоимость. На его основе рассчитывается коэффициент P , учитывающий долю отчислений на реновацию. Расчет производится с приведением к единому времени:

$$P = \frac{E}{(1 + E)^{T_c} - 1}, \quad (4.55)$$

где E — коэффициент приведения.

Рассмотренные показатели позволяют характеризовать материальные затраты, связанные с созданием электрооборудования, как по каждому его виду, так и по всей системе в целом.

Годовые эксплуатационные затраты 3_s , связанные с применением той или иной электросистемы на борту ЛА, состояются из следующих компонентов:

$$3_s = 3_{об} + 3_{тр} + 3_{топ}, \quad (4.56)$$

где $3_{об}$ — затраты на обслуживание и ремонт оборудования; $3_{тр}$ — затраты на транспортировку оборудования на борту ЛА; $3_{топ}$ — затраты на топливо, необходимое для обеспечения **функционирования** электрооборудования.

Затраты на обслуживание и ремонт электрооборудования определяются как

$$3_{об} = \sum (\lambda_i + 1/T_{мрi}) \Theta_i \Delta_0 T_0, \quad (4.57)$$

где \mathcal{E}_i — стоимость проведения 1 чел-ч работы на данном типе оборудования; λ_i — частота внезапных отказов данного типа оборудования; $T_{\text{мр}i}$ — межремонтный ресурс данного типа оборудования; Δ_0 — коэффициент, учитывающий изменение затрат во времени.

Важными исходными показателями, характеризующими эксплуатационные затраты, являются взлетная масса оборудования и масса топлива, затрачиваемая на его функционирование.

Затраты на транспортировку оборудования на борту ЛА определяются из соотношения

$$3_{\text{тр}} = \Theta M_{\text{сэ}}, \quad (4.58)$$

где $M_{\text{сэ}}$ — взлетная масса системы; Θ — удельный технико-экономический показатель данного ЛА.

Удельный технико-экономический показатель учитывает затраты, связанные с перевозкой на борту ЛА единицы полетной массы любого вида (т. е. он не учитывает затраты топлива, непосредственно связанные с генерированием электроэнергии и необходимостью охлаждения оборудования):

$$\Theta = \frac{K_{\text{тр}} E_{\text{н}} + \sum 3_i^{\text{р}} (\lambda_i + 1/T_{\text{мр}i}) + \sum 3_i + 3_{\text{лпс}}^{\text{зп}} + 3_{\text{ап}} T_0}{M_{\text{ЛА}}}, \quad (4.59)$$

где $M_{\text{ЛА}}$ — взлетная масса ЛА; $K_{\text{тр}}$ — капитальные вложения на шасси, планер и силовую установку; $3_i^{\text{р}}$ — амортизационные отчисления на один капитальный ремонт компонента ЛА; $T_{\text{мр}i}$ — межремонтный ресурс и частота внезапных отказов компонента ЛА; 3_i — расходы на текущий ремонт компонента ЛА (на 1 ч полета); $3_{\text{лпс}}^{\text{зп}}$ — часовая заработная плата летно-подъемного состава; $3_{\text{ап}}$ — часовые аэропортовые расходы.

Затраты на топливо определяются исходя из количества топлива, расход которого связан с функционированием системы:

$$3_{\text{т}} = C_{\text{т}} M_{\text{т}}, \quad (4.60)$$

где $C_{\text{т}}$ — стоимость 1 кг авиационного топлива; $M_{\text{т}}$ — масса топлива, затрачиваемого на обеспечение функционирования системы электроснабжения.

Таким образом, в соответствии с построенной моделью годовые народнохозяйственные затраты, обусловленные применением на борту ЛА системы электроснабжения, составят

$$3_{\text{т}} = 3(\text{р} + E_{\text{н}}) + 3_{\text{с}} + E_{\text{н}} K_{\text{н}}, \quad (4.61)$$

где $K_{\text{н}}$ — сопутствующие капитальные вложения потребителя системы.

§ 4.7. Автоматизированный синтез самолетных ЭЭС

Изложенные выше теоретические результаты по синтезу ЭЭС первую практическую реализацию получили применительно к самолетным ЭЭС. Во второй половине 70-х годов XX в. во Всесоюзном заочном политехническом институте (ныне Московский государственный открытый университет) был разработан пакет прикладных программ (ППП) «Структура» [10]. Основные компоненты ППП «Структура» для структурно-параметрического синтеза ЭЭС приведены на рис. 4.6 и соответствуют алгоритмам многокритериального синтеза с полным перебором вариантов. В структурной схеме выделены четыре проектирующие подсистемы:

- 1) генерации вариантов;
- 2) анализа вариантов;
- 3) принятия решений;
- 4) формирования проектной документации.

Хотя объем проектной документации на стадии структурно-параметрического проектирования невелик (в основном структурные схемы ЭЭС и спецификация элементной базы), тем не менее выделение автономной подсистемы документирования целесообразно. Это обеспечивает представление проектной документации по любому структурно-параметрическому варианту ЭЭС, полученному в результате синтеза или хранящемуся в базе данных. Все остальные подсистемы на рис. 4.6 носят сервисный характер.

Центральное место в структурно-функциональной схеме ППП занимает *управляющая подсистема*. Она обеспечивает выбор режима работы (синтеза или анализа заданного варианта), последовательность обращения к проектирующим и сервисным подсистемам, контролирует наличие необходимой информации для решения задач, обслуживает обработку ненормальных завершений и аварийных ситуаций. При организации оверлейных структур управляющая подсистема входит в корневой сегмент, а при мультипрограммировании осуществляет синхронизацию параллельных процессов. Наконец, управляющая подсистема обеспечивает функционирование ППП в реальном масштабе времени, т. е. дает возможность остановить в любой момент времени процесс проектирования, сохранив все полученные к данному моменту результаты. После остановки пользователь может тут же проанализировать имеющиеся результаты, внести корректировку в исходную информацию и возобновить процесс решения с достигнутого уровня или (при необходимости) с более раннего уровня. В случае изменений в составе информации на не-

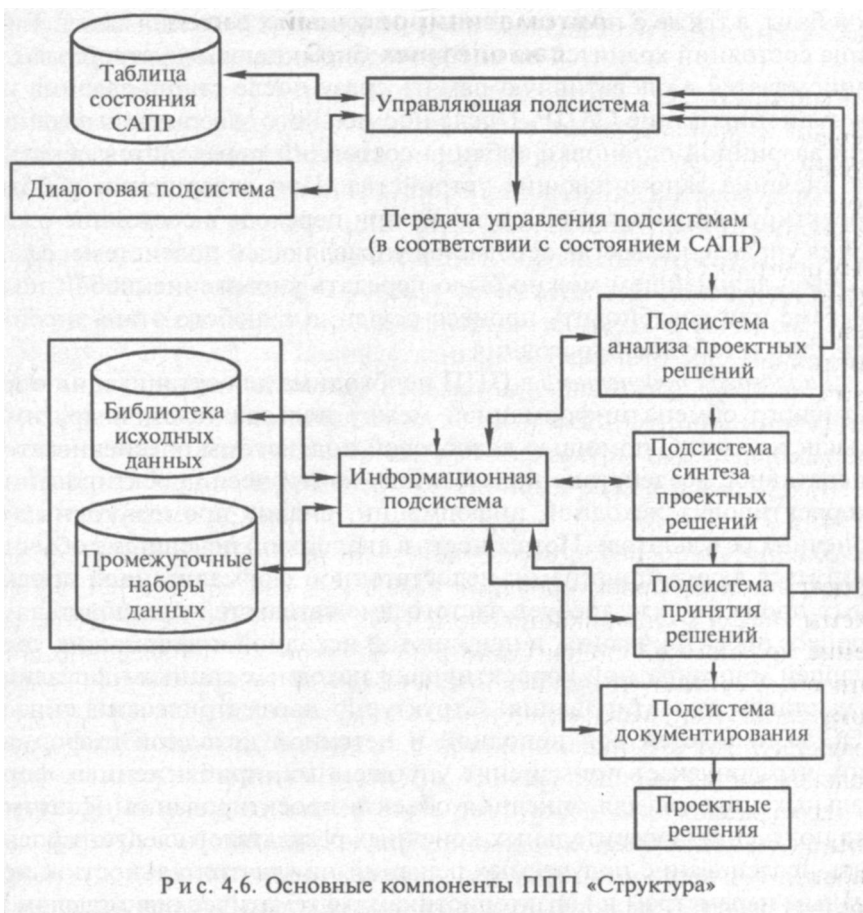


Рис. 4.6. Основные компоненты ППП «Структура»

котором уровне нет необходимости повторять процедуры предыдущих уровней. Если полный процесс проектирования с начала до конца требует сравнительно больших затрат машинного времени, то можно полный процесс разбить на несколько этапов и вести проектирование по частям с перерывами между отдельными этапами. При необходимости пользователь может также «вручную» ввести описание одного или нескольких структурно-параметрических вариантов ЭЭС на некотором этапе проектирования и провести анализ этих вариантов на последующих этапах.

Для обеспечения функционирования ППП в реальном времени управляющая подсистема использует *таблицу состояний*, в которую систематически вносится необходимая информация о текущем состоянии процесса проектирования, набора данных информацион-

ной базы, а также о промежуточных результатах решения задач. Таблица состояний хранится на внешних запоминающих устройствах и записывается в оперативную память сразу после старта задания на функционирование САПР. После нормального завершения задания или аварийной остановки таблица состояний переводится обратно на внешние запоминающие устройства. При завершении работы проектирующих подсистем, а также при переходе в состояние ожидания управление всегда передается управляющей подсистеме, с тем чтобы в дальнейшем можно было передать управление любой подсистеме или возобновить процесс решения с любого этапа в соответствии с таблицей состояния.

Диалоговая подсистема в ППП необходима для организации оперативного обмена информацией между пользователем и другими подсистемами. С помощью диалоговой подсистемы обеспечивается оперативное воздействие пользователя на процесс проектирования (корректировка исходной информации, анализ промежуточных и конечных результатов). Потребность в диалоговой подсистеме обычно диктуется двумя причинами: недостаточной формализацией проектных процедур, что требует частого вмешательства пользователя в процесс проектирования, и неполнотой исходной информации, требующей многократной корректировки исходных данных на различных этапах проектирования. Структурно-параметрический синтез ЭЭС выполняется при неполной и неточной исходной информации, что допускает применение упрощенных, приближенных формальных моделей для описания объекта проектирования. Поэтому для получения достоверных конечных результатов следует проводить исследование получаемых решений на чувствительность к исходным параметрам и характеристикам, математическим моделям и т. п. Следовательно, в процессе структурно-параметрического проектирования необходимы частая корректировка данных на различных этапах проектирования, смена моделей, критериев и алгоритмов и т. д., что может быть реализовано только с помощью диалоговой подсистемы.

Назначение *информационной подсистемы* — оперативный обмен информацией между проектирующими подсистемами и базой данных. Информационная подсистема обеспечивает выдачу исходных данных для функционирования проектирующих подсистем, хранение промежуточных и конечных результатов проектирования, корректировку информационных массивов в целом. Обычно рекомендуется строить информационную подсистему на основе универсальных СУБД. Однако окончательное решение по выбору или применению

универсальных СУБД принимается в зависимости от рассматриваемой информационной модели ЭЭС.

В соответствии с иерархической структурой ЭЭС (см. рис. 4.1) информационная модель также является многоуровневой, причем здесь можно различать уровни информации как по характеру структурных элементов (источники, преобразователи, потребители), так и по степени их детализации. При составлении многоуровневой информационной модели ЭЭС следует учитывать, что каждый структурный элемент характеризуется и качественными (вид энергии, генерируемой источниками, виды энергии на входе и выходе преобразователя и т. д.), и количественными параметрами. Последние делятся на функциональные параметры (мощность, КПД и т. п.), определяющие принципиальную возможность функционирования элемента в системе, и критериальные параметры (масса, стоимость и т. д.), необходимые для технико-экономической оценки элементов и системы в целом.

По степени детализации в информационном описании структурных элементов ЭЭС целесообразно выделить следующие уровни. *Первый информационный* уровень характеризует структурный элемент в наиболее общем виде и включает только качественные параметры: функциональное назначение элемента в системе и виды обрабатываемой энергии. *Второй информационный* уровень детализирует особенности, связанные с принципиальными техническими решениями структурного элемента. Так как в общем случае каждый структурный элемент может быть реализован с помощью различных физических принципов действия или конструктивных исполнений, то, следовательно, каждому структурному элементу первого уровня ставится в соответствие ряд вариантов на втором уровне. Варианты второго уровня характеризуются количественными параметрами, специфичными для каждой принципиальной реализации (надежность, КПД и т. п.). Наконец, *третий информационный* уровень аналогичным образом детализирует особенности, связанные с различными конструктивными вариантами, реализующими принципиальные технические решения элементов. Конструктивные варианты третьего уровня характеризуются полным набором параметров, необходимых для расчета технико-экономических характеристик ЭЭС (в том числе и уточненными параметрами второго уровня).

Подобное представление информационной модели позволяет выделить два достаточно самостоятельных массива информации в базе данных (см. рис. 4.6). Один массив представляет библиотеку данных по всем уровням информации для всех структурных эле-

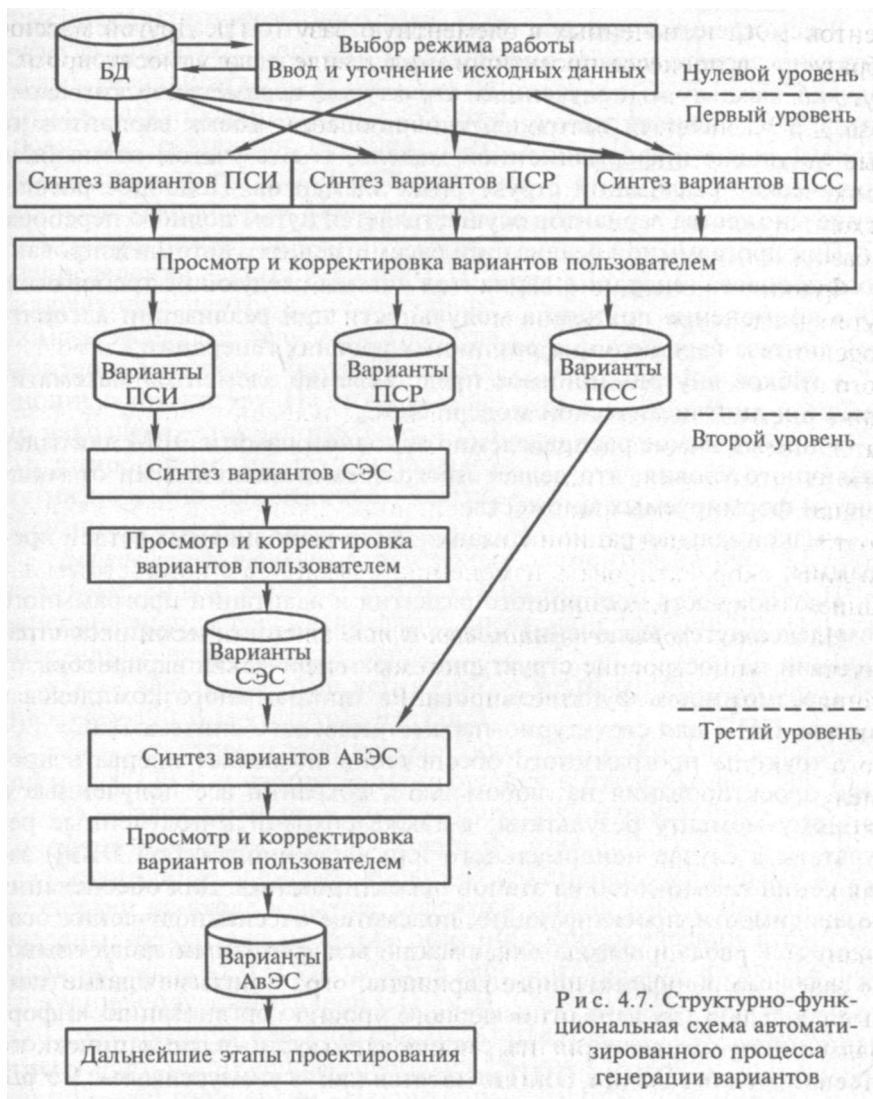
ментов ЭЭС, включенных в элементную базу ППП. Другой массив образуется в процессе проектирования в виде совокупности промежуточных и конечных результатов структурно-параметрического синтеза. Для увеличения быстродействия процесса проектирования данные по структурным элементам, включенным в элементную базу конкретно проектируемой ЭЭС, следует перевести из библиотеки исходных данных в оперативную память ЭВМ, т. е. заменить поиск в базе данных более быстрым поиском в оперативной памяти.

Функционирование ППП в целом организуется пользователем путем воздействия на управляющую подсистему через диалоговую подсистему. Структурно-функциональная схема автоматизированного процесса генерации вариантов для реализации в ППП показана на рис. 4.7. В начале проектирования (нулевой уровень) пользователь вводит необходимую исходную информацию по элементной базе и ограничениям на построение структурно-параметрических вариантов. Эта информация в основном хранится в базе данных, поэтому пользователю при каждом обращении к системе достаточно лишь скорректировать изменения, связанные с конкретным заданием на проектирование.

На *первом уровне генерации вариантов* автоматически решаются задачи синтеза вариантов для системы генерирования, преобразования и потребления в отдельности. Результаты решения записываются на машинные носители, что исключает необходимость повторного решения задач первого уровня при повторных решениях задач следующих уровней. Такая необходимость возникает только в том случае, когда вносятся изменения в исходные данные.

Использование личного опыта проектировщика в решении задач каждого уровня реализуется путем предоставления ему возможности просмотра и корректировки автоматически полученных вариантов. Проектировщик может исключить формально допустимые, но заведомо не эффективные варианты, ограничить исходные данные последующих вариантов первого уровня и т. д. При этом формально допустимые варианты, исключаемые проектировщиком, не отсеиваются бесследно, а лишь метятся как «недопустимые». Устранение этой метки позволяет проектировщику вновь включить данный вариант в процесс генерации на следующих этапах.

На *втором уровне генерации вариантов* автоматически синтезируются все варианты СЭ исходя из результатов первого уровня и исходной информации. Полученные на втором уровне результаты также записываются на машинные носители и могут быть просмотрены и скорректированы проектировщиком. При исключении проектировщиком отдельных, формально допустимых вариантов СЭ последние



также получают метку «недопустимый», которая может быть при необходимости устранена.

На *третьем уровне генерации вариантов* автоматически синтезируются все варианты исходя из результатов первых двух уровней и исходной информации. Результаты третьего уровня также записываются на машинные носители и могут быть просмотрены и скорректированы проектировщиком.

Рассмотренный процесс генерации вариантов реализуется относительно первого уровня информационной модели элементов ЭЭС. Однако каждый из полученных структурно-параметрических вариантов ЭЭС является источником образования новых вариантов на втором уровне информационной модели, т. е. с учетом возможных технических реализаций структурных элементов. Подобное расширение множества вариантов осуществляется путем полного перебора.

При программной реализации рассмотренного автоматизированного процесса генерации вариантов учтены следующие требования:

- применение принципа модульности при реализации алгоритмов синтеза вариантов на различных уровнях генерации;
- гибкое **внутримашинное** представление элементов математической и лингвистической модели ЭЭС;
- динамическое распределение основной памяти ЭВМ для задач различного уровня, что делает программы независимыми от мощностей формируемых множеств;
- максимальная рационализация часто выполняемых ветвей программы;
- возможность постоянного развития и адаптации программного комплекса путем включения новых и исключения имеющихся ограничений на построение структурно-параметрических вариантов;
- возможность функционирования программного комплекса в составе ППП для структурно-параметрического синтеза ЭЭС.

Структура программного обеспечения позволяет прервать процесс проектирования на любом шаге, сохранив все полученные к данному моменту результаты, а также сохранить полученные результаты в случае ненормального или аварийного (сбой ЭВМ) завершения какого-либо из этапов проектирования. Для обеспечения независимости проектирующих подсистем от специфических особенностей ввода и вывода информации все программы **ввода—вывода** включены в информационную подсистему. Учитывая сравнительно небольшой объем и относительно простую организацию информационного обеспечения на стадии структурно-параметрического проектирования ЭЭС, в ППП не используются универсальные СУБД. Поэтому база данных организована в виде библиотечного набора данных, разделы которого содержат информацию по различным тематическим аспектам элементной базы. Чтение записей разделов осуществляется с помощью специально разработанных программ.

С помощью ППП «Структура» решен ряд задач текущего и прогнозного проектирования самолетных ЭЭС. При этом модель ЭЭС представлялась четырехуровневой структурой (**рис. 4.8**). На верхнем уровне располагаются источники (**И**), включающие генераторы пе-

ременного или постоянного тока, устройства привода генераторов от маршевых авиадвигателей, аппаратуру защиты и регулирования. На следующем уровне располагаются преобразователи (П) совместно с их аппаратурой защиты и регулирования. На предпоследнем уровне находятся сети передачи и распределения электроэнергии (СПР), включающие центральные и периферийные распределительные устройства, электропроводку и защитно-коммутационную аппаратуру. На нижнем уровне находятся стоки-потребители (С), сгруппированные по функциональному назначению приемников электроэнергии.

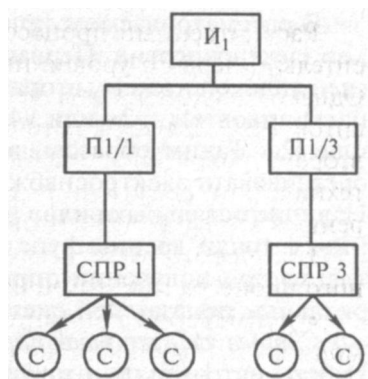


Рис. 4.8. Пример структурной схемы ЭЭС

Цифровые обозначения структурных элементов на рис. 4.8 соответствуют видам электроэнергии. Например, для самолетов гражданской авиации рассматриваются следующие традиционные и перспективные виды электроэнергии:

- «1» — электроэнергия переменного трехфазного тока напряжением 208/120 В и частотой 400 Гц;
- «2» — электроэнергия переменного трехфазного тока напряжением 208/120 В и частотой, меняющейся в пределах 400...800 Гц;
- «3» — электроэнергия постоянного тока напряжением 28,5 В;
- «4» — электроэнергия постоянного тока напряжением 270 В.

Структурные элементы уровня П с одинаковыми видами электроэнергии на входе и выходе являются условными (единичными) и введены только для удобства описания иерархической структуры. Наличие условного П указывает в действительности на прямое подключение соответствующей СПР к И. Структурные элементы уровня С различаются как критичные. Критичные группы приемников имеют один пронумерованный вход, соответствующий виду потребляемой электроэнергии. Некритичные группы приемников могут иметь несколько вариантов исполнения с различными видами потребляемой электроэнергии, но с одинаковыми выходными характеристиками. Например, один и тот же момент и одна и та же частота вращения могут быть достигнуты двигателями как переменного, так и постоянного тока. Соответственно вариантам потребления электроэнергии некритичные группы приемников имеют несколько пронумерованных входов.

В рассматриваемом примере выделяются пять групп приемников электроэнергии. Первая группа допускает питание электроэнергией только вида «1», вторая группа — только вида «3», третья группа — видов «1», «2» или «4», четвертая и пятая группы — вида «1» или «2». Таким образом, в синтезируемой ЭЭС обязательно надо организовать электроснабжение по крайней мере видами «1» и «3». Наличие остальных видов электроснабжения является необязательным с точки зрения функционирования приемников и возможно только при получении определенных выгод с точки зрения критерийных показателей системы.

Синтез структурно-параметрических вариантов начинается с выбора источников и преобразователей электроэнергии. В данном примере предполагается, что в элементную базу указанных уровней ЭЭС включены источники всех рассматриваемых видов электроэнергии и преобразователи следующих типов: «1» в «3»; «2» в «1»; «2» в «3»; «3» в «1»; «4» в «1»; «4» в «3». Условные преобразователи («1» в «1» и т. д.) включаются для всех видов электроэнергии. Элементная база уровня СПР соответствует выходам всех преобразователей, включая условные, и в данном случае охватывает все виды электроэнергии. Все структурные элементы предполагаются только в одной технической реализации, соответствующей современному уровню оборудования.

В процессе структурно-параметрического синтеза для данного примера учитываются ограничения на построение структурно-параметрических вариантов ЭЭС:

- число источников различного вида не должно превышать двух;
- число преобразователей различного типа, включая условные, т. е. число различных видов электроэнергии в системе, не должно превышать трех;
- на уровне СПР обязательно должны присутствовать сети электроснабжения видами «1» и «3»;
- значение коэффициентов резервирования источников и преобразователей не должно превышать четырех;
- надежность электроснабжения по каждому виду электроэнергии должна быть не ниже 0,9999999.

Структурно-параметрический синтез выполняется в двух постановках задачи: многокритериальной и однокритериальной. Учитываются три критерия: надежность системы электроснабжения, охватываемой уровнями И, П и СПР, установленная масса ЭЭС и расход топлива на функционирование ЭЭС. При однокритериальном синтезе ведется поиск оптимального структурно-параметрического варианта по заданному критерию и всех близких к нему вариантов,

располагающихся в заданном диапазоне отклонения от оптимума. При многокритериальном синтезе по заданному произвольному набору критериев из числа указанных выше выделяются варианты, принадлежащие Паретто-множеству или его подмножеству, ограниченному заданными диапазонами отклонения от оптимальных значений критериев.

В процессе решения рассматриваемой задачи синтеза применительно к гражданским самолетам среднего и дальнего радиуса действия (например, Ил-62, Ил-86, Ил-76 и т. п.) получены следующие результаты. Количество структурно-параметрических вариантов построения систем генерирования первичной электроэнергии (уровень И) равно 10, построения систем электроснабжения (совместно уровни И, П, СПР) — 22, построения ЭЭС в целом — 140. По критерию конструктивной массы ЭЭС предпочтительным является ряд вариантов, например варианты с первичной электроэнергией видов 1, 2 и 4. По критерию надежности и расхода топлива преимущество получают варианты с первичной электроэнергией видов 2 и 4. По многокритериальной оценке конкурентоспособными оказываются всего 4—5 вариантов (варианты Паретто-множества), что позволяет осуществить выбор конечного варианта лицом (лицами), принимающим решение.

Результаты синтеза структур самолетных ЭЭС показали перспективность создания и широкого внедрения ЭЭС переменного тока напряжением 208/120 В и частотой, плавающей в пределах 400...800 Гц. С этой целью под руководством автора была выполнена серия исследований, посвященных питанию бортовых асинхронных приводов напряжением с плавающей частотой (см. гл. 10). В результате этих исследований было показано, что большинство асинхронных двигателей суммарной мощностью более 80% может быть перестроено соответствующим образом, что еще больше увеличивает преимущества системы с плавающей частотой. В 1979 г. был разработан и предложен авиационной промышленности эскизный проект ЭЭС переменного тока и переменной частоты для самолетов типа Ил-86.

Г Л А В А 5

Структурно-топологический синтез систем

§ 5.1. Постановка задачи синтеза

Объектом синтеза являются *электрические сети*, соединяющие между собой элементы электрических систем. Применительно к ЭЭС электрические сети предназначены для передачи и распределения электрической энергии от источников к потребителям. Электрические сети в качестве основных элементов включают соединительные провода, жгуты, кабели и распределительные шины. Классификация электрических сетей осуществляется по различным признакам: величине напряжения, роду тока, числу фаз, числу каналов резервирования, конфигурации и т. п.

По назначению сети подразделяются на магистральные и распределительные. *Магистральная сеть* осуществляет передачу энергии от источников к распределительным пунктам, а *распределительная сеть* — от пунктов распределения к потребителям. По роду тока различают сети постоянного и переменного тока. По числу фаз широкое применение получили однофазная и трехфазная сети. По способу исполнения сети различаются как однопроводные и **МНОГО**-проводные (*двух-*, трех- и четырехпроводные). Однопроводные сети применяются на транспортных объектах, где в качестве второго провода используется металлический корпус. По способу распределения электроэнергии сети делят на централизованные, децентрализованные, раздельные и комбинированные.

При *централизованном* способе все источники подключены на общую шину центрального распределительного устройства (ЦРУ), как показано на рис. 5.1, а. От общей шины питание к потребителям передается по фидерам. При выходе из строя одного из источников потребители продолжают получать электроэнергию за счет

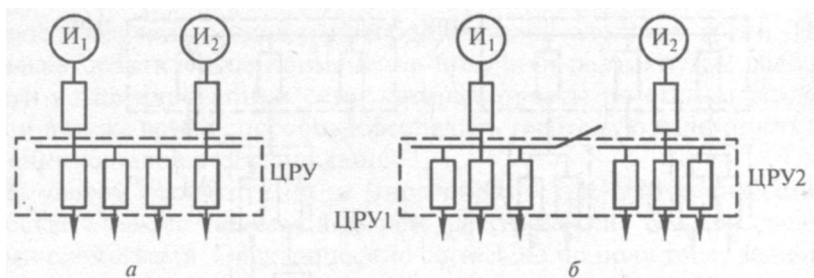


Рис. 5.1. Способы распределения электроэнергии:
 а — централизованный; б — децентрализованный

продолжающих работу источников. При наличии нескольких источников, работающих на общую шину, надежность питания потребителей достаточно высока. Однако централизованный способ имеет и существенные недостатки, связанные с параллельной работой источников. Кроме того, в случае короткого замыкания на шинах ЦРУ прекращается питание всех потребителей.

В *децентрализованных* системах каждый источник подключается к одному ЦРУ (рис. 5.1, б), от которого могут питаться и другие распределительные устройства (РУ). Для повышения надежности предусматривается возможность соединения шин ЦРУ между собой. В случае выхода из строя одного из источников происходит соединение шин ЦРУ и все потребители получают питание за счет резерва мощности продолжающего работу источника. Разновидностью децентрализованного способа является *раздельный* способ, когда каждый источник питает лишь свою группу потребителей, подобранных по ряду параметров электропитания, например точности стабилизации напряжения и частоты. Возможности резервирования в данном случае резко ограничиваются.

Наконец, *комбинированный* способ предполагает совместное использование и централизованного, и децентрализованного способов распределения электроэнергии, когда часть источников работает на общие шины, а другая часть — на собственные шины. При комбинированном способе удастся наилучшим образом использовать преимущество двух основных способов: централизованного и децентрализованного.

По конфигурации электрические сети делятся на разомкнутые, замкнутые и комбинированные. *Разомкнутые* сети характеризуются тем, что каждое РУ получает питание только от одного ЦРУ или РУ. Здесь возможны два варианта:

- 1) РУ подключены параллельно к ЦРУ;

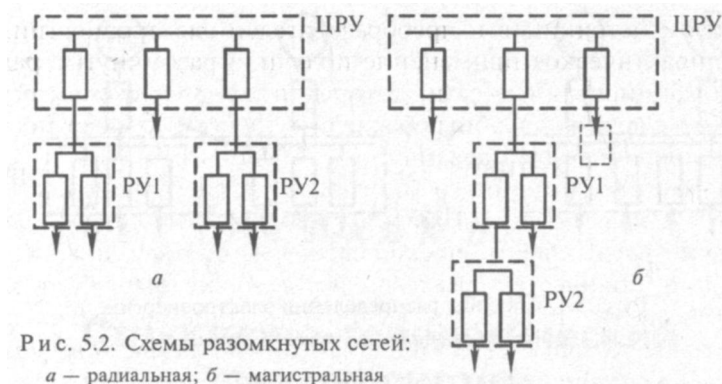


Рис. 5.2. Схемы разомкнутых сетей:
 а — радиальная; б — магистральная

2) РУ подключены последовательно к ЦРУ.

Первый вариант соответствует радиальной разомкнутой схеме сети (рис. 5.2, а), а второй — центральной разомкнутой схеме (рис. 5.2, б). В радиальных разомкнутых сетях легко осуществлять резервирование и селективность защиты. В замкнутых сетях РУ получают питание одновременно от двух ЦРУ и более. Замкнутые сети, так же как и разомкнутые, могут быть радиальными и магистральными (рис. 5.3). Замкнутые сети характеризуются большей надежностью, чем разомкнутые, особенно замкнутые магистральные. Однако замкнутые сети более сложны как по построению, так и по технической реализации. Комбинированные сети во многих случаях сочетают преимущество разомкнутых и замкнутых сетей. Число каналов резервирования и надежность сети в целом, кроме конфигурации, определяются также

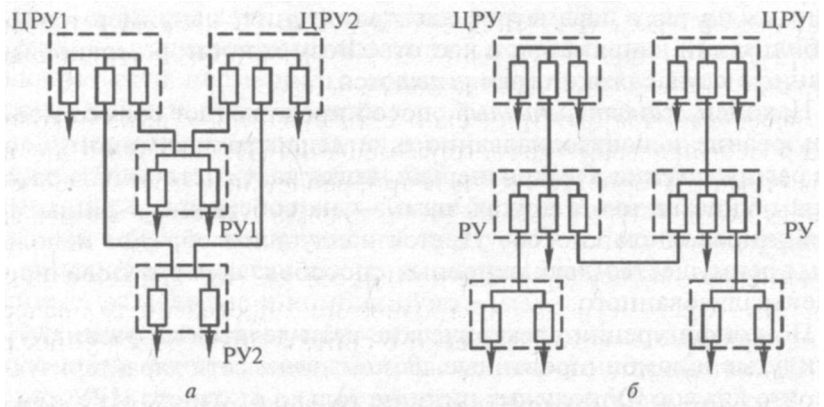


Рис. 5.3. Схемы замкнутых сетей:
 а — радиальная; б — магистральная

количеством источников и преобразователей электроэнергии. Наибольшее практическое применение получили разомкнутые радиальные и комбинированные сети, которые просты по схемам реализации и в то же время способны обеспечить требуемую надежность при наличии каналов резервирования.

С учетом рассмотренного многообразия электрических сетей в качестве *объекта синтеза* выберем электрические сети со следующими свойствами. Электрические сети ЭЭС по роду тока, величине напряжения, количеству фаз и числу проводов могут быть комбинированными, т. е. представлять собой объединение нескольких сетей, каждая из которых имеет фиксированные параметры указанного типа. Каждая фиксированная сеть питается от соответствующего источника или преобразователя. В этом случае вводятся понятия первичных и вторичных сетей. Первичные сети питаются от соответствующих источников электроэнергии, а вторичные сети — от преобразователей (вторичных источников). По способу распределения электроэнергии и конфигурации рассматриваются разомкнутые сети, в основном радиального типа с децентрализованным способом распределения и фиксированным количеством каналов резервирования. Пример структурной схемы электрической сети с указанными выше свойствами приведен на рис. 5.4. Потребители электроэнергии подсоединяются к сети двумя способами:

- 1) подключением к шинам ЦРУ и РУ;
- 2) подключением через распределительные коробки (щиты).

В последних кроме распределительных шин размещаются также аппаратура защиты, коммутации, регулирования и контрольно-измерительная аппаратура. Таким образом, распределительные коробки (РК) можно рассматривать как совмещенные блоки потребления и распределения **электроэнергии**. На рис. 5.4 РК включены в состав потребителей и специально не обозначены.

Задача синтеза электрической сети сводится к выбору количества и мест пространственного размещения ЦРУ, РУ и РК для всех первичных и вторичных сетей и прикреплении потребителей к соответствующим ЦРУ, РУ или РК. *Исходными данными* для решения задачи являются:

- 1) первичные и вторичные источники электроэнергии с фиксированными параметрами электроэнергии, определенными ранее на этапе структурно-параметрического синтеза, пространственное размещение первичных источников;
- 2) фиксированные параметры электропитания и пространственные координаты размещения всех потребителей электроэнергии;
- 3) геометрическая конфигурация монтажного пространства;

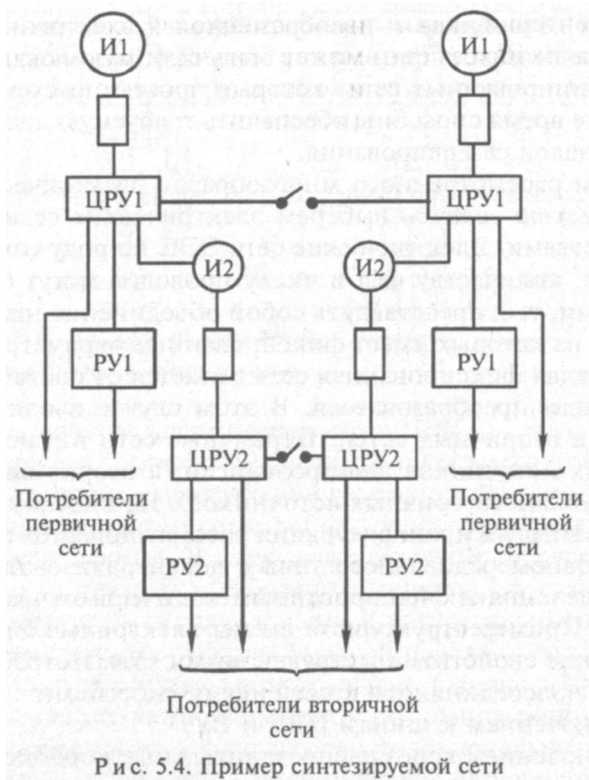


Рис. 5.4. Пример синтезируемой сети

4) допустимые области или зоны размещения вторичных источников, ЦРУ, РУ, РК в монтажном пространстве;

5) допустимые трассы (пути) для прокладки электрических соединений в монтажном пространстве.

Вариации количества ЦРУ, РУ, РК и их пространственного размещения, а также присоединения потребителей и прокладки проводов определяют соответственно многовариантность решения рассматриваемой задачи синтеза. Однозначность решения может быть достигнута путем оптимизационной постановки задачи синтеза. В качестве *критериев оптимальности* электрических сетей можно рассматривать ряд технико-экономических показателей: стоимость создания и эксплуатации, надежность и живучесть, минимальная масса, материалоемкость и т. п. В связи с колебаниями цен, особенно в инфляционные периоды, экономические критерии недостаточно объективны. Надежностные критерии, как правило, ограничиваются снизу и вводятся в задачу в виде ограничений на структуру сети и число каналов резервного питания. Наиболее рациональными ока-

зываются критерии, связанные с оценкой массы сети. При таком подходе задача синтеза сети может быть сформулирована как однокритериальная задача оптимизации с ограничениями по надежности, помимо напряжения, и другими.

§ 5.2. Математическое моделирование задачи синтеза

Анализ структурных схем электрических сетей рассматриваемого типа (см. рис. 5.4) показывает, что эти схемы по структурным свойствам аналогичны структурным схемам ЭЭС (см. рис. 4.1). Действительно, источники, распределительные пункты (ЦРУ, РУ и РК) и потребители (П) электроэнергии можно расположить на различных иерархических уровнях в направлении передачи энергии от источников к ЦРУ, от ЦРУ к РУ, от РУ к РК и от РК к потребителям. Противоречие, связанное с тем, что некоторые потребители могут быть подключены непосредственно к ЦРУ или РУ, легко устранить, если ввести в рассмотрение условные РК, размещенные там же, где и РУ, и условные РУ, размещенные там же, где и ЦРУ. Тогда в случае прямого подключения потребителя, например, к ЦРУ можно считать, что соединение происходит через условные РУ и РК.

Продолжая аналогию со структурными схемами ЭЭС, сделаем достаточно правдоподобное допущение о том, что целевая функция сети, принятая в качестве критерия оптимизации, является аддитивной, детерминированной и представляет сумму составляющих, определяющих долю отдельных элементов или участков сети в целевой функции. Основными элементами сети являются провода и распределительные шины. Доля шин в показателях обычных разветвленных сетей достаточно мала по сравнению с долей проводов, например, в показателях массы или стоимости. Поэтому в дальнейшем распределительные шины исключим из рассмотрения, а в структурных схемах сетей ЦРУ, РУ и РК, равно как источники и потребители, будем изображать в виде узловых точек с нулевыми конструктивными параметрами. Таким образом, целевая функция будет представлять сумму составляющих, учитывающих вклад проводов в целевую функцию на отдельных участках сети, разграничиваемых иерархическими уровнями расположения узловых точек.

Соединительные провода (жгуты, кабели и т. п.) характеризуются многими факторами, например маркой провода, длиной и сечением, количеством проводов в электросоединении, количеством резервных линий питания и т. д. Однако из множества характеристик с точки зрения топологической структуры сети наиболее важной являются длины линий соединений. Поэтому данный фактор

будем считать определяющим для составляющих целевой функции. Влияние остальных факторов может быть учтено при необходимости каким-либо известным способом.

С учетом сделанных предположений целевая функция для *первичной сети* может быть представлена так:

$$\Phi = \Phi_{\text{ЦРУ1}}^{\text{И1}} + \Phi_{\text{РУ1}}^{\text{ЦРУ1}} + \Phi_{\text{РК1}}^{\text{РУ1}} + \Phi_{\text{П1}}^{\text{РК1}}, \quad (5.1)$$

где $\Phi_{\text{ЦРУ1}}^{\text{И1}}$ — составляющая участка первичной сети между источниками и ЦРУ1; $\Phi_{\text{РУ1}}^{\text{ЦРУ1}}$ — составляющая участка между ЦРУ1 и РУ1; $\Phi_{\text{РК1}}^{\text{РУ1}}$ — составляющая участка между РУ1 и РК1; $\Phi_{\text{П1}}^{\text{РК1}}$ — составляющая участка между РК1 и потребителями.

Выражая составляющие (5.1) через составляющие отдельных линий соединений, получим

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum_{i=1}^{N_{\text{ЦРУ1}}} [\Phi_i^{\text{И1}}(L_i^{\text{И1}}) + \Phi_i^{\text{Р}}(L_i^{\text{Р}})] + \sum_{j=1}^{N_{\text{РУ1}}} [\Phi_j^{\text{ЦРУ1}}(L_j^{\text{ЦРУ1}}) + \Phi_j^{\text{Р}}(L_j^{\text{Р}})] + \\ & + \sum_{m=1}^{N_{\text{РК1}}} [\Phi_m^{\text{РУ1}}(L_m^{\text{РУ1}}) + \Phi_m^{\text{Р}}(L_m^{\text{Р}})] + \sum_{n=1}^{N_{\text{П1}}} [\Phi_n^{\text{РК1}}(L_n^{\text{РК1}}) + \Phi_n^{\text{Р}}(L_n^{\text{Р}})], \end{aligned} \quad (5.2)$$

где i, j, m, n — соответственно текущие номера ЦРУ1, РУ1, РК1 и потребителей первичной сети (П1); $N_{\text{ЦРУ1}}, N_{\text{РУ1}}, N_{\text{РК1}}, N_{\text{П1}}$ — соответственно количества ЦРУ1, РУ1, РК1 и П1; L — длина линии соединения между узловыми точками схемы; первые составляющие в квадратных скобках характеризуют линию питания узловых точек нижнего уровня от соответствующих узловых точек верхнего уровня, а вторые составляющие — линии резервного питания этих же точек, которое в общем случае может осуществляться как от точек верхнего уровня, так и от точек своего уровня.

В целом выражение (5.2) детализирует (5.1) до каждой соединительной линии схемы сети, как основное, так и резервное. Из (5.2) видно, что для определения целевой функции необходимо знать зависимости типа $\Phi(L)$ и длины всех соединений (основных и резервных). Зависимости типа $\Phi(L)$ в простейшем случае носят линейный характер, например масса или стоимость линии прямо пропорциональны ее длине. Что касается длин соединений между узловыми точками схемы, то они определяются через граничные узловые точки и трассы, по которым проложены соединения.

Каждая узловая точка сети в монтажном пространстве может быть представлена вектором. Введем для указанных векторов и их множеств следующие обозначения:

- вектор точки И $\mathbf{a}_\alpha \in \mathbf{D}_{И1} = \{\mathbf{a}_\alpha\}, \alpha = 1, \dots, N_{И1};$
- вектор точки ЦРУ1 $\mathbf{x}_i \in \mathbf{D}_{ЦРУ1} = \{\mathbf{x}_i\}, i = 1, \dots, N_{ЦРУ1};$
- вектор точки РУ1 $\mathbf{y}_j \in \mathbf{D}_{РУ1} = \{\mathbf{y}_j\}, j = 1, \dots, N_{РУ1};$
- вектор точки РК1 $\mathbf{z}_m \in \mathbf{D}_{РК1} = \{\mathbf{z}_m\}, m = 1, \dots, N_{РК1};$
- вектор точки П1 $\mathbf{\gamma}_n \in \mathbf{D}_{П1} = \{\mathbf{\gamma}_n\}, n = 1, \dots, N_{П1};$

где $\mathbf{D}_{И1}, \mathbf{D}_{ЦРУ1}, \mathbf{D}_{РУ1}, \mathbf{D}_{РК1}, \mathbf{D}_{П1}$ — конечные множества векторов соответствующих уровней. На размещение узловых точек в монтажном пространстве накладываются ограничения, связанные с тем, что обычно выделяются специальные области (зоны), где разрешается устанавливать источники, распределительные пункты и потребители. Эти ограничения можно учесть введением условий:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}_{И1} &\in \mathbf{D}_{И1}^{\text{доп}}; \\
 \mathbf{D}_{ЦРУ1} &\in \mathbf{D}_{ЦРУ1}^{\text{доп}}; \\
 \mathbf{D}_{РУ1} &\in \mathbf{D}_{РУ1}^{\text{доп}}; \\
 \mathbf{D}_{РК1} &\in \mathbf{D}_{РК1}^{\text{доп}}; \\
 \mathbf{D}_{П1} &\in \mathbf{D}_{П1}^{\text{доп}};
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

где индекс «доп» обозначает допустимое множество векторов соответствующего уровня. Аналогичным образом можно учесть ограничения на допустимые трассы для прокладки соединительных линий путем введения условия типа

$$L \in D_L^{\text{доп}}. \tag{5.5}$$

Условия (5.3)—(5.5) определяют возможные топологические вариации соединительных линий на допустимом дискретном, конечном множестве линий. Например, для произвольного ЦРУ1 основная линия питания $L_i^{И1}$ может выбираться лишь на допустимом множестве линий между вектором \mathbf{x}_i и векторами из множества $\mathbf{D}_{И1}$, т. е.

$$L_i^{И1} \in D_L(\mathbf{x}_i, \mathbf{D}_{И1}, \mathbf{D}_L^{\text{доп}}). \tag{5.6}$$

Суммарная резервная линия питания выбирается исходя из заданного коэффициента резервирования и разрешенных пунктов резервного питания ЦРУ. Например, для **схемы** на рис. 5.4 имеем

$$L_i^p \in D_L(\mathbf{x}_i, \mathbf{D}_{ЦРУ1}^o, K_i^p, \mathbf{D}_L^{\text{доп}}), \tag{5.7}$$

где K_i^p — коэффициент резервирования питания ЦРУ1; $D_{\text{ЦРУ1}}^o$ — множество векторов, полученное из $D_{\text{ЦРУ1}}$ путем исключения вектора \mathbf{x} .

Аналогичным образом можно составить ограничительные условия на другие линии в зависимости от векторов узловых точек, их множеств и коэффициентов резервирования, например:

$$L_j^{\text{ЦРУ1}} \in D_L(\mathbf{y}_j, D_{\text{ЦРУ1}}, D_L^{\text{доп}}); \quad (5.8)$$

$$L_j^p \in D_L(\mathbf{y}_j, D_{\text{ЦРУ1}}, K_j^p, D_L^{\text{доп}}); \quad (5.9)$$

$$L_m^{\text{РУ1}} \in D_L(\mathbf{z}_m, D_{\text{РУ1}}, D_L^{\text{доп}}); \quad (5.10)$$

$$L_m^p \in D_L(\mathbf{z}_m, D_{\text{РУ1}}, K_m^p, D_L^{\text{доп}}); \quad (5.11)$$

$$L_n^{\text{ПК1}} \in D_L(\bullet_n, D_{\text{ПК1}}, D_L^{\text{доп}}); \quad (5.12)$$

$$L_n^p \in D_L(\bullet_n, D_{\text{ПК1}}, K_n^p, D_L^{\text{доп}}). \quad (5.13)$$

Кроме ограничений топологического характера на выбор конфигурации сети могут влиять и другие ограничения, например допустимые падения напряжения от источников к потребителям. Подобные ограничения в достаточно общем виде могут быть записаны условиями типа

$$L \in D_L(D_{\text{И1}}, D_{\text{ЦРУ1}}, D_{\text{РУ1}}, D_{\text{ПК1}}, D_{\text{П1}}, M), \quad (5.14)$$

где $M = \{\beta_1, \beta_2, \dots\}$ — множество параметров, связанных друг с другом условиями типа

$$f(\beta_1, \beta_2, \dots) \geq 0. \quad (5.15)$$

Учитывая представленные математические описания функции цели и ограничений, а также практическую постановку задач синтеза электросетей (см. § 5.1), задаче синтеза первичных сетей при отсутствии (или пренебрежении) вторичных сетей можно дать следующую математическую формулировку.

Даны: множества векторов $D_{\text{И1}}$ и $D_{\text{П1}}$, удовлетворяющие условиям (5.4); допустимые множества $D_{\text{ЦРУ1}}^{\text{доп}}$, $D_{\text{РУ1}}^{\text{доп}}$, $D_{\text{ПК1}}^{\text{доп}}$, $D_L^{\text{доп}}$; коэффициенты резервирования K_i^p , K_j^p , K_m^p , K_n^p ; параметры β_1, β_2, \dots для источников и потребителей.

Требуется найти такие $D_{ЦРУ1}, D_{РУ1}, D_{РК1}, L_i^{И1}, L_i^p, L_j^{ЦРУ1}, L_j^p, L_m^{РУ1}, L_m^p, L_n^{РК1}, L_n^p$, которые доставляют максимум (минимум) функции Φ и удовлетворяют всем условиям (5.2)—(5.15).

При наличии вторичной сети в функции цели (5.1) добавляются новые составляющие (взяты в скобки):

$$\Phi = \Phi_{ЦРУ1}^{И1} + \Phi_{РУ1}^{ЦРУ1} + \Phi_{РК1}^{РУ1} + \Phi_{П1}^{РК1} + \left(\Phi_{И2}^{ЦРУ1} + \Phi_{ЦРУ2}^{И2} + \Phi_{РУ2}^{ЦРУ2} + \Phi_{РК2}^{РУ2} + \Phi_{П2}^{РК2} \right). \quad (5.16)$$

Соответственно новым составляющим (5.16) появляются новые условия, аналогичные условиям (5.2)—(5.15). В результате учет *вторичной сети* не изменяет по существу математическую формулировку задачи топологического синтеза и лишь усложняет, делает более громоздким их математическое описание. То же самое относится к случаю нескольких вторичных сетей. Следует также подчеркнуть, что при фиксации множества $ЦРУ1$ задача совместного синтеза первичной и вторичной сети распадается на две самостоятельные задачи:

- 1) синтез первичной сети;
- 2) синтез вторичной сети.

Поэтому в дальнейшем в качестве основной формулировки задачи синтеза рассматривается данная здесь формулировка для случая одной первичной сети.

§ 5.3. Переход к задаче динамического программирования

Исходя из аналогии структурных свойств схем ЭЭС и электросетей, являющихся, по сути, более детальным описанием ЭЭС, **МОЖНО** предположить, что преобразование задачи синтеза к задачам динамического программирования и здесь окажется полезным при разработке алгоритмов синтеза. Выражения (5.2)—(5.15) показывают, что процесс выбора искомым решений задачи принципиально является двухэтапным (двухшаговым) процессом. Действительно, для определения Φ по уравнению (5.2) с учетом (5.6)—(5.13) надо сначала выбрать множества узловых точек $ЦРУ1, РУ1, РК1$ (первый этап), а затем осуществить выбор длин соединений между узловыми точками сети (второй этап). Другими словами, задача совместного выбора узловых точек сети и линий соединений между ними разбивается на две взаимосвязанные и последовательно решаемые подзадачи:

- 1) выбора узловых точек;
- 2) выбора линий соединений между узловыми точками.

Размерность подзадач указанного типа можно сократить, если эти подзадачи решать так же поэтапно для отдельных участков сети. С этой целью, учитывая (5.1), (5.2) и (5.6)—(5.13), а также заданные множества $\mathbf{D}_{И1}$, $\mathbf{D}_{П1}$, целевую функцию Φ можно представить в виде суммы следующих функций:

$$\Phi = \Phi_{ЦРУ1}^{И1}(L_i^{И1}, L_i^p, \mathbf{D}_{ЦРУ1}) + \Phi_{РУ1}^{ЦРУ1}(L_j^{ЦРУ1}, L_j^p, \mathbf{D}_{ЦРУ1}, \mathbf{D}_{РУ1}) + \Phi_{РК1}^{РУ1}(L_m^{РУ1}, L_m^p, \mathbf{D}_{РУ1}, \mathbf{D}_{РК1}) + \Phi_{П1}^{РК1}(L_n^{РК1}, L_n^p, \mathbf{D}_{РК1}). \quad (5.17)$$

При фиксированных $\mathbf{D}_{ЦРУ1}$, $\mathbf{D}_{РУ1}$, $\mathbf{D}_{РК1}$ составляющие (5.17) становятся независимыми друг от друга и могут минимизироваться (максимизироваться) каждая в отдельности по допустимым вариациям длин соединений на соответствующих участках сети. Однако результат минимизации будет зависеть от фиксированных множеств узловых точек на границах каждого участка. Следовательно, для каждой составляющей (5.17) можно записать:

$$\min \Phi_{ЦРУ1}^{И1} = \min_{L_i^{И1}} \min_{L_i^p} \Phi_{ЦРУ1}^{И1}(L_i^{И1}, L_i^p, \mathbf{D}_{ЦРУ1}) = \lambda_{ЦРУ1}^{И1}(\mathbf{D}_{ЦРУ1}); \quad (5.18)$$

$$\min \Phi_{РУ1}^{ЦРУ1} = \min_{L_j^{ЦРУ1}} \min_{L_j^p} \Phi_{РУ1}^{ЦРУ1}(L_j^{ЦРУ1}, L_j^p, \mathbf{D}_{ЦРУ1}, \mathbf{D}_{РУ1}) = \lambda_{РУ1}^{ЦРУ1}(\mathbf{D}_{ЦРУ1}, \mathbf{D}_{РУ1}); \quad (5.19)$$

$$\min \Phi_{РК1}^{РУ1} = \min_{L_m^{РУ1}} \min_{L_m^p} \Phi_{РК1}^{РУ1}(L_m^{РУ1}, L_m^p, \mathbf{D}_{РУ1}, \mathbf{D}_{РК1}) = \lambda_{РК1}^{РУ1}(\mathbf{D}_{РУ1}, \mathbf{D}_{РК1}); \quad (5.20)$$

$$\min \Phi_{П1}^{РК1} = \min_{L_n^{РК1}} \min_{L_n^p} \Phi_{П1}^{РК1}(L_n^{РК1}, L_n^p, \mathbf{D}_{РК1}) = \lambda_{П1}^{РК1}(\mathbf{D}_{РК1}), \quad (5.21)$$

а минимум функции Φ будет

$$\min \Phi = \min_{\mathbf{D}_{ЦРУ1}} \min_{\mathbf{D}_{РУ1}} \min_{\mathbf{D}_{РК1}} [\lambda_{ЦРУ1}^{И1}(\mathbf{D}_{ЦРУ1}) + \lambda_{РУ1}^{ЦРУ1}(\mathbf{D}_{ЦРУ1}, \mathbf{D}_{РУ1}) + \lambda_{РК1}^{РУ1}(\mathbf{D}_{РУ1}, \mathbf{D}_{РК1}) + \lambda_{П1}^{РК1}(\mathbf{D}_{РК1})]. \quad (5.22)$$

Теперь допустим, что выбор $\mathbf{D}_{ЦРУ1}$, $\mathbf{D}_{РУ1}$, $\mathbf{D}_{РК1}$, минимизирующих Φ , производится не одновременно, а поэтапно (шаг за шагом). Сначала выбирается $\mathbf{D}_{ЦРУ1}$ (первый этап), затем $\mathbf{D}_{РУ1}$ (второй этап) и, наконец, $\mathbf{D}_{РК1}$ (третий этап). Тогда выражение (5.22) примет следующий вид:

$$\min_{\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}} \Phi = \min_{\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}} \left\{ \lambda_{\text{ЦПУ1}}^{\text{И1}} (\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}) + \min_{\mathbf{D}_{\text{РУ1}}} \left[\lambda_{\text{РУ1}}^{\text{ЦПУ1}} (\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}, \mathbf{D}_{\text{РУ1}}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \min_{\mathbf{D}_{\text{ПК1}}} (\lambda_{\text{ПК1}}^{\text{РУ1}} (\mathbf{D}_{\text{РУ1}}, \mathbf{D}_{\text{ПК1}}) + \lambda_{\text{П1}}^{\text{ПК1}} (\mathbf{D}_{\text{ПК1}})) \right] \right\}. \quad (5.23)$$

Выражение (5.23) относится к классу функциональных уравнений Р. Беллмана, на основе которых построена теория динамического программирования. Используя терминологию динамического программирования, введем следующие обозначения:

$$\min_{\mathbf{D}_{\text{ПК1}}} (\lambda_{\text{ПК1}}^{\text{РУ1}} (\mathbf{D}_{\text{РУ1}}, \mathbf{D}_{\text{ПК1}}) + \lambda_{\text{П1}}^{\text{ПК1}} (\mathbf{D}_{\text{ПК1}})) = Q_1 (\mathbf{D}_{\text{РУ1}}); \quad (5.24)$$

$$\min_{\mathbf{D}_{\text{РУ1}}} [\lambda_{\text{РУ1}}^{\text{ЦПУ1}} (\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}, \mathbf{D}_{\text{РУ1}}) + Q_1 (\mathbf{D}_{\text{РУ1}})] = Q_2 (\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}); \quad (5.25)$$

$$\min_{\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}} \{ \lambda_{\text{ЦПУ1}}^{\text{И1}} (\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}) + Q_2 (\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}) \} = Q_3 = \min \Phi. \quad (5.26)$$

Уравнение (5.24) представляет результат минимизации на одном, третьем, этапе, когда фиксированы $\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}$, $\mathbf{D}_{\text{РУ1}}$ и варьируется $\mathbf{D}_{\text{ПК1}}$. Уравнение (5.25) представляет совместный результат двух последних этапов (второго и третьего), когда фиксировано $\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}$ и последовательно варьируются $\mathbf{D}_{\text{РУ1}}$ и $\mathbf{D}_{\text{ПК1}}$. Наконец, уравнение (5.26) — результат, полученный на всех трех этапах путем последовательной вариации $\mathbf{D}_{\text{ЦПУ1}}$, $\mathbf{D}_{\text{РУ1}}$ и $\mathbf{D}_{\text{ПК1}}$. Количество этапов в (5.24)—(5.26) указывается индексами при Q . Как видно, Q_1 и Q_2 представляют зависимые, промежуточные результаты минимизации, а Q_3 — окончательный результат минимизации, зависящий только от заданных, исходных условий задачи синтеза.

Таким образом, благодаря принципу динамического программирования удалось разбить очень сложную, многомерную задачу топологического синтеза сетей на две группы более простых подзадач, представленных соответственно выражениями (5.18)—(5.21) и (5.24)—(5.26). Взаимная связь этих подзадач легко устанавливается с помощью структурной схемы (рис. 5.5), построенной на основании следующих предпосылок:

- функции типа λ и Q графически представляются в виде блочных функциональных преобразователей с соответствующими входами и выходами;
- на вход функциональных преобразователей подаются варьируемые аргументы минимизируемых выходных функций;

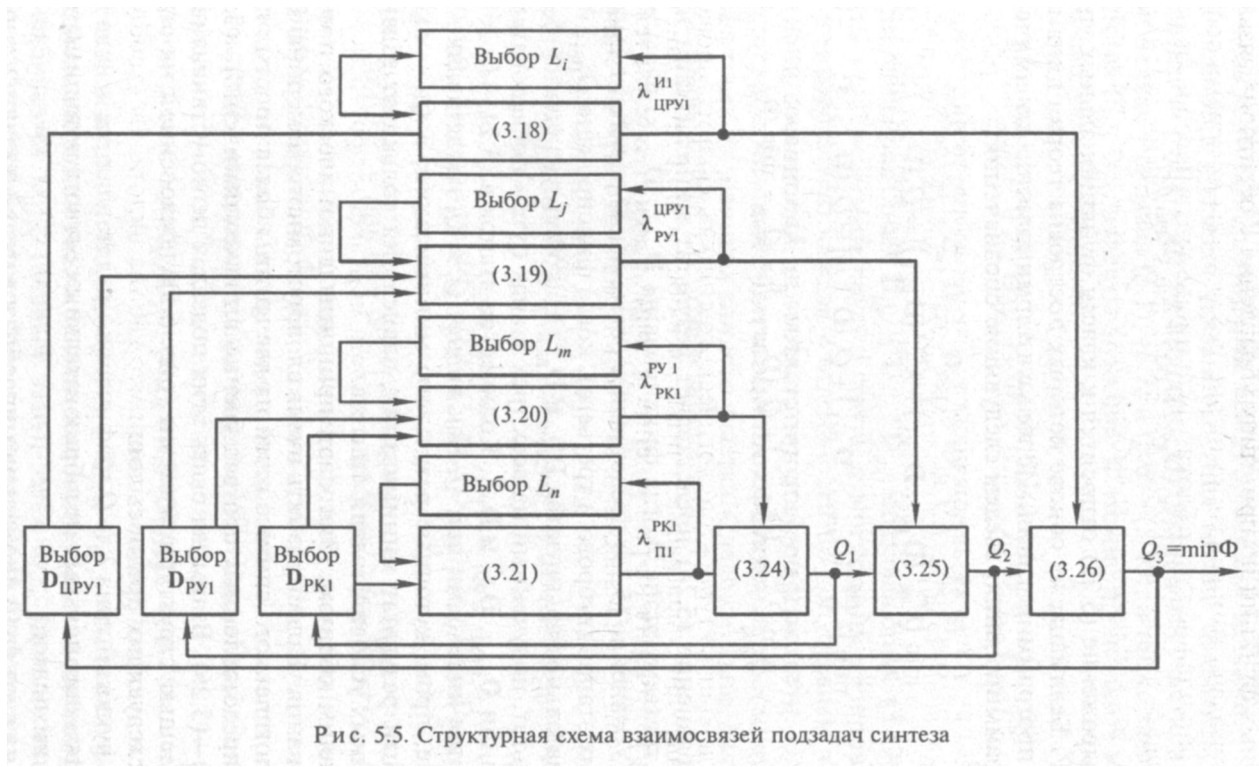


Рис. 5.5. Структурная схема взаимосвязей подзадач синтеза

- вариации входов осуществляются в направлении минимизации выходных функций по принципу управления с обратной связью.

Подзадачи минимизации на рис. 5.5 указаны номерами соответствующих уравнений в блоках функциональных преобразователей. Подзадачи выбора варьируемых аргументов выделены в отдельные блоки, так как процедуры выбора могут существенно отличаться от процедур решения подзадач минимизации. Наличие прямых связей в структурной схеме обусловлено разбиением исходной задачи на рассмотренные подзадачи. В целом структурная схема на рис. 5.5 позволяет наглядно выделить весь перечень подзадач, решаемых автономно, но в указанной последовательности в процессе топологического синтеза. Аналогичным образом подход динамического программирования можно использовать и для более сложных случаев с одной или несколькими вторичными сетями.

§ 5.4. Геометрическое моделирование топологии пространства

Задача структурно-топологического синтеза, сформулированная в предыдущих параграфах, учитывает в общем виде пространственные ограничения на размещение узловых точек и соединительных линий **сети**. При решении практических задач эти ограничения должны быть конкретизированы применительно к монтажному пространству, в котором размещается ЭЭС в целом. Таким образом, для решения задач структурно-топологического синтеза электросетей требуется осуществить *геометрическое моделирование* монтажного пространства для различных классов объектов, на которых размещается ЭЭС. Под монтажным пространством понимается часть пространства, за пределами которой не может быть размещен ни один элемент ЭЭС. Например, для самолета монтажное пространство ограничено поверхностями фюзеляжа, крыльев и хвостового оперения и т. п. Подобные ограничения пространства носят наиболее общий характер. Кроме общих ограничений, в зависимости от специфики объекта, имеется ряд более частных ограничений, выделяющих внутри монтажного пространства те или иные зоны (области), где допускается размещение отдельных видов электрооборудования и электропроводки, например кабина пилота, электроотсеки, ЦРУ, кухня и т. п.

Для взаимной увязки общих и частных пространственных ограничений целесообразно построить иерархическую систему геометрических моделей (ГМ), в которой на верхних уровнях располагаются общие модели, а на нижних уровнях — подчиненные или час-



Рис. 5.6. Пример системы ГМ самолета

тные модели. В качестве примера на рис. 5.6 приведена система взаимосвязанных ГМ самолета, в которой разбиение монтажного пространства на отдельные области (зоны) ограничено двумя нижними уровнями, но при необходимости может быть продолжено дальше вплоть до детального геометрического описания каждого конструктивного элемента.

Задача геометрического моделирования ограниченного пространства независимо от ее места в системе ГМ может быть поставлена по-разному, исходя из имеющейся исходной информации. В простейшем случае, когда монтажное пространство задано в полном объеме в реальности или в проектной документации, задача геометрического моделирования сводится к аппроксимации ограничительных поверхностей и линий с точностью, достаточной для проектирования электросетей. Однако в большинстве практических случаев проектирование электросетей осуществляется одновременно с проектированием объектов, на которых эти сети размещаются. В этих случаях вместо реального объекта приходится довольствоваться его геометрическими моделями или физическими макетами различной степени детализации. Точность ГМ объекта возрастает по мере продвижения в разработке проекта. Наиболее приближенные модели создаются и используются на стадии эскизного проекта и наиболее точные — на стадии рабочего проекта и испытаний. Соответственно этому будет меняться точность решения задач структурно-топологического синтеза электросетей.

Рассматриваемая в данной главе задача синтеза электросетей носит глобальный характер и характерна для начальных стадий проектирования ЭЭС, когда необходимо хотя бы ориентировочно определить количество и места размещения ЦРУ, РУ и РК, а также их

соединения с источниками и потребителями. Для этих целей можно воспользоваться приближенными ГМ объекта и его составных частей, которые создаются проектировщиками самих объектов. В последующем данные по размещению распределительных пунктов и соединительных линий будут уточнены на ГМ или физическом макете объекта с реальной конфигурацией. Созданию ГМ высокой точности, реализуемых на ЭВМ, т. е. так называемых электронных геометрических макетов, придается большое значение, так как электронные макеты позволяют исключить из процесса проектирования дорогостоящий этап физического макетирования и существенно сократить сроки проектирования.

Возможности геометрического моделирования объектов на ЭВМ и их использования для топологического синтеза электросетей рассмотрим на примере самолетов, являющихся одними из самых сложных объектов проектирования. Обычно на начальных этапах проектирования пользуются так называемыми обводными (контурными) чертежами самолета (рис. 5.7). По существу это три проекции, с помощью которых традиционно изображается на чертежах любой трехмерный объект. В дополнение к указанным проекциям чертежник нередко дает аксонометрическое изображение (перспективу) под произвольным углом наклона оси симметрии (см. рис. 5.7). Проекции изображаемого объекта на три взаимно перпендикулярные плоскости можно строить не только за кульманом, но и на экране графического дисплея в системе машинной графики. Пользуясь средствами машинной графики, конструктор может рисовать точки,

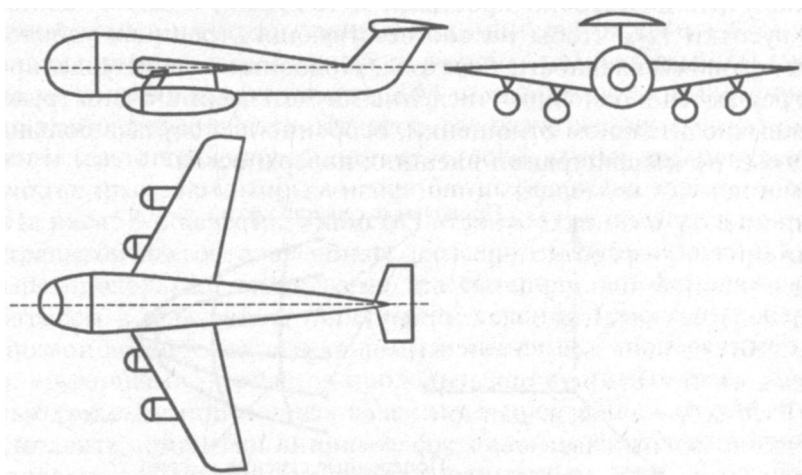


Рис. 5.7. Четырехмоторный самолет в трех проекциях

отрезки прямых линий, окружности и дуги окружностей, иные элементарные кривые. С помощью точки и элементарных линий строятся контурные линии обводных чертежей, причем, несмотря на плоский характер изображений, данные о точках и элементарных линиях в ЭВМ являются трехмерными. Точка представляется, например, тремя координатами x, y, z в ортогональной системе координат, а отрезок прямой линии — тремя проекциями $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.

Используя точки и элементарные линии, можно с высокой точностью аппроксимации построить контурные проекции самолета на ЭВМ. Построение аксонометрических изображений достигается при этом умножением векторов координат на соответствующие матрицы поворота. В целом три контурные проекции составляют каркас, на который должна быть натянута внешняя поверхность самолета, ограничивающая монтажное пространство для размещения любого оборудования и в том числе ЭЭС. Требования к точности моделирования внешних поверхностей у проектировщиков самолетов и проектировщиков электросетей резко отличаются. Проектировщики самолетов стремятся к получению гладких, обтекаемых поверхностей, обладающих высокими аэродинамическими свойствами, что связано с достаточно тонкими и трудоемкими операциями. Например, для повышения точности аппроксимации внешней поверхности строят ряд продольных и поперечных сечений (рис. 5.8). Таким образом, контурный каркас принимает сетчатую структуру с элементарными ячейками (кусочками) в виде криволинейных четырехугольников. Уравнения гладких поверхностей на таких кусочках можно получить достаточно простыми и точными, а затем «сшивать» эти кусочки так, чтобы на соответствующих границах удовлетворить условиям плавности перехода. Подобные задачи моделирования решаются в основном численными методами и очень трудоемки в вычислительном отношении, особенно для случаев больших и сложных по конфигурации внешних поверхностей.

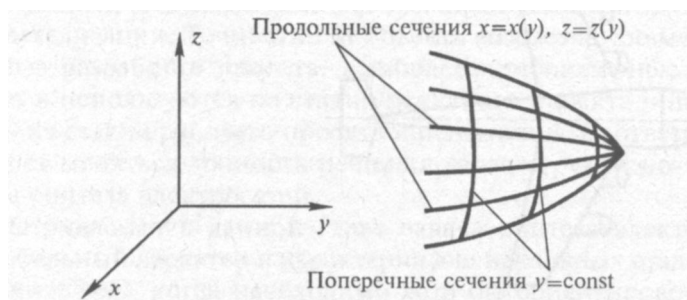


Рис. 5.8. Линии продольных и поперечных сечений фюзеляжа

Проектировщикам электросетей и ЭЭС подобная точность геометрического моделирования не нужна, особенно на этапе синтеза топологической структуры сети. Действительно, принятой ранее структурно-топологической модели сети в виде совокупности узловых точек и линий соединений между ними присущи серьезные погрешности, обусловленные пренебрежением геометрической конфигурацией электрооборудования (источников, потребителей, распределительных пунктов). Поэтому ГМ монтажного пространства следует привести в соответствие с формой структурно-топологических моделей сети, т. е. для отображения ГМ также использовать лишь понятия пространственных точек и линий. С этой целью любое ограниченное пространство для монтажа ЭЭС можно представить дискретным конечным множеством точек в трехмерном пространстве, в котором допускаются размещения узловых точек сети, и аналогичным множеством линий, по которым допустима прокладка сетевых линий. Интересно отметить, что при таком подходе необходимость в построении контурных (внешних) поверхностей отпадает вообще. Для проверки принадлежности трехмерной точки или линии допустимому пространству достаточно проанализировать проекции точек и линий на координатные плоскости. Если все эти проекции вписываются изнутри в соответствующие контурные проекции самолета, то эти точки и линии являются допустимыми.

Учитывая изложенное, возьмем за основу ГМ монтажного пространства обводные (контурные) проекции самолета. Эти проекции, как правило, задаются проектировщиками самолетов. Проектировщик электросети может довольствоваться контурными линиями, составленными из отрезков прямых линий, дуг окружностей и других элементарных геометрических форм. С помощью линий аналогичного типа можно усложнять ГМ самолета путем выделения на контурных проекциях тех областей, где размещается электрооборудование (пилотская кабина, электроотсеки, кухня, лифты и т. п.), а также тех трасс, по которым может быть проложена электропроводка. На рис. 5.9 в качестве примера выделены три области в носовой, центральной и хвостовой частях фюзеляжа и пунктиром показаны четыре продольные допустимые трассы вдоль оси фюзеляжа и по две трассы в крыльях. В поперечном сечении (рис. 5.9) показаны сплошной линией пол, пунктирными линиями — поперечные трассы и кружочками — сечения продольных допустимых трасс. Допустимые трассы в поперечных сечениях в простейшем случае можно представить ломаными линиями, состоящими из отрезков прямых, параллельных соответствующим координатным осям, и дуг окружности, являющейся внешним контуром проекции самолета. Воз-

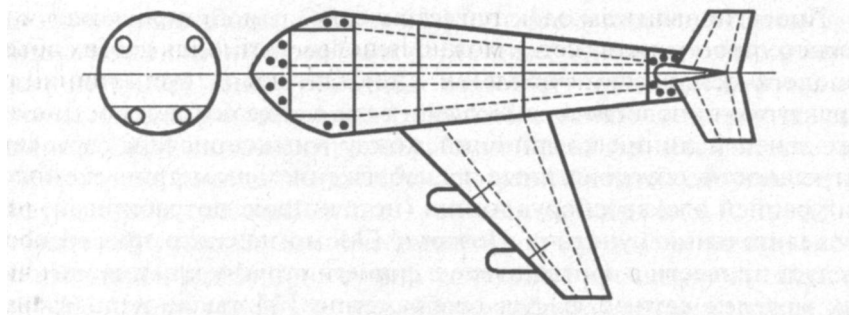


Рис. 5.9. Допустимые точки размещения и трассировочные линии (пунктир)

можны и другие, более сложные правила построения допустимых трасс, если задана дополнительная информация о геометрической конфигурации электроотсеков самолета и способах крепления электрооборудования (на стеллажах, на потолке, на стенах и т. п.).

Построенная таким образом ГМ самолета дает возможность указать пространственными точками заданные места размещения источников и **потребителей**. По аналогии с источниками и потребителями моделируются и распределительные пункты, но уже не одной однозначно определенной точкой в пространстве координат x , y , z , а конечным множеством точек, так или иначе распределенных в допустимых областях, где имеется вероятность размещения ЦРУ, РУ и РК. На этих множествах точек осуществляется в процессе синтеза однозначный выбор ЦРУ, РУ и РК. В простейшем случае точки допустимых множеств равномерно распределяются в допустимом пространстве, а расстояния между этими точками выбираются с учетом погрешности топологической модели сети, т. е. не менее чем соответствующие габаритные размеры ЦРУ, РУ и РК. Множество возможных точек размещения ЦРУ, РУ и РК определяет **соответствующее** множество вариантов соединения этих точек между собой с помощью ломаных линий. Каждая ломаная линия образуется из отрезков элементарных линий, соответствующих допустимым трассам на каждом участке ГМ самолета, а длина ломаной линии рассчитывается по известным формулам. Если ломаная линия проходит по нескольким сечениям одной и той же проекции ГМ самолета, то с помощью многослойного изображения на экране графического дисплея все эти сечения можно построить одновременно. В процессе структурно-топологического синтеза сети однозначно определяются как координаты точек размещения ЦРУ, РУ и РК, так и координаты точек излома линий соединений сети.

Аналогичный подход к геометрическому моделированию монтажного пространства сетей можно использовать и для других объектов (сооружений, автомобилей и т. п.). Однако следует лишь раз подчеркнуть, что такой приближенный подход приемлем для начальных стадий проектирования, когда выбирается структура сети. На конечных стадиях, когда требуется уточнение длин проводов, выбор марки и сечения проводов и т. д., без достаточно точной геометрической конфигурации монтажного пространства не обойтись. В этих случаях необходимо прибегать или к трудоемким численным методам моделирования сложных трехмерных поверхностей, или к традиционному физическому макетированию монтажного пространства.

§ 5.5. Вычислительные алгоритмы синтеза

В соответствии с вычислительной схемой динамического программирования (см. рис. 5.5) задача структурно-топологического синтеза сети разбивается на ряд взаимосвязанных подзадач, которые в содержательном плане можно разделить на две группы:

- 1) подзадача выбора числа и точек размещения ЦРУ, РУ и РК;
- 2) подзадачи минимизации Φ по длинам соединений между узловыми точками.

Рассмотрим сначала каждую группу подзадач в отдельности.

1. Выбор $N_{\text{ЦРУ1}}$ и $D_{\text{ЦРУ1}}$ на заданном множестве дискретных точек, ограниченном ГМ объектов или его отдельных зон, где допускается размещение ЦРУ, представляет в общем случае достаточно объемную задачу дискретного программирования, которая также решается в два последовательных этапа. На первом этапе выбирается $N_{\text{ЦРУ1}}$, на втором этапе — $D_{\text{ЦРУ1}}$. Число вариантов выбора $N_{\text{ЦРУ1}}$ и $D_{\text{ЦРУ1}}$, как правило, очень большое, так как $N_{\text{ЦРУ1}}$ много меньше количества допустимых дискретных точек. Чтобы резко уменьшить количество вариантов выбора, надо использовать в каждом конкретном случае как можно больше известных ограничений функционального характера. Например, известно, что на практике количество ЦРУ1 не превышает число источников первичной электроэнергии. И вообще допускаемые вариации $N_{\text{ЦРУ1}}$ невелики и зависят от таких структурных особенностей СЭС, как возможность параллельной работы источников, способов резервирования и т. п. Например, для СЭС с децентрализованным способом питания и без параллельной работы генераторов число ЦРУ1 равно числу генераторов. Кроме того, известно, что регулирование напряжения источников в СЭС осуществляется по величине напряжения, изме-

ряемого на шипах ЦРУ. Чтобы уменьшить падение напряжения на линиях, соединяющих источники с шинами ЦРУ, стремятся расположить ЦРУ по возможности ближе к источникам. Если также учесть, что первичные источники СЭС приводятся во вращение от авиационных двигателей, расположенных в крыльях, то легко понять, что множество дискретных точек, допустимых для размещения ЦРУ₁, ограничивается заданными в центральном отсеке точками, расположенными вблизи выхода допустимых трасс крыльев в центральный отсек. Таким образом, число вариантов $N_{\text{ЦРУ1}}$ и $D_{\text{ЦРУ1}}$ практически мало, и эти варианты во многих случаях могут задаваться проектировщиком априори либо устанавливаться методом полного перебора.

Вариации $N_{\text{РК1}}$ и $D_{\text{РК1}}$ также сильно ограничены. Например, группы потребителей СЭС, входящих в одну и ту же функциональную схему систем автоматики, во многих случаях должны питаться от одной РК. Иногда допускается питание нескольких однородных схем (групп потребителей) от одной РК. Исходя из подобных соображений проектировщик СЭС заранее устанавливает $N_{\text{РК1}}$ и его вариации. Что касается выбора $D_{\text{РК1}}$, то предварительно это делается так, чтобы минимизировать расстояния РК от всех его потребителей. С этой целью по аналогии с центром тяжести системы материальных точек можно предложить расчетные формулы

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{РК}} &= \frac{\sum l_{\text{п}} x_{\text{п}}}{\sum l_{\text{п}}}; \\ y_{\text{РК}} &= \frac{\sum l_{\text{п}} y_{\text{п}}}{\sum l_{\text{п}}}; \\ z_{\text{РК}} &= \frac{\sum l_{\text{п}} z_{\text{п}}}{\sum l_{\text{п}}}, \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

где $x_{\text{РК}}, y_{\text{РК}}, z_{\text{РК}}$ — координаты точки размещения РК; $x_{\text{п}}, y_{\text{п}}, z_{\text{п}}$ — координаты точек размещения потребителей; $l_{\text{п}}$ — длины соединений потребителей с РК.

Определенные по (5.27) координаты РК (центра геометрического притяжения своих потребителей) должны быть уточнены с учетом ограничений ГМ путем округления до координат ближайших допустимых дискретных точек ГМ. В последующем возможны вариации размещения РК на локальном множестве ближайших допустимых дискретных точек.

Наибольшая свобода в выборе числа и точек размещения имеется в отношении РУ. Чтобы как-то ограничить множество вариантов выбора РУ хотя бы сверху, можно решить следующую сравнительно простую задачу: от всех РК и потребителей, не прикрепленных к РК, провести линии с минимальными значениями целевой функции Φ до ЦРУ при выполнении всех ограничений по ГМ, заданным трассам и допустимым дискретным точкам. Анализ топологической картины совокупности проекций этих линий на соответствующих проекциях ГМ дает возможность проектировщику исключить из дальнейшего рассмотрения допустимые области (их участки) ГМ, по которым соединительные линии не проходят. Кроме того, картина сгущений и совпадений линий и их отрезков на отдельных участках позволит осуществить предварительный выбор $N_{РУ} - D_{РУ}$. В последующем выбранные решения могут уточняться путем локальных вариаций вокруг $N_{РУ}$ и $D_{РУ}$.

Обобщая изложенное, можно сказать, что задачи выбора $N_{ЦРУ}$, $N_{РУ}$, $N_{РК}$ и $D_{ЦРУ}$, $D_{РУ}$, $D_{РК}$ могут решаться как формальными (методы перебора, статистических испытаний и др.), так и неформальными методами с привлечением значений, опыта и интуиции проектировщика. Выбор того или иного метода диктуется конкретным содержанием задачи синтеза и квалификацией проектировщика электросети. Наиболее рациональным является комбинированный подход, когда предварительные решения предлагаются проектировщиком, а затем в процессе синтеза сети уточняются с помощью формальных методов.

2. Подзадача второго типа (минимизация Φ по длинам соединений между фиксированными узловыми точками сети при удовлетворении ограничениями ГМ) также относится к задачам дискретного программирования и может решаться различными методами перебора, динамического программирования, ветвей и границ и т. п. Эта группа задач более формализуема, так как вариации линий соединений по допустимым трассам достаточно ограничены. Поэтому во многих случаях можно реализовать полный перебор допустимых вариантов и путем сравнительного анализа выбрать оптимальную линию соединения с минимальным значением Φ . Задачи этой группы решаются многократно на всех этапах синтеза сети (см. рис. 5.5). В связи с этим не исключена вероятность повторений решений для одной и той же пары узловых точек. Чтобы исключить повторные решения и сократить время синтеза сети в целом, можно до начала процесса синтеза предварительно решить эти задачи для всех допустимых пар узловых точек и построить двумерную матрицу (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Номер узловых точек	1	2	3
1	0	$\Phi_{12}(L)$	$\Phi_{13}(L)$
2	$\Phi_{21}(L)$	0	$\Phi_{23}(L)$
3	$\Phi_{31}(L)$	$\Phi_{32}(L)$	0

Эта квадратичная симметричная ($\Phi_{12} = \Phi_{21}$, $\Phi_{13} = \Phi_{31}$, ...) матрица дает возможность пользоваться готовыми результатами при многократном решении задач (5.18)—(5.21) на рис. 5.5.

Учитывая изложенное и базирясь на вычислительной схеме динамического программирования (см. рис. 5.5), можно предложить *вычислительный алгоритм структурно-топологического синтеза сетей*, приведенный на рис. 5.10. Каждый шаг алгоритма представляет достаточно автономную вычислительную процедуру, которая может выполняться, как уже указывалось, различными формальными и неформальными способами. Первые семь шагов в совокупности представляют подготовительную часть алгоритма, которая занимается предварительной обработкой исходных данных с учетом конкретной специфики объекта синтеза. Последующие шаги с 8-го по 20-й включительно осуществляют непосредственно синтез. После этого может выполняться дополнительная обработка полученных результатов, например построение графиков нагрузки РУ и ЦРУ. На каждом шаге алгоритма предоставлена относительная свобода выбора конкретных логических и счетных процедур. Конкретизацию этих процедур формальными и неформальными способами целесообразно выполнять для конкретных типов сетей с учетом их специфики, а также особенностей монтажного пространства.

§ 5.6. Синтез самолетных электросетей

Рассмотрим процесс синтеза в соответствии с алгоритмом на рис. 5.10. Геометрическое моделирование (**1-й шаг**) начнем с построения обводных чертежей самолета в трех проекциях. В качестве примера построим проекцию «вид сверху» для фюзеляжа (рис. 5.11). Для этого координату крайней левой точки **1-го** шпангоута совместим с началом координат, а продольную ось фюзеляжа — с осью x . Перпендикулярно оси x проведем пунктиром оси шпангоутов на расстоянии Δ (ширина шпангоута) друг от друга. Расстояние между началом координат и осью **1-го** шпангоута $\Delta/2$. Таким образом,

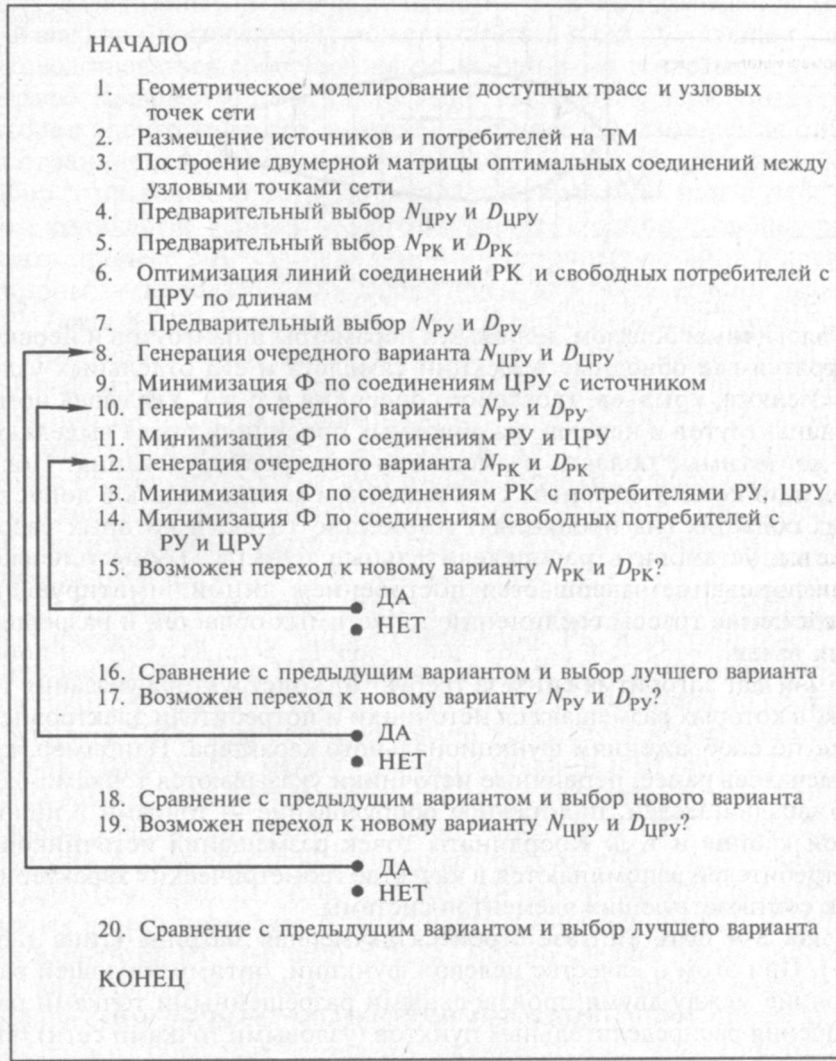


Рис. 5.10. Вычислительный алгоритм синтеза электросети

длина фюзеляжа наращивается пропорционально числу шпангоутов. Далее точка 0 соединяется прямыми линиями с крайними точками оси 1-го шпангоута, крайние точки оси 1-го шпангоута — с крайними точками оси 2-го шпангоута и так до тех пор, пока не закончится построение обводной проекции фюзеляжа. Эта процедура легко реализуется на компьютерах с графическим дисплеем.

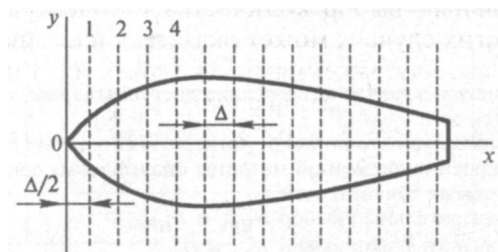


Рис. 5.11. Вид сверху для фюзеляжа

Аналогичным образом, используя параметры шпангоутов и нервюр, строятся все обводные проекции самолета и его отдельных узлов (фюзеляжа, крыльев, хвостового оперения и т. п.). Указывая номера шпангоутов и нервюр, на обводных проекциях также выделяются допустимые области размещения электрооборудования. После этого по конструктивным соображениям можно задать в допустимых областях (на проекциях) множество точек, в которых разрешается установить распределительные пункты. Геометрическое моделирование завершается построением линий, имитирующих разрешение трассы соединений допустимых областей и разрешенных точек.

2-й шаг алгоритма синтеза требует от конструктора указания точек, в которых размещаются источники и потребители электроэнергии, по соображениям функционального характера. Например, как отмечалось ранее, первичные источники указываются точками около авиадвигателей, пилотажное оборудование — точками в пилотской кабине и т. д. Координаты точек размещения источников и потребителей запоминаются в качестве геометрических характеристик соответствующих элементов системы.

На **3-м шаге** синтеза строится двумерная матрица (типа табл. 5.1). При этом в качестве целевой функции, оптимизирующей расстояние между двумя произвольными разрешенными точками размещения распределительных пунктов (узловыми точками сети), выбирается непосредственно расстояние между этими точками. В результате построение таблицы сводится к выбору таких линий соединений между узловыми точками, которые минимизируют расстояние между этими точками. Для сокращения трудоемкости построения можно использовать ряд специфических соображений. Например, если две узловые точки находятся в соседних допустимых областях, то линия соединения строится в два этапа:

- 1) выход из области на трассу между двумя областями;
- 2) объединение их в областях и между ними.

Предварительный выбор количества и точек размещения ЦРУ (**4-й шаг**) во многих случаях может оказаться и окончательным, если руководствоваться соображениями, указанными в предыдущем параграфе. Количество ЦРУ, как правило, равно числу первичных генераторов электроэнергии, а вариации точек их размещения сильно ограничены. Поэтому в дальнейшем будем предполагать, что набор этих точек конструктор задает однозначно или в небольшом количестве вариантов. Это позволит, с одной стороны, связать процесс синтеза первичной и вторичных сетей, а с другой стороны — использовать в дальнейшем для оптимизации выбора ЦРУ (**шаги 8—19**) простейший метод полного перебора вариантов.

Предварительный выбор количества и точек размещения РК (**5-й шаг**) целесообразно сделать однозначно, так как количество РК, особенно на больших пассажирских лайнерах, достаточно велико. Для однозначного задания набора РК или нескольких вариантов набора РК конструктору следует руководствоваться формулами (5.27) и имеющимися функциональными соображениями. Это позволит при оптимизации выбора РК (**шаги 12—15**) в дальнейшем также применить метод полного перебора вариантов.

На **6-м шаге** алгоритма синтеза решается задача построения топологической картины линий соединения РК и потребителей, не привязанных к РК, с ЦРУ таким образом, чтобы минимизировать расстояние от каждого РК или свободного потребителя до соответствующего ЦРУ. Для решения задачи используется матрица минимальных расстояний между узловыми точками (см. табл. 5.1). Если точка размещения потребителя или РК не совпадает с разрешенной узловой точкой, то линия ее присоединения к ЦРУ строится по аналогии с линиями наикратчайшего расстояния между узловыми точками (см. табл. 5.1). Анализ топологической картины рассматриваемых линий позволяет осуществлять выбор одного или нескольких вариантов РУ (**7-й шаг**). Анализ можно сделать двумя способами: визуальным и формализованным. При визуальном анализе на графическом дисплее наблюдаются проекции линий присоединения на всех обводных чертежах, исключаются из дальнейшего рассмотрения неиспользованные, разрешенные узловые точки, а в качестве наиболее вероятных точек размещения РУ выбираются точки, через которые проходит наибольшее количество линий присоединения. Формализованный способ анализа требует обследования всех разрешенных узловых точек. С этой целью для каждой узловой точки следует предусмотреть счетчик, который считает количество линий присоединения, проходящих через данную точку. Анализ точек вероятного размещения РУ позволяет установить один или несколько

вариантов выбора РУ и в дальнейшем использовать полный перебор вариантов с целью определения наилучшего.

Таким образом, генерация вариантов ЦРУ, РУ и РК и переход от одного варианта к другому (**шаги 8, 10, 12, 15, 17, 19**) выполняются по классической схеме полного перебора. Оптимизация соединений каждого ЦРУ с источниками (**9-й шаг**) выполняется с помощью решения задачи: минимизировать суммарную длину соединений ЦРУ с источниками при заданном по надежности числе резервных каналов питания ЦРУ и источников. С учетом небольшого числа ЦРУ и источников задача также решается методом перебора. Оптимизация соединений РУ с ЦРУ (**11-й шаг**) выполняется в результате решения задачи: минимизировать суммарную длину линий соединений РУ с ЦРУ и источниками при заданном по надежности числе каналов и схеме резервного питания РУ, а также заданных точках размещения РУ, ЦРУ и источников. При небольшом числе РУ, ЦРУ и источников для решения применяется метод перебора. Оптимизация присоединений РК и свободных потребителей к РУ или ЦРУ (**шаги 13, 14**) достигается решением задачи: минимизировать суммарную длину линий соединений РК или свободного потребителя с РУ (ЦРУ) и источниками при заданных точках размещения потребителей, РК, РУ, ЦРУ и источников и заданных соединениях РК с потребителями. Для каждого РК и свободного потребителя задача решается методом перебора.

В результате решения указанных локальных задач оптимизации получается решение глобальной задачи топологического синтеза электрической сети по критерию наикратчайшей (минимальной) суммарной длины всех линий соединений. Такой алгоритм синтеза использован при проектировании электроэнергетических систем пассажирских широкофюзеляжных самолетов. Полученные результаты подтверждают целесообразность размещения ЦРУ в центральных отсеках фюзеляжа у выходов электротрасс крыльев в фюзеляж, а также выбора и размещения нескольких (одного, двух) периферийных РУ в носовых и хвостовых электроотсеках фюзеляжа. Кроме того, оптимизация выбора и размещения ЦРУ, РУ и РК позволяет уменьшить массу электросети на **10...20%** по сравнению с результатами традиционного проектирования методом проб и ошибок.

§ 5.7. Синтез кабельных связей систем автоматики

Специфика данной задачи синтеза заключается в том, что для многих крупных объектов типа самолета системы автоматики относятся к числу вторичных систем, проектируемых смежниками. В

результате задача синтеза делится на две самостоятельно решаемые подзадачи:

- 1) синтез принципиальных схем;
- 2) синтез кабельных соединений.

Задача синтеза принципиальных схем систем автоматики решается смежниками, т. е. элементный состав системы автоматики и принципиальные связи между ними считаются известными при решении второй задачи — задачи размещения элементов и кабельных связей между ними в заданном монтажном пространстве с учетом заданных ограничений. Именно эта задача рассматривается в данном примере. Выбор геометрической модели монтажного пространства зависит от объекта, на котором размещается система автоматики, а размещение элементов системы определяется в большинстве случаев функциональными свойствами системы и ее элементов. Поэтому в дальнейшем будем предполагать, что геометрическая модель монтажного пространства, размещения элементов и допустимые трассы для раскладки кабельных связей являются известными.

Таким образом, рассматриваемая задача синтеза сводится к оптимальному выбору кабельных связей по заданному *критерию* или *набору критериев*. При этом тип кабеля и сечения жил также считаются заданными, исходя из известной принципиальной схемы автоматики. Следовательно, вклад каждого кабельного соединения в критерий оптимальности определяется двумя факторами: длиной кабеля и количеством жил в кабеле. Эти факторы варьируются в процессе синтеза кабельной сети при условии удовлетворения следующих ограничений:

- каждый кабель или кабельная связь могут быть размещены на дискретном множестве разрешимых трасс;
- количество жил в кабеле для каждого типа кабеля выбирается на дискретном множестве чисел, определяемых ассортиментом выпуска кабельной продукции;
- количество адресов (элементов присоединения) для каждого кабеля задано однозначно.

По числу адресов кабельные связи целесообразно разделить на две группы: двухадресные и многоадресные. Оптимизация двухадресных связей осуществляется элементарно путем прямого перебора вариантов соединения между двумя заданными элементами системы. Оптимизация многоадресных связей (соединений между тремя элементами и более) значительно усложняется, так как количество вариантов их размещения резко возрастает. Это обусловлено тем, что, как правило, каждая многоадресная связь (жила) может быть на каждом адресе (элементе) по одному разу **И**, следовательно, пред-

ставляет собой незамкнутую ломаную линию. При большом числе многоадресных связей прямой перебор возможных вариантов сталкивается с большими вычислительными трудностями.

В соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 5.10, для *генерации* и *сравнительного анализа* вариантов кабельной сети используем метод динамического программирования. Критерий оптимальности (стоимость, масса и т. п.) представим аддитивной функцией типа

$$C = C_0 + C_1 + \dots + C_N, \quad (5.28)$$

где C_0 — суммарная стоимость двухадресных жил; C_1, \dots, C_N — стоимости отдельных многоадресных жил.

Последовательность многоадресных жил $1, \dots, N$ в общем случае назначается произвольно. Если выбор стоимости многоадресных жил осуществлять шаг за шагом в назначенной последовательности и учитывать, что выбор маршрута каждой последующей жилы зависит от всех ранее выбранных маршрутов, то придем к вычислительному алгоритму, представленному на рис. 5.12, *а*. Для сокращения числа перебираемых вариантов следует учесть, что критериальная характеристика жилы пропорциональна ее длине. Поэтому последовательность $1, \dots, N$ целесообразно назначить по принципу: от жилы с большей минимальной длиной к жиле с меньшей мини-

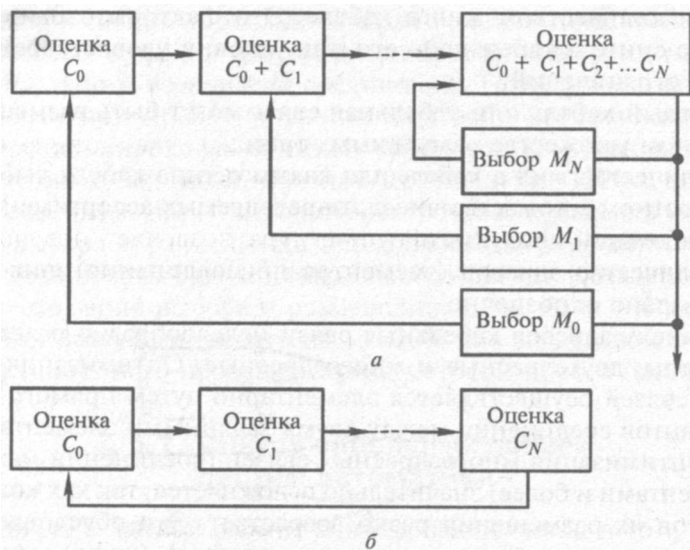


Рис. 5.12. Алгоритм выбора стоимости многоадресных жил

мальной длиной. Численные эксперименты показали, что синтез в указанной последовательности требует меньшего времени, т. е. сокращается количество перебираемых вариантов. Более того, корректировка решений во многих случаях может быть сделана один раз согласно рис. 5.12, б. Однако все же необходимо помнить, что синтез по схеме рис. 5.12, а обеспечивает сходимость к глобальному оптимуму, а по схеме рис. 5.12, б является приближенным.

Ранжировка многоадресных жил по величине минимальной длины требует решения задачи поиска минимума длины жилы при фиксированном множестве адресов и фиксированных трассах, связывающих между собой адреса. Для решения этой задачи можно использовать классическую схему динамического программирования, если представить длину многоадресной жилы суммой отрезков длины между каждой парой адресов, а именно:

$$L = L_{12} + L_{23} + L_{34} + \dots, \quad (5.29)$$

где 1, 2, 3, 4, ... — номера адресов; L_{12} , L_{23} , L_{34} , ... — **длины** отрезков между соответствующими адресами.

Схему решения можно пояснить с помощью рис. 5.13 для примера четырехадресной жилы. Уровни размещения адресов изображаются точками. Отрезок прямой линии между двумя точками соответствует отрезку жилы между двумя адресами. Если какая-либо пара адресов может быть связана несколькими трассами, то выбирается трасса меньшей длины. При условии, что все адреса могут быть соединены друг с другом, генерация вариантов построения жилы осуществляется следующим образом. Вначале размещается 1-й адрес (точка 1 на рис. 5.13), который может быть соединен со всеми остальными (точки 2, 3, 4). Однако точки 2, 3, 4 соединяются только с теми, которые еще свободны. Таким образом, из точки 1 исходят три ветви, из точек 2, 3, 4 — две ветви, из точек третьего уровня по одной ветви. Эта простая процедура позволяет получить весь набор вариантов, исходящих из точки 1. Далее аналогичным обра-

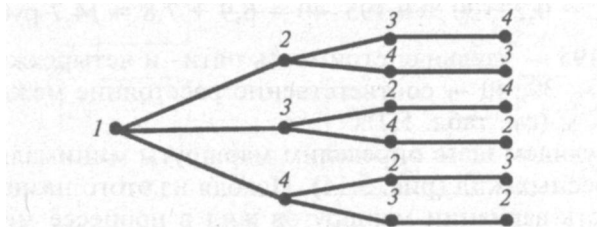


Рис. 5.13. Схема решения для четырехадресной жилы

зом строятся наборы вариантов, исходящие из точек 2, 3, 4. В результате получается все множество вариантов построения четырех-адресной жилы, из которого путем сравнительного анализа выбирается жила наименьшей длины.

Пример. Пусть дана система автоматики, включающая четыре элемента A, B, C, D . Элементы A, C соединены пятью двухадресными жилами, а элементы B, D — тремя двухадресными жилами. Даны также матрица расстояния между элементами (табл. 5.2, в м) и стоимость кабелей типа КВВГ в зависимости от количества жил:

Количество жил в кабеле.....	4	5	7	10
Стоимость кабеля C , руб/м.....	0,195	0,23	0,29	0,415

Таблица 5.2

Элемент	A	B	C	D
A	∞	10	30	50
B	10	∞	20	40
C	30	20	∞	60
D	50	40	60	∞

Систему необходимо дополнить тремя трехадресными жилами со следующими адресами элементов: 1 — A, C, D ; 2 — A, B, C ; 3 — A, B, D . Трехадресные жилы надо разместить так, чтобы обеспечить минимум суммарной стоимости кабельной сети.

Решение задачи начнем с определения стоимости кабельной сети, состоящей только из заданных двухадресных жил, а именно:

$$C_0 = 0,23 \cdot 30 + 0,195 \cdot 40 = 6,9 + 7,8 = 14,7 \text{ руб.},$$

где 0,23; 0,195 — удельная стоимость пяти- и четырехжильного кабелей, руб/м; 30, 40 — соответственно расстояние между адресами A, C и B, D , м (см. табл. 5.2).

На следующем шаге определим маршруты минимальной длины для трехадресных жил (рис. 5.14). Исходя из этого назначим последовательность вариации маршрутов жил в процессе минимизации суммарной стоимости. Эта последовательность будет: 1 — CAD , 2 — ABC (CBA), 3 — ABB (DBA).

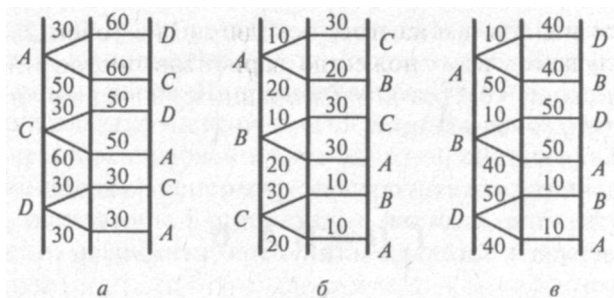


Рис. 5.14. Маршрут минимальной длины:

$a - CAD (DAC) = 80$; $б - ABC (CBA) = 30$; $в - ABD (DBA) = 50$

На третьем шаге вычислим суммарную стоимость кабельной сети с учетом полученных маршрутов трехadresных жил (табл. 5.3). Теперь перейдем к многошаговым вариациям трехadresных жил в соответствии с алгоритмом динамического профаммирования. Численный эксперимент показал, что эти вариации не дают улучшения результата, и, следовательно, принятая схема вычислений быстро привела к оптимальному результату [48].

Таблица 5.3

Фрагмент сети	Количество реальных жил	Количество жил в кабеле	Длина, м	Стоимость, руб.
<i>AC</i>	$5 + 1 = 6$	7	30	$0,29 \cdot 30 = 8,7$
<i>BD</i>	$3 + 1 = 4$	4	40	$0,195 \cdot 40 = 7,8$
<i>AD</i>	1	4	50	$0,195 \cdot 40 = 9,75$
<i>AB</i>	$1 + 1$	4	10	$0,195 \cdot 10 = 1,95$
<i>BC</i>	1	4	20	$0,195 \cdot 20 = 3,9$
Итого:				$C = 32,1$ руб.

Г Л А В А 6

Синтез принципиальных схем систем

§ 6.1. Задачи синтеза

Принципиальная схема ЭС представляет собой совокупность таких элементов и связей между ними, которая дает детальное представление о принципах работы системы, процессах, происходящих в системе, и технической реализации системы. В отличие от структурных схем, рассмотренных ранее, элементами принципиальной схемы являются не функциональные блоки, а вполне реальные технические устройства и системы, выпускаемые промышленностью или находящиеся в стадии проектирования и исследования. В целом принципиальные схемы являются основой для анализа работы системы в различных режимах и разработки конструкторско-технологической документации.

Построение принципиальных схем ведется в соответствии с большим количеством нормативных документов, к которым относятся государственные и отраслевые стандарты, а также нормы отдельных предприятий. Указанные документы ограничивают и дисциплинируют процесс формирования принципиальных схем как по содержанию, так и по форме.

Исходя из определения принципиальных электрических схем и действующего перечня нормативных документов по их разработке, можно выделить следующие группы задач синтеза принципиальных схем в САПР:

- 1) задачи детализации и выбора систем и элементов, входящих в принципиальную схему;
- 2) задачи детализации и выбора электрических связей между элементами принципиальных схем;
- 3) задачи описания принципиальных схем в стандартных формах.

Первая группа задач связана с анализом реальных технических возможностей выполнения функциональных блоков структурных схем, полученных ранее. Например, обобщенный блок авиационного источника электроэнергии при детальном рассмотрении может быть технически реализован в виде сложной системы, включающей электромеханический генератор электроэнергии, привод вращения генератора, регуляторы напряжения и частоты, аппаратуру защиты и коммутации, аварийные источники питания и другие необходимые элементы.

Следует напомнить, что предварительная детализация функциональных блоков структурных схем уже проводилась ранее с целью оптимального выбора параметров этих блоков. Однако на этапах структурно-параметрического и структурно-топологического синтеза она ограничивалась в основном физико-техническими представлениями о блоке с интегральной оценкой обобщенных параметров, учитываемых в процессе оптимизации. В основу интегральных оценок принимался только элемент, несущий функциональную нагрузку блока, например генератор электроэнергии. Остальные элементы блока, обслуживающие основной функциональный элемент, например системы управления и контроля, защиты и коммутации и т. п., оставались при этом вне рассмотрения, хотя косвенно учитывались в интегральных оценках. Поэтому в дальнейшем при детализации элементного состава принципиальных схем одинаковое внимание уделяется всем элементам функциональных блоков.

Вторая группа задач синтеза связана с переходом от структурных связей к электрическим связям между элементами схемы. Это, в свою очередь, требует ввода в рассмотрение электрических проводов, контактов и электросоединителей. В действительности проводная связь между контактами элементов может быть цельной или разрывной. В последнем случае между конечными адресами проводов имеют место промежуточные соединители (технологические разъемы, клеммные колодки, муфты сращивания и т. п.), устанавливаемые по соображениям монтажа. Однако в принципиальных схемах промежуточные электросоединители не указываются и электрические связи предполагаются неразрывными. Кроме того, электрические связи представляются в нескольких вариантах:

- отдельные провода между контактами;
- группа проводов между элементами (групповая связь);
- нераскрытые связи между элементами в виде условной линии в случае блочного представления электросоединителей или элементов.

Все электрические связи на принципиальных схемах имеют обозначения, указывающие конечные адреса связи, тип проводов и тех-

нологические особенности исполнения (свивка проводов, экранировка, жгутовка и т. п.). Полная конкретизация проводных связей и электросоединителей осуществляется на последующих этапах проектирования при разработке конструкторско-технологической документации.

Третья группа задач возникает из-за необходимости удовлетворения стандартных правил и норм построения принципиальных электрических схем. Последние могут быть представлены в двух вариантах: графическое изображение и буквенно-цифровое (табличное) изображение. Графическое изображение схем является наиболее наглядным и доступным для визуального анализа системы в целом. Табличное изображение, представляющее перечень элементов и связей между ними, снабженный соответствующей информацией, более удобно для анализа фрагментов схемы. В САПР следует реализовать оба варианта представления принципиальных схем на базе графического и алфавитно-цифрового дисплеев.

Наиболее сложными являются задачи формирования графических изображений схем с большим количеством нормативных **ограничений**. Только к числу *общих правил* построения схем можно отнести следующие:

- на принципиальной схеме изображают все электрические элементы или устройства, необходимые для осуществления и контроля в системе заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи;
- все электрические связи снабжаются маркировкой, а также условным обозначением экранировки, свивки и т. п.;
- на схемах допускается изображать соединительные и монтажные элементы, устанавливаемые в системе по конструктивным **соображениям**;
- схемы выполняются для систем, находящихся в отключенном положении;
- элементы в схемах изображаются в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД;
- все элементы схем имеют свои позиционные обозначения;
- элементы системы, используемые частично, допускается изображать на схеме не полностью, **ограничиваясь** изображением только используемых частей;
- на схеме могут быть поясняющие надписи и технические требования;
- элементы и устройства изображаются на схемах совмещенным или разнесенным способом;

- при совмещенном способе составные части элементов изображаются на схеме в непосредственной близости друг от друга. Позиционное обозначение и поясняющая надпись располагаются около элемента (**устройства**);

- при разнесенном способе составные части элементов и устройств изображают на схеме в разных местах. При этом позиционное обозначение проставляют около каждой части элемента (устройства), а поясняющую надпись помещают около одной составной части элемента;

- позиционные обозначения проставляются на схеме рядом с условным графическим обозначением элементов или устройств с правой стороны или над ним;

- данные об элементах должны быть записаны в перечень элементов, при этом связь перечня с условным графическим обозначением элемента должна осуществляться через позиционные обозначения;

- на схемах следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов (устройств), нанесенные на изделия или установленные в их документации;

- если в конструкции элемента (устройства) и в его документации обозначения выводов (контактов) не указаны, то допускается условно присваивать им обозначения в БД без изображения их на схеме.

Общие и специальные (специфичные для конкретных схем) правила вычерчивания, действующие стандарты и другие нормативные документы сужают круг задач третьей группы и сводят их к следующим:

- формирование графических изображений элементов схемы;
- размещение элементов на чертеже;
- трассировка электрических связей между элементами.

По *способу формирования* графических изображений элементы делятся на три группы. В первую группу входят простейшие элементы (резисторы, диоды, предохранители и т. п.). Для каждого простейшего элемента имеется стандартное условное изображение, которое хранится в справочно-нормативной базе данных. Во вторую группу входят элементы, изображение которых зависит от некоторых числовых параметров, например электросоединители, изображение которых зависит от заданного числа клемм или контактов. Для таких элементов, как правило, задается некоторое параметризованное описание условного графического изображения, которое однозначно конкретизируется при задании числовых параметров. Наконец, в третью группу входят сложные (составные) элементы,

для которых отсутствуют типовые условные графические изображения. В этом случае проектировщику приходится самому формировать графическое изображение. Например, для электронных блоков обычно используются прямоугольники (если не требуется раскрыть блок). Однако если размеры прямоугольника не нормированы, их следует выбирать самостоятельно. Если необходимо частично раскрыть блок, то наряду с прямоугольниками используются изображения первых двух групп элементов. Наконец, во всех случаях к изображению блоков следует подсоединять условные изображения разъемов исходя из удобства трассировки электрических связей.

Размещение элементов на чертеже может осуществляться двояко: рядное размещение и свободное размещение. В первом случае элементы размещаются в один, два ряда и более. Однако очередность размещения элементов в ряду произвольна. Во втором случае размещение изображений элементов на чертеже совершенно произвольно и представляет проектировщику наибольшую свободу для построения принципиальных схем исходя из удобства трассировки электрических связей и компактности чертежа.

Под *трассировкой* понимается прокладка на чертеже трасс (ломаных линий) для соединения контактов, являющихся конечными адресами связей. При этом ломаные линии (трассы) состоят из отрезков прямых, параллельных вертикальной и горизонтальной осям чертежа. Трассировка связей может осуществляться индивидуально или групповым способом. В первом случае для каждой электрической связи трасса прокладывается отдельно исходя, например, из минимума длины. Во втором случае трассы прокладываются одновременно для группы проводов исходя, например, из минимума точек пересечения связей. Наиболее тяжелым является случай одновременной трассировки всей совокупности связей принципиальной схемы. Критерии трассировки в общем случае могут быть разными: минимум длины отдельной связи, минимум суммарной длины группы связей, минимум точек пересечения связей, минимум поверхности чертежа и т. п.

Рассмотренные выше задачи синтеза принципиальных схем не имеют однозначных решений и должны рассматриваться как оптимизационные задачи в однокритериальной или многокритериальной постановке. Однако принципиальные схемы по сравнению со структурными являются более сложными (на несколько порядков). Поэтому постановка и решение общей задачи синтеза принципиальных схем в практическом плане вряд ли целесообразны. В теоретическом плане эта задача может быть сформулирована по аналогии с соответствующими структурными схемами в форме за-

дач динамического программирования. Практическим результатом такой формулировки является возможность расчленения общей задачи синтеза на более простые подзадачи и последующего поэтапного решения подзадач. Такой подход позволяет использовать многоэтапные алгоритмы, уже полученные для синтеза структурных схем. Ниже предлагается общий алгоритм синтеза принципиальных схем, учитывающий естественную последовательность решения рассмотренных выше задач. Во избежание повторений многих математических выкладок, сделанных применительно к синтезу структурных схем, предлагаемый алгоритм излагается в описательной форме.

§ 6.2. Общий алгоритм синтеза

Схема общего алгоритма синтеза для случая одного типа преобразователей энергии (вторичных источников питания) представлена на рис. 6.1. По аналогии со структурными схемами выделены четыре уровня подсистем (подсхем) в принципиальных схемах. Первый уровень — потребители электроэнергии; второй уровень — передача и распределение электроэнергии (сети); третий уровень — преобразователи электроэнергии (вторичные источники); четвертый уровень — первичные источники электроэнергии (здесь обозначения уровней даны «снизу **вверх**»). Совокупность первичных и вторичных источников образуют соответствующие системы электроснабжения. Согласно этому передача и распределение энергии осуществляются по двум сетям: первичной и вторичной. Аналогичным образом потребители электроэнергии делятся на две основные группы: первичная и вторичная.

Как указывалось, процесс синтеза представляет собой переход от структурных схем к принципиальным схемам и в первую очередь требует детализации элементного состава и связей на всех уровнях описания рассматриваемых систем. Ввиду неоднозначности детализации (выбора) элементов и связей практически на всех уровнях задачи детализации носят оптимизационный характер. Надо также учесть, что выбор элементов и связей осуществляется среди изделий и систем, выпускаемых промышленностью или находящихся в стадии проектирования и исследования. Следовательно, множества, на которых производится выбор, являются дискретными, конечными множествами, а соответствующие задачи выбора можно отнести к классу задач дискретного программирования, при решении которых в той или иной форме используются различные методы перебора вариантов.

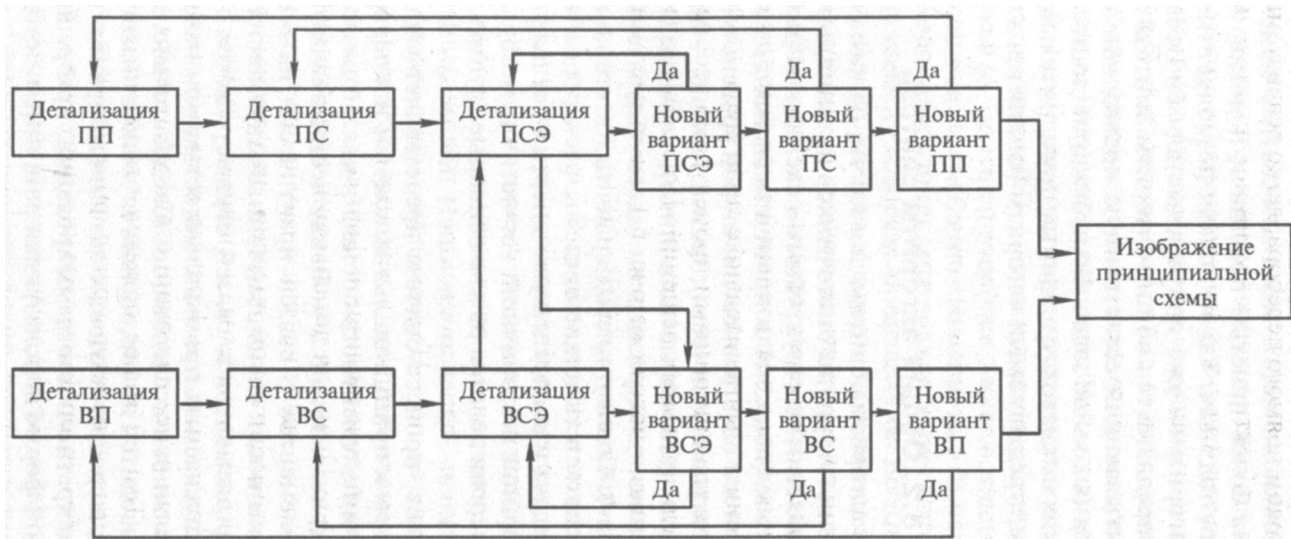


Рис. 6.1. Общий алгоритм синтеза принципиальных схем

Если количество перебираемых вариантов невелико, то можно ограничиться методом прямого перебора, легко реализуемым в САПР в режиме диалога «проектировщик—машина». Если же число вариантов не поддается визуальному наблюдению, то можно использовать вычислительные процедуры динамического программирования, построенные в соответствии со схемой на рис. 6.1. При этом каждую подзадачу (каждый блок детализации) можно решать прямым перебором вариантов, а стыковку этих локальных решений осуществлять по схеме динамического программирования. Кроме того, надо учесть следующее обстоятельство. При синтезе структурных схем уже получен ряд принципиальных решений, существенно облегчающих синтез принципиальных схем. Так, например, известны основные параметры первичного и вторичного электропитания (напряжение, частота, род тока и т. п.); основные потоки энергии (мощность), передаваемые от источников к потребителям; типы основных функциональных элементов (источников, преобразователей и потребителей). Благодаря этому процесс детализации на каждом уровне можно проводить в значительной мере автономно, что дает возможность заменить вычислительные процедуры динамического программирования традиционными процедурами уточнений и корректировки последовательных решений. Последовательность автономно решаемых задач исходя из рис. 6.1 имеет следующий вид:

- 1) детализация потребителей (ПП и ВП);
- 2) детализация сетей (ПС и ВС);
- 3) детализация систем электроснабжения (ПСЭ и ВСЭ);
- 4) изображение принципиальной схемы.

Каждая последующая задача **последовательности** должна решаться с учетом уточнений и корректировок результатов решений предыдущих задач. Решение первых трех задач определяет содержание принципиальной схемы в целом, а решение последней — описание схемы в графической или табличной форме.

Исходная информация для детализации потребителей включает их функциональное назначение, связанное с преобразованием или трансформацией электрической энергии, параметры электропитания и требования, предъявляемые условиями функционирования, стандартами, нормами, и т. п. Предварительный выбор основных потребителей сделан ранее на стадии структурно-параметрического проектирования. Тем не менее остается открытым ряд вопросов, связанных с выбором аппаратуры регулирования, защиты, управления и контроля, без которой невозможно нормальное функционирование потребителей. Кроме того, на стадии разработки принципиальных схем имеется более полная информация о проектируемой

системе, которая позволяет попытаться по возможности улучшить решения по выбору потребителей и определенным образом систематизировать большое количество потребителей. Таким образом, путем детализации потребителей необходимо получить следующие результаты:

- полный перечень потребителей, включая сопутствующие системы и элементы (регуляторы, устройства защиты и управления, контрольно-измерительные приборы и т. п.);
- классификацию потребителей по различным признакам группирования: функциональному назначению, принципу действия, техническим параметрам и характеристикам и т. д.;
- сопроводительную информацию к перечню потребителей (маркировка, наименования, характеристики, наличие клемм и контактов и т. п.), которая необходима для дальнейшего синтеза принципиальных схем.

Вариации потребителей в процессе детализации, направленные на улучшение проектируемой системы, должны оцениваться как по общим критериям оценки системы (стоимость, энергоемкость, материалоемкость, установленная масса, надежность и т. п.), так и по частным критериям оценки самих потребителей (надежность функционирования, удобство эксплуатации, ремонтпригодность и т. п.).

Исходная информация при детализации сетей включает информацию, уточненную ранее на этапе структурно-топологического синтеза (количество ЦРУ, РУ и РК, их структурные связи между собой и с потребителями). В процессе детализации сетей, кроме уточнения и корректировки указанной информации, должны быть получены ответы на следующие вопросы:

- элементный состав каждого ЦРУ, РУ и РК в отдельности (шины, **защитно-коммутиционная** аппаратура, контрольно-измерительные приборы и т. п.);
- совокупность электрических связей между потребителями и распределительными устройствами (распределительная сеть) с учетом требуемого резервирования питания отдельных потребителей;
- совокупность электрических связей между ЦРУ, РУ и РК (магистральная сеть) с учетом требуемого резервирования питания отдельных распределительных устройств.

Таким образом, в процессе детализации сети формируется полный перечень ЦРУ, РУ и РК, полный перечень элементов, установленных в каждом распределительном устройстве, и переход от структурных связей к электрическим связям с указанием их конечных адресов. Допускаемые вариации элементов и связей сети также должны быть направлены, с одной стороны, на улучшение общих ин-

тегральных критериев оценки проектируемой системы, а с другой стороны, на улучшение частных критериев для узлов и элементов сети.

Исходная информация для детализации систем электроснабжения включает предварительные решения, полученные на стадии структурно-параметрического проектирования, и графики нагрузок для ЦРУ, которые строятся на основании уточненных решений двух предыдущих подзадач. В процессе детализации систем электроснабжения должен быть сделан однозначный выбор по следующим вопросам:

- полный перечень основных (рабочих, вспомогательных и аварийных источников электроэнергии) и вспомогательных (регуляторы частоты и напряжения, блоки защиты и управления и т. п.) элементов системы электроснабжения;
- полный перечень электрических связей между основными и вспомогательными элементами системы электроснабжения;
- полный перечень электрических связей источников электроэнергии с соответствующими ЦРУ с учетом требуемого резервирования питания ЦРУ и перехода на аварийное питание.

Допускаемые вариации элементов и связей систем электроснабжения производятся по аналогии с **соответствующими** вариациями сетей и потребителей.

Полный объем информации, полученной в результате последовательной детализации потребителей, сетей и систем электроснабжения, позволяет приступить к формированию графических или табличных описаний принципиальных схем. Наиболее трудным является графическое изображение схем, особенно при большом количестве элементов и связей между ними. В процессе графического изображения принципиальной схемы должны быть однозначно определены:

- условные графические изображения сложных элементов схемы;
- размещение всех элементов на чертеже или экране графического дисплея;
- трассировка электрических связей между элементами с учетом общих и специальных правил их построения;
- размещение перечня элементов, надписей и другой текстовой или таблично-цифровой информации с учетом действующих стандартов и норм;
- компоновка принципиальной схемы в целом с учетом стандартных правил их построения.

Возможные вариации построения принципиальных схем на чертеже или экране графического дисплея должны быть направлены, с

одной стороны, на компактность изображения, а с другой стороны, на наглядность изображения и удобство визуального наблюдения.

Более подробно поэтапный процесс синтеза принципиальных схем можно рассмотреть на примере авиационных электроэнергетических систем.

§ 6.3. Детализация потребителей электроэнергии

Ассортимент потребителей электроэнергии на борту самолета достаточно широкий. В связи с этим разделим потребители на группы. Основную группу по потребляемой мощности составляют электроприводы различных механизмов, а именно:

- электромагниты для организации возвратно-поступательного движения в управляемых замках, тормозах, кранах, контакторах и т. п.;
- электрические двигатели постоянного и переменного тока (трехфазные и двухфазные асинхронные двигатели, гистерезисные, шаговые, импульсные и другие двигатели), применяемые в органах управления и агрегатах самолета (оперение, шасси, триммеры, закрылки, створки, авиадвигатели и вспомогательные силовые установки, насосы, муфты и нагнетатели, пилотажно-навигационные и радиоэлектронные системы и т. п.).

Электромеханизмы кроме электропривода и функциональных механических устройств включают ряд вспомогательных элементов: регуляторы частоты вращения, редукторы, муфты сцепления и торможения, аппаратуру управления, защиты и коммутации. С помощью вспомогательных элементов выполняются такие операции, как пуск, торможение и остановка, регулирование скорости и реверсирование двигателя и т. п., что в совокупности обеспечивает требуемые процессы управления электромеханизмами.

Следующим по суммарной величине потребляемой мощности является *светотехническое оборудование*, которое, в свою очередь, делится на три группы: осветительную, светосигнализационную и посадочно-рулежную.

Осветительное оборудование включает фары, прожекторы, внутреннее освещение пассажирских салонов, кабины экипажа, грузовых и технических отсеков и т. п. К светосигнализационному оборудованию относятся аэронавигационные огни и маяки, строевые огни, внутренние цветовые сигнализаторы, табло и т. д. Наконец, посадочно-рулежное оборудование включает посадочно-рулежные фары, обеспечивающие необходимое освещение при взлетах и посадках, особенно в ночное время.

Наименьшую мощность потребляют *информационные системы* и приборы, которые можно различать как:

- приборы контроля работы силовых агрегатов и установок (тахометры, термометры, приборы для измерения давления жидкости и газов, количества и расхода топлива и т. п.);
- системы управления полетом (демпферы колебаний, автопилоты, автоматы безопасности полета и т. д.);
- пилотажно-навигационные системы ближней и дальней навигации, системы автоматической посадки, директорного пилотирования, а также измерители высоты и скорости полета, угловых параметров и курса движения;
- радионавигационное оборудование (станции обзора земной поверхности, радиоприемные и радиопередающие устройства, командные радиостанции, радиостанции дальней связи, аварийные радиостанции);
- бортовые ЭВМ и вычислительные комплексы.

Особую группу бортовых потребителей электроэнергии составляют *высотное, защитное и специальное оборудование* типа кислородного оборудования и систем кислородного обеспечения, систем герметизации, специального высотного снаряжения, противообледенительного и противопожарного оборудования и систем, аварийно-спасательного оборудования и т. д. По потребляемой мощности эти виды оборудования не уступают первым двум группам, а также комплектуются с помощью достаточно разнородных основных и вспомогательных элементов.

Таким образом, полный перечень потребителей электроэнергии на борту достаточно обширный и нуждается в систематизации по ряду признаков, например: функциональное назначение, принадлежность к конкретной функциональной системе, параметры электропитания, принцип действия, конструктивное исполнение, продолжительность действия (постоянно действующее в течение полета, длительное, кратковременное от 5 с до 5 мин, импульсное до 5 с) и т. п. Большое значение при систематизации потребителей имеет также учет безопасности полетов. С этой точки зрения все потребители делятся на три категории. К первой категории относятся потребители, которые должны получать питание даже в аварийных режимах, когда система электроснабжения полностью отказала и единственным источником питания остаются аккумуляторные батареи. Отказы потребителей первой категории, таких, как системы управления полетом, жизнеобеспечения и др., могут привести к катастрофе и человеческим **жертвам**. Потребители второй категории продолжают получать электропитание при частичных отказах в системах элект-

роснабжения и электросети (отказы отдельных генераторов, ухудшение качества электроэнергии и т. п.) и обеспечивают работу всех основных бортовых систем. Наконец, потребители третьей категории не влияют практически на надежность и безопасность полетов и сразу же отключаются при отказах соответствующих каналов электропитания.

В процессе анализа вариантов и окончательного выбора потребителей электроэнергии исходя из номенклатуры выпускаемых промышленностью изделий необходимо удовлетворить большое количество требований. Например, специфичными для авиационного оборудования требованиями являются:

- минимальные массы и габариты;
- высокие надежность и безотказность функционирования в широком диапазоне изменения температуры (от $+60$ до -60 °С), влажности (до 100%) и других параметров окружающей среды;
- работоспособность в условиях больших вибраций, ударных нагрузок, резкого изменения пространственного положения и т. д.;
- взрывобезопасность, огнестойкость и негорючесть.

Кроме этих требований, необходимо учесть общие тенденции развития авиационного оборудования, направленные на конструктивную интеграцию отдельных изделий в автоматизированные комплексы, управляемые с помощью бортовых ЭВМ. Следует также помнить, что все потребители электроэнергии являются элементами единой бортовой электроэнергетической системы. Следовательно, они должны быть выбраны так, чтобы обеспечить высокие показатели этой системы в целом. С этой точки зрения целесообразно руководствоваться следующими рекомендациями:

- перевод максимального количества потребителей, особенно энергоемких, на питание первичной электроэнергией;
- минимизация вторичных видов электропитания с целью сокращения вторичных систем электроснабжения и вторичных сетей;
- минимизация потребляемой мощности (суммарной) без ущерба для функциональных характеристик потребителей;
- сокращение суммарной мощности потребителей первой категории в аварийных режимах;
- повышение уровня стандартизации и унификации потребителей с целью расширения возможности их применения на других самолетах.

§ 6.4. Детализация электрических сетей

Бортовые сети делятся на две части: магистральную и распределительную. Магистральные сети передают энергию от источников, точнее ЦРУ, к соответствующим РУ и РК. Распределительные сети

передают энергию дальше к потребителям. Некоторые потребители могут быть непосредственно подключены сразу к ЦРУ, так что строгое разграничение иерархии сетей не всегда очевидно. В зависимости от вида передаваемой энергии сети также различаются как первичные и вторичные. В сетях постоянного и однофазного переменного тока применяется в основном однопроводный способ передачи энергии, а роль второго провода играет металлический корпус самолета. В сетях трехфазного переменного тока корпус обычно замещает нулевой провод, а при его отсутствии — одну из фаз. В качестве сетевых проводов используются одножильные, а чаще многожильные медные и алюминиевые провода.

В отличие от проводов сети, выбираемых среди серийно выпускаемой номенклатуры, ЦРУ, РУ и РК комплектуются и конструируются для многих самолетов отдельно (в индивидуальном порядке). Это позволяет свободно комплектовать элементный состав ЦРУ, РУ и РК, что способствует равномерному распределению и размещению потребителей электроэнергии по обоим бортам. В элементный состав ЦРУ, РУ и РК входят распределительные шины, защитно-коммутационная аппаратура и контрольно-измерительные приборы.

Распределительные шины могут секционироваться на конструктивно несвязанные части (секции) в зависимости от категории питаемых потребителей. Каждая шина (секция) получает питание по основному и резервным каналам в зависимости от требуемой кратности резервирования и принятой структуры сети. Шины (секции) третьей категории не имеют резервного питания и в случае отказов системы электроснабжения отключаются. Шины или секции третьей категории обычно либо присоединяются к шинам второй категории своего же распреустройства, либо питаются от шин третьей или второй категории другого распреустройства.

Шины или секции второй категории питаются обязательно по основному и резервным каналам, причем все каналы должны быть независимы друг от друга. Наконец, шины или секции первой категории должны иметь дополнительный канал питания от аварийных источников. Секционирование шин и различные варианты резервирования в совокупности позволяют строить самолетные сети с удовлетворительными массогабаритными, надежностными и стоимостными показателями. Что касается распределительных сетей, то их показатели зависят в основном от удачной комплектации и размещения РК, а также формирования фидерных групп ЦРУ и РУ. В ответственных случаях каналы питания потребителей первой категории могут дублироваться.

Таким образом, процесс детализации электрических сетей при разработке принципиальных схем сводится к следующим процедурам:

- уточнение количества и элементного состава ЦРУ, РУ и РК в первичных и вторичных сетях;
- построение электрических связей распределительных сетей с учетом категорийности потребителей и дублирования каналов питания отдельных потребителей;
- построение электрических связей магистральных сетей с учетом секционирования шин по категориям и требуемого резервирования каналов питания РУ и ЦРУ;
- выбор **защитно-коммутационной** аппаратуры.

Следует вспомнить, что количество ЦРУ, РУ и РК, а также структуры сетей предварительно определены на стадии структурно-топологического синтеза. Поэтому процедуры уточнения и построения электрических связей достаточно легко реализуются перебором небольшого числа возможных вариантов для последовательных фрагментов сетей: фидерная группа, распределительное устройство, группа распределительных устройств. В САПР эти процедуры легко реализуются в режиме диалога «проектировщик—машина» с использованием необходимой справочно-нормативной базы данных; что касается выбора защитно-коммутационной аппаратуры, то здесь необходимо использовать специальные расчетные методы, которые излагаются ниже.

Выбор защитной аппаратуры. В качестве защитной аппаратуры на борту обычно используют предохранители с плавкими вставками и тепловые автоматы максимально-токовой защиты. Такая защита реагирует на значение тока и отключает поврежденный участок сети с определенной выдержкой времени. Выбор максимально-токовой защиты опирается на ампер-секундную характеристику защитной аппаратуры (рис. 6.2). Кривые на рис. 6.2 позволяют различить ам-

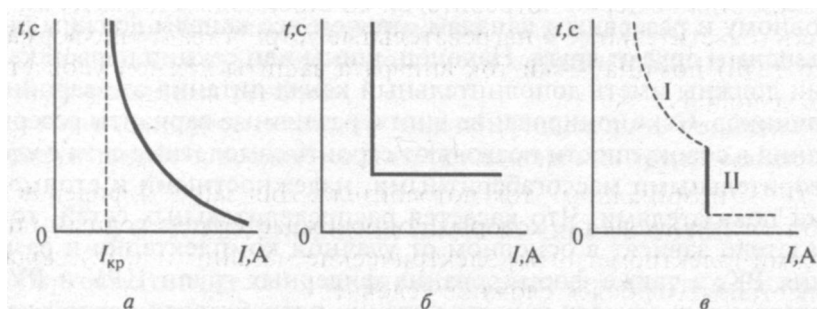


Рис. 6.2. Ампер-секундные характеристики максимальных защит

пер-секундные характеристики как зависимые (рис. 6.2, а), независимые (рис. 6.2, б) и зависимые с отсечкой по току (рис. 6.2, в). Для самолетных сетей наиболее приемлемы зависимые характеристики, которые обеспечивают, с одной стороны, быстроедействие при больших токах короткого замыкания, а с другой стороны, определенную инерционность при кратковременных скачках нагрузки и пусковых токах. Номинальное значение тока аппарата защиты принимают меньше критического значения (рис. 6.2, а), при котором происходит срабатывание защиты. Обычно $I_n = I_{кр} / k$, где k — коэффициент запаса.

При выборе аппаратов защиты учитывают следующие требования:

- защита должна работать надежно, селективно отключать участки с короткими замыканиями или недопустимыми перегрузками по току и не вызывать ложных отключений;
- чувствительность защиты должна обеспечить срабатывание при наименьших токах коротких замыканий и недопустимых перегрузках;
- защита должна обладать достаточной устойчивостью к изменениям температуры и электродинамическим воздействиям на коммутационную способность.

Выбор защитной аппаратуры осуществляют с учетом характера работы потребителей, характеристик проводов и ряда других факторов. Так, при защите первичных распределительных сетей следует учитывать неравномерность распределения токов в проводах расщепленных линий с помощью формулы [49]:

$$I_n = \alpha I_n (n - k),$$

где I_n — максимальное значение тока в линии при длительном режиме; $\alpha \approx 1,075$ — коэффициент неравномерности токораспределения; n — число каналов расщепленной линии; k — число резервных каналов. Для фидеров потребителей со стабильным характером нагрузки (осветительные и нагревательные устройства, трансформаторы и т. п.) номинальный ток аппарата защиты должен удовлетворять условию

$$I_n \geq I_{нн},$$

где $I_{нн}$ — номинальный ток потребителя. Для защиты фидеров потребителей, включение которых сопровождается переходными процессами (электромагниты, электрические машины и т. п.), должно удовлетворяться более сложное условие:

$$I_n \geq I_{нн}, t_a > t_{нн},$$

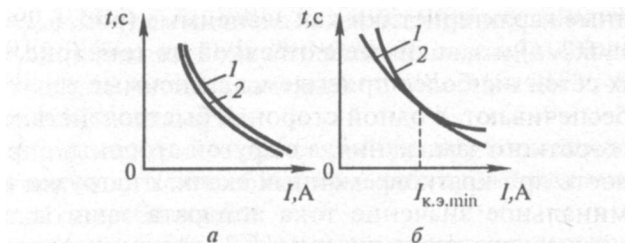


Рис. 6.3. Ампер-секундные характеристики двигателя (а) и аппарата защиты (б)

где $t_{п.п}$ — время переходного процесса; t_a — время срабатывания аппарата защиты, которое определяется по его ампер-секундной характеристике для среднеквадратичного значения тока переходного процесса

$$I_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{п.п}} \int_0^{t_{п.п}} i^2 dt}$$

Эти условия иллюстрируются на рис. 6.3 для случая пуска электродвигателя.

После выбора аппарата защиты по номинальному току производят проверку на соответствие ампер-секундных характеристик аппарата перегрузочным характеристикам проводов в допустимом диапазоне изменения температуры окружающей среды. Если провод должен быть защищен во всем диапазоне токовых перегрузок, то

его характеристика I должна быть выше характеристики аппарата 2. Если же перегрузки нет, то защита реагирует только на токи короткого замыкания. При этом допускается пересечение характеристик в точках, удовлетворяющих условию (рис. 6.4):

$$I \leq I_{кз}$$

Чувствительность аппаратов защиты проверяется по формуле

$$I_{кз}/I_n \geq 2,5,$$

электродинамическая устойчивость — по формулам

$$i_y \leq I_{у доп} \text{ или } I_{\text{max}} \leq I_{\text{max доп}}$$

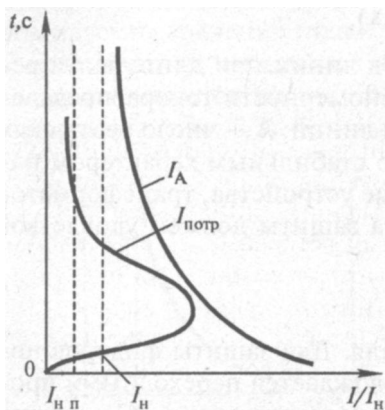


Рис. 6.4. Ампер-секундные характеристики провода и аппарата защиты

где i_y — значение ударного тока на шине, к которой подсоединен аппарат защиты; $I_{y \text{ доп}}$ — допустимое значение ударного тока для аппарата защиты переменного тока; $I_{\text{мах}}$ — максимальный ток короткого замыкания на линии; $I_{\text{мах доп}}$ — допустимый максимальный ток для аппарата защиты сетей постоянного тока. Значения i_y и $I_{\text{мах}}$ определяются расчетным путем, а значения $I_{y \text{ доп}}$ и $I_{\text{мах доп}}$ задаются нормативно для серийно выпускаемых аппаратов защиты. Термическая устойчивость (способность контактов аппарата отключать токи короткого замыкания без повреждений) проверяется по формуле

$$I_{\text{ср.кв}}^2 t \leq (I^2 t)_{\text{доп}},$$

где $I_{\text{ср.кв}}$ — расчетный среднеквадратичный ток короткого замыкания за время срабатывания автомата ($t \approx 0,1 \text{ с}$); $(I^2 t)_{\text{доп}} \approx (300 \dots 500) \cdot 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ — допустимая термическая устойчивость аппарата. Коммуникационные свойства аппаратов защиты характеризуются допустимыми токами отключения, т. е.

$$I_{\text{кз}} \approx I_{\text{доп}},$$

где $I_{\text{кз}}$ — периодическая составляющая тока короткого замыкания (для цепей переменного тока) или переходный ток короткого замыкания (для цепей постоянного тока); $I_{\text{доп}}$ — допустимое значение тока при минимальном времени срабатывания аппарата.

Селективность защиты обеспечивается последовательным соединением нескольких аппаратов защиты и соответствующим подбором их ампер-секундных характеристик. При этом чем ближе аппарат защиты к источнику, тем больше время его срабатывания.

Используя приведенные условия для построения максимально-токовой защиты на базе аппаратов теплового действия, в проектных организациях создаются расчетные алгоритмы, позволяющие почти однозначно осуществлять выбор аппаратов защиты. Основным критерием выбора является условие, что длительный ток в цепи не должен превышать значения $0,9 I_n$. При этом для защиты потребителей со стабильной нагрузкой выбираются малоинерционные аппараты защиты типа предохранителей с плавкими вставками. Чтобы исключить срабатывание предохранителей в момент включения нагрузки, обычно задаются двукратным запасом ампер-секундной характеристики по отношению к пусковой характеристике, что обеспечивается при условии недопустимости превышения пускового тока над I_n более чем в 10 раз. Тем самым исключаются старение предохранителя в процессе эксплуатации и деформации ампер-секундных характеристик, приводящие к ложным срабатываниям. Для защиты потребителей с переходной нагрузкой выбираются инерционные автоматы

защиты типа АЗК по условиям, использующим ампер-секундные характеристики автомата и переходные характеристики потребителя ($I_{\text{ср.кв}}$, $I_{\text{пл}}$ и т. п.).

После выбора аппарата защиты и проверки его свойств переходят к построению системы токовой защиты в отдельных участках сети. При этом следует учесть дополнительные требования, вытекающие из условий надежности и опыта проектирующей организации. Например, к одному аппарату защиты может подключаться только один потребитель первой или второй категории, или группа потребителей, входящих в одну функциональную систему, или не более трех потребителей третьей категории. Силовые цепи потребителей и цепи управления ими должны иметь отдельные аппараты защиты. Дублирующие друг друга провода и цепи должны иметь отдельные аппараты защиты и т. д. Все подобные процедуры выбора аппаратов и построения схем защиты легко реализуются в САПР в режимах автоматического счета и диалога.

Выбор коммутационной аппаратуры. В качестве коммутационной аппаратуры на борту используются, как правило, серийно выпускаемые реле и контакторы. Из этой номенклатуры выбор осуществляется по уровню напряжения, коммутирующего тока и ресурса работы. При этом должны учитываться значительное число накопленного опытом предыдущих разработок требований и рекомендаций. Например, при проектировании самолетов в одном конструкторском бюро принимается во внимание следующее.

В цепях с током нагрузки до 10 мА применяются только реле типа РЭС и ТКЕ. Если предусматривается включение обмоток реле в аварийных режимах, то разрешается применять только реле типа ТКЕ и РЭС-52. Для коммутации входных цепей питания электронной аппаратуры с напряжением питания 115 В не рекомендуется применять реле типа РЭС, а только типа ТКЕ. При этом пусковой ток (ток включения) электронной аппаратуры не должен превышать номинальный ток реле. При отсутствии сведений о пусковом токе, как показывает опыт, достаточно, чтобы номинальный ток реле типа ТКЕ имел пятикратный запас по отношению к номинальному току нагрузки.

В многофазных цепях с напряжением 200 В не допускается коммутации с помощью обычных реле типа РЭС, РЭН, ТКЕ и ТКД. Здесь рекомендуется применять специальные трехфазные реле и контакторы, рассчитанные на напряжение 200 В (ТКЕ5030ДГБ, ТКДЮЗОДЛ и т. п.).

При коммутации *активной* нагрузки (контактора, выключателя и т. д.) тип реле подбирается таким образом, чтобы ток нагрузки

$$I_{\text{нагр}} \leq I_{\text{доп}}$$

где $I_{\text{доп}}$ — допустимый ток через контакты коммутатора.

При коммутации *индуктивной* нагрузки тип изделия подбирается по номинальному току и эквивалентной электромагнитной постоянной времени коммутируемой цепи, величины которых не должны превышать значений, приведенных в ТУ на коммутатор. Кроме того, необходимо учитывать следующее. Реле типа РЭС при наличии в электросхеме индуктивной нагрузки следует использовать только для коммутации обмоток реле типа РЭС, ТКЕ или ТКД с учетом допустимых минимальных и максимальных токов индуктивной нагрузки. При этом одной парой контактов реле типа РЭС одновременно можно коммутировать несколько обмоток реле, как показано в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Коммутационный аппарат	Количество одновременно коммутируемых обмоток реле одной парой контактов							
	РЭС-47	РЭС-48	РЭС-52	РЭС-54	РЭС-55	РЭС-80	ТКЕ	ТКД
РЭС-47	1...5	1...5	1...8	1...30	1...15	1...5	1 (кроме ТКЕ56)	1 (только ТКД101)
РЭС-48	1...5	1...5	1...8	1...30	1...15	1...5	1	То же
РЭС-52	1...10	1...10	1...15	1...50	1...30	1...10	1	1
РЭС-54	1...10	1...10	1...15	1...50	1...30	1...10	1	1
РЭС-55	1...3	1...3	1...4	1...15	1...8	1...3	1 (ТКЕ22, ТКЕ24)	—
РЭС-80	1...3	1...3	1...4	1...15	1...8	1...3	1 (ТКЕ22, ТКЕ24)	—

Реле типа ТКЕ при коммутации индуктивной нагрузки разрешается нагружать не более чем на 0,5 номинального тока через контактную группу для обеспечения требуемого ресурса.

Не рекомендуется включать обмотку реле параллельно обмотке контактора через одну контактную группу, так как за счет ЭДС самоиндукции увеличится время отпускания реле и контактора.

При применении реле типа ТКЕ, рассчитанных на ток нагрузки 2 А, разрешается подключать через контакты реле обмотку любого контактора, даже при наличии пускового тока. Однако для обеспечения требуемого ресурса работы реле ТКЕ, для коммутации обмотки контакторов типа ТКС при большой интенсивности срабатывания (более чем 2—3 раза за один цикл работы) рекомендуется устанавливать реле, ток нагрузки через контакты которых 5 А (ТКЕ52, ТКЕ54 и т. д.).

При коммутации цепей мощных ламп (лампы-фары) коммутационная аппаратура подбирается таким образом, чтобы $I_{\text{пуск}}$, указанный в ТУ на лампу, не превышал величины пускового тока контактора (четырёхкратная величина $I_{\text{ном}}$ контактора).

При коммутации *моторной* нагрузки тип коммутатора подбирается с учетом следующих **обстоятельств**.

При коммутации цепей управления ответственных электромеханизмов (пожарных кранов, электромеханизмов останковки двигателей, уборки и выпуска шасси и т. п.) в исключительных случаях разрешается применять промежуточные коммутационные элементы, если коммутируемый ток электромеханизма превышает допустимую величину тока управляющего коммутационного аппарата, или в случае значительного увеличения массы проводов из-за падения напряжения на большой длине линии.

Для исключения режима автоколебаний в цепях управления электродвигателями *запрещается* включать их параллельно друг другу через одну контактную группу. Запрещается подключать реле, лампы и т. п. параллельно с обмоткой электромеханизма. Необходимо осуществлять развязку цепей во избежание появления «паразитных» связей и ложных срабатываний.

Для исключения случаев перегорания ламп светосигнализаторов и пробоя светодиодов запрещается подключать их параллельно обмоткам реле, контакторов и электромагнитов.

В исключительных случаях параллельно сигнальной лампе разрешается подключать только одну обмотку реле типа РЭС.

Рекомендуется коммутировать отдельной контактной группой каждую параллельно включенную нагрузку.

Пусковой ток электромотора не должен превышать величины номинальной омической (активной) нагрузки через контакты реле и выключателей.

Так, например, для электромеханизмов с $I_{\text{ном}} = 1,75 \text{ А}$ ($I_{\text{пуск}} \leq 5 \text{ А}$) для коммутации цепей следует применять изделия, ток коммутации активной нагрузки которых не менее 5 А.

При коммутации контакторами электродвигательной нагрузки (асинхронные двигатели топливных насосов, насосные станции, электроventильаторы, электромоторы постоянного тока и т. п.) пусковой ток нагрузки не должен превышать допустимого четырехкратного пускового тока (по отношению к номинальному) через контактор. С целью повышения надежности схемы для электромеханизмов с изменением направления вращения, а также двухобмоточных кранов, соленоидов при использовании реле или контактора необходимо применять специальную схему включения во избежание самопроизвольного несанкционированного закрытия механизма при обрыве управляющего провода (т. е. обратное срабатывание должно производиться только при принудительной подаче команды на исполнение).

Требования и рекомендации по выбору коммутационной аппаратуры существенно облегчают получение однозначных решений и легко реализуются в САПР в режиме диалога путем просмотра соответствующей справочно-нормативной информации.

§ 6.5. Детализация систем электроснабжения

По аналогии с потребителями и сетями системы электроснабжения также делятся на первичные и вторичные. В первичных системах электроснабжения источниками электроэнергии являются электромеханические генераторы постоянного и переменного тока и аккумуляторы. Генераторы переменного тока выпускаются в бесконтактном исполнении и могут иметь как стабильную (постоянную), так и нестабильную (переменную) частоту. Выходные характеристики некоторых, ранее серийно выпускаемых генераторов даны в табл. 6.2 и 6.3.

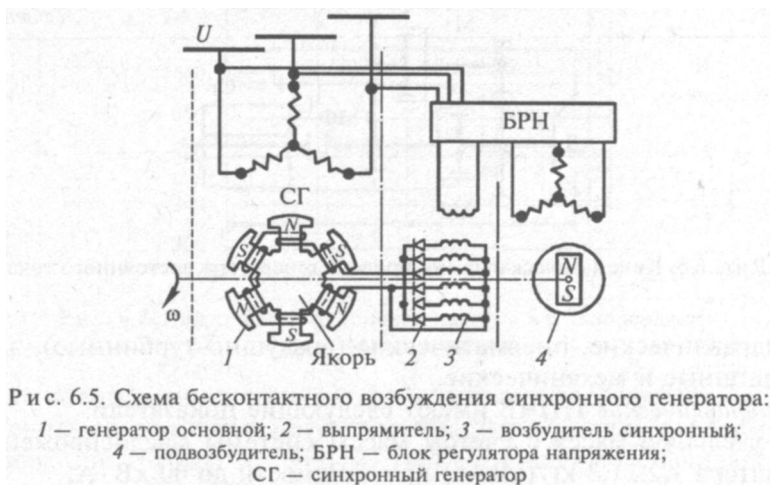
Таблица 6.2

Тип генератора	Номинальные значения			Частота вращения, тыс. об/мин	КПД
	мощность, кВт	напряжение, В	ток, А		
ГСР-3000	3	28,5	100	4..9	0,74
ГСР-6000	6	28,5	200	4..9	0,76
ГСР-9000	9	28,5	300	4..9	0,76
ГСР-12000	12	28,5	600	4..9	0,77
ГСР-18000	18	28,5	600	4..9	0,79

Таблица 6.3

Тип генератора		Номинальные значения			Частота, Гц	Частота вращения, тыс. об/мин	КПД
		мощность, кВт	напряжение, В	ток, А			
Одно- фазные	СГО-8	8	115	69,5	400... 900	4...9	0,85
	СГО-12	12	120	71...100	380...910	3,8...9,1	0,8
	СГО-22,5	22,5	208	108	300...385	6...7,5	0,9
Трех- фазные	СГС-7,5Б	7,5	208	36	400...900	4...9	0,85
	СГС-7,5В	7,5	208	20,8	400...900	4...9	0,85
	СГС-7,5Г	7,5	208	20,5	400	8	0,8
	СГС-15	15	208	20,5	400	8	0,75
	СГС-30Б	30	208	83,5	210...465	4,2...9,3	0,8
	СГС-30В	30	208	83,5	368...580	5,5...8,7	0,85
	СГС-30Г	30	208	83,5	225...465	4,2...9,3	0,8
	СГС-30У	30	120	144	400	8	0,85
	СГС-40П	40	208	111	375...445	7,5...8,9	0,8
	СГС-40У	40	208	111	387...417	7,7...8,4	0,9
	ГТ20П48	20	208	55	400	8	0,85
	ГТ30П48	30	208	83,5	400	8,1	0,85
	ГТ48П48	40	208	111	400	8	0,8
	ГТ60М48У	60	208	167	400	8	0,8
	ГТ90С46	90	208	250	400	6	0,8
	ГТ120П48	120	208	330	400	8	0,8
ГТ120П46	120	208	330	400	8	0,8	

Бесконтактность возбуждения генераторов переменного тока достигается за счет специальной системы возбуждения, обеспечивающей бесконтактный подвод постоянного тока в обмотку возбуждения генератора. Наиболее широко применяется схема бесконтактного возбуждения синхронного генератора, показанная на рис. 6.5.



Авиационные генераторы по сравнению с наземными имеют существенно улучшенные массогабаритные характеристики благодаря повышенной частоте вращения, применению специальных конструктивных и электротехнических материалов, а также различным системам принудительного охлаждения (продув воздухом, жидкостное охлаждение, испарительное охлаждение и т. д.).

Генераторы постоянного и переменного тока приводятся во вращение от ротора авиационных маршевых двигателей через редуктор или от вспомогательной силовой установки. Частота вращения авиадвигателей меняется в широких пределах. Отношение максимальной частоты к минимальной составляет **1,2...1,3** для турбовинтовых двигателей, **2,0...2,5** для одноконтурных турбореактивных и **1,6...1,8** для двухконтурных. С учетом предельных частот вращения генераторов (9000... 12 000 об/мин) и авиадвигателей (3000 об/мин для поршневых и **11 000...12 000** об/мин для турбореактивных) привод генераторов осуществляется через повышающий или понижающий редукторы с соответствующими коэффициентами редуцирования (**1,4...3,0**) и (**0,65...1**). Иногда между генератором и редуктором устанавливается фрикционная муфта для ограничения момента на валу генератора. Привод стартер-генераторов осуществляется через редуктор с автоматически изменяющимся передаточным соотношением (рис. 6.6).

Для получения переменного тока стабильной частоты синхронный генератор должен вращаться с постоянной скоростью. Для этого между редуктором и генератором включается привод постоянной частоты вращения (ППЧВ). По принципу действия ППЧВ делятся

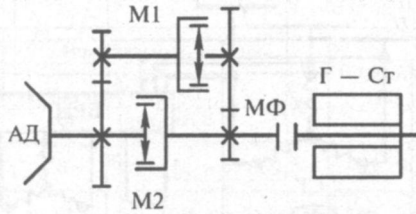


Рис. 6.6. Кинематическая схема привода генератора постоянного тока

на гидравлические, пневматические (воздушно-турбинные), электромашинные и механические.

Гидравлические ППЧВ имеют следующие показатели:

- удельную массу с учетом массы системы маслоснабжения и регулятора $1,2...1,3$ кгДкВ А) при мощности до 60 кВ А;

- КПД $0,85...0,95$;

- время безотказной работы 22 000 ч.

К недостаткам гидравлических ППЧВ относят высокую стоимость из-за сложности конструкции и точности изготовления.

Пневматические ППЧВ имеют более простую конструкцию и соответственно более высокую надежность и меньшую стоимость. К их недостаткам относятся меньший КПД (не более $0,8...0,85$), меньшая жесткость механических характеристик, а также большие габариты. Удельная масса составляет $1,6...1,8$ кг/(кВ·А).

Электромашинные ППЧВ выполняются по разным бесконтактным схемам «двигатель—генератор», просты по конструкции, имеют высокую надежность, высокий КПД ($0,85...0,9$) и малую удельную массу ($0,9...1,0$ кг/(кВ·А)) при частоте вращения генератора 12 000 об/мин.

Механические ППЧВ относятся к перспективным типам приводов и способны обеспечить высокую точность стабилизации частоты в широком диапазоне изменения скорости авиадвигателя. Недостатками являются малый срок службы и чрезмерная жесткость механических характеристик. Удельная масса составляет $1,3...1,5$ кг/(кВ·А), а КПД - $0,95...0,96$.

Стабильная частота переменного тока должна удовлетворять следующим требованиям:

- в нормальных установившихся режимах частота меняется в пределах $380...420$ Гц ($\pm 5\%$ номинального значения);

- в нормальных переходных режимах частота меняется в пределах, ограниченных кривыми 2 и 3 на рис. 6.7;

- в ненормальных режимах пределы изменения частоты ограничены кривыми 1 и 4 на рис. 6.7.

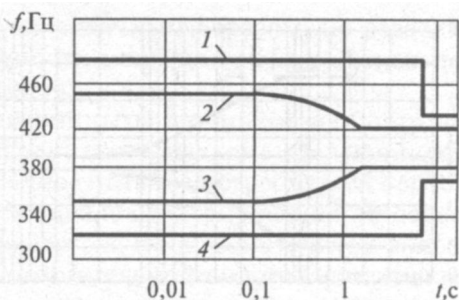


Рис. 6.7. Допустимые отклонения частоты в установившихся и переходных режимах

Для стабилизации частоты в указанных пределах приходится применять специальные регуляторы частоты с двумя каналами регулирования: грубым и точным. Грубый канал обеспечивает точность порядка $\pm(3..8)\%$, а точный канал (корректирующее устройство) — $0,25..0,5\%$.

Гостируемые требования к качеству бортовой электроэнергии предъявляются как по частоте, так и по напряжению. Потребители постоянного тока допускают на своих клеммах изменение напряжения в нормальных установившихся режимах в пределах $24..29$ В, а напряжение генератора в точке регулирования может меняться соответственно в пределах $27..29$ В. Требования к стабилизации напряжения переменного тока в установившихся режимах следующие:

- напряжение фазы на клеммах приемника при нормальном режиме работы составляет $108..119$ В, при ненормальном — $97..134$ В, при аварийном — $102..124$ В;
- среднее напряжение трех фаз в точке регулирования при нормальном режиме работы составляет $115..119$ В, при ненормальном — $101..132$ В, при аварийном — $110..122$ В.

Требования к изменениям напряжения в нормальных переходных процессах при колебаниях нагрузки от 10 до 160% номинала представлены на рис. 6.8 в относительных приведенных значениях. Под приведенными величинами понимаются одиночные прямоугольные импульсы напряжения постоянного тока и одиночные пачки синусоидальных кривых напряжения переменного тока с прямоугольными огибающими, которые по своему электрическому и тепловому воздействию на электрооборудование эквивалентны воздействию реальных переходных напряжений со сложными формами кривых и их огибающих.

Кроме требований по точности, к напряжению переменного тока предъявляются также нормированные ограничения на модуляцию

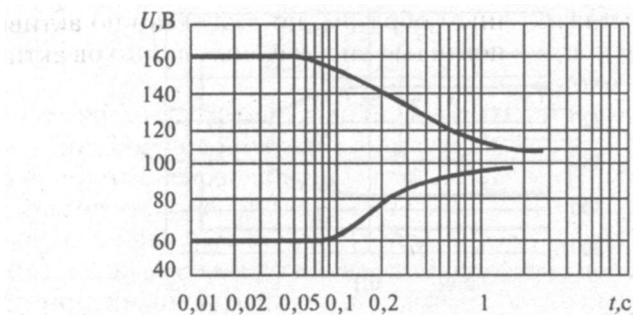


Рис. 6.8. Пределы допустимых значений ступенчатой характеристики переходного напряжения СЭС переменного тока

фазного напряжения и коэффициент формы кривой в установившихся режимах. Значение коэффициента формы не более 8%. Отношение максимального напряжения к действующему в пределах $1,41 \pm 0,15$. Небаланс напряжений фаз не более 3 В при разности фазных нагрузок не более 10% номинальной мощности.

Указанные требования обеспечиваются с помощью специальных систем регулирования напряжения. Для генераторов постоянного тока применяются угольные регуляторы и регуляторы на магнитных усилителях. Для генераторов переменного тока используются регуляторы дискретного действия (импульсные, релейные и цифровые) на транзисторных и тиристорных схемах.

Авиационные системы электроснабжения обычно состоят из двух однотипных несвязных подсистем левого и правого борта, в каждой из которых может быть более одного канала генерирования электроэнергии соответственно числу авиадвигателей. В первичных системах электроснабжения постоянного тока с напряжением 27 В обе подсистемы работают параллельно. В системах переменного тока возможны два варианта:

- все каналы генерирования работают отдельно, а в случае выхода из строя одного канала его нагрузки подключают к другим каналам;
- генераторы каждого борта работают параллельно, а в случае выхода из строя подсистемы одного борта его нагрузки подключаются к подсистеме другого борта.

Во всех каналах генерирования устанавливаются однотипные **генераторы**, что требует равномерного распределения нагрузки между ними при параллельной работе. С этой целью в регуляторы напряжения постоянного тока вводятся специальные уравнивательные обмотки. В регуляторах переменного тока выравнивание нагрузок

осуществляется аналогичным образом, но отдельно по активной и реактивной мощности с помощью специальных датчиков активного и реактивного токов.

В качестве аварийных источников на борту применяются аккумуляторные батареи, выполняющие следующие функции:

- кратковременное питание потребителей первой категории от момента отказа всех каналов генерирования до перевода потребителей на питание от генератора с вспомогательной силовой установкой;
- зарядка вспомогательной силовой установки;
- питание электрических стартеров и другой аппаратуры при автономном запуске авиадвигателей;
- кратковременная проверка работы электрооборудования на земле.

В качестве бортовых аккумуляторов используются свинцовые и никель-кадмиевые батареи. Благодаря ряду преимуществ последние находят все большее применение.

При параллельной работе генераторов постоянного тока друг с другом или с аккумуляторной батареей требуются специальные системы защиты и управления, которые могут обеспечить условия автоматического включения в сеть и выключения из сети при возникновении ненормальных режимов. Для этой цели используются дифференциально-минимальные реле (ДМР), которые предназначены для:

- подключения генератора к сети при превышении его напряжения относительно сети на $0,3...0,7$ В;
- отключения генератора от сети при критических значениях обратных токов;
- предотвращения подключения генератора к сети при неправильной полярности;
- дистанционного включения и выключения генераторов;
- сигнализации о включении генератора в сеть;
- подключения генератора к аккумуляторной батарее при автономном запуске авиадвигателя.

По принципу действия многочисленные модификации ДМР мало отличаются друг от друга. Наиболее совершенными являются ДМР-400Т и ДМР-600Т, предназначенные для работы с генераторами мощностью 12 и 18 кВт соответственно. Кроме ДМР, в системах электроснабжения постоянного тока применяются специальные аппараты защиты от перенапряжения (АЗП), которые срабатывают при недопустимом повышении напряжения генератора. Защита от недопустимого понижения напряжения осуществляется с помощью ДМР путем реагирования на соответствующее изменение обратных токов.

Функции управления и защиты в системах переменного тока более разнообразны и сложны:

- подключение генераторов к сети с соблюдением условий синхронизации (равенство напряжений, частот и фаз);
- отключение генераторов от сети при невыполнении условий синхронизации;
- отключение генераторов при ненормальных режимах работы (короткие замыкания, недопустимые повышения или понижения напряжения и частоты, обрыв фаз, несимметрия напряжений, небаланс токов и т. д.);
- дистанционное управление и сигнализация о включении и выключении генераторов;
- переключение потребителей выключенного генератора на другие каналы генерирования электроэнергии;
- предотвращение последствий отказов генератора, например гашение поля возбуждения генератора с коротким замыканием;
- селективность действия защиты (отключение только отказавшего элемента) и требуемое быстродействие;
- независимость защищаемых элементов от отказов в системах защиты, исключение ложных срабатываний защиты.

Учитывая тесную связь между функциями управления и защиты и однотипность ряда элементов в соответствующих системах, авиационные системы управления и защиты по возможности выполняются в интегральном исполнении в виде единых конструктивных блоков (БЗУ). Элементную базу БЗУ составляют интегральные микроэлектронные схемы, с помощью которых обрабатывается информация от датчиков и выдача соответствующих команд на исполнительные органы (контакты, синхронизаторы и т. п.).

Во вторичных системах электроснабжения в качестве источников применяются преобразователи энергии. В зависимости от рода тока первичной системы используются следующие преобразования: постоянного тока в переменный; постоянного тока в постоянный; переменного тока в постоянный; переменного тока в переменный.

Для реализации этих преобразований применяются два основных типа преобразователей: электромашинные и статические.

Электромашинные преобразователи представляют собой **двигатель-генераторные** установки и преобразуют постоянный ток с напряжением 27 В в переменный ток с частотой 400 Гц и напряжением **115 В** (однофазные преобразователи) и 36 В (трехфазные преобразователи). Мощность таких серийно выпускаемых преобразователей достигает 6000 кВ · А. В случае первичной системы переменного тока эти преобразователи используются как аварийные источники с мощностью до 500 В А. КПД преобразователей низкий (**0,45...0,5**) из-за двойного преобразования энергии, а удельная масса высокая — от 10 до 20 **кг/(кВ · А)**.

Развитие электронной техники позволило создать и внедрить *статические преобразователи* с более высокими показателями: КПД — 0,7...0,95, мощность — до 10 кВ·А, $\cos \varphi = 1$, надежность и быстродействие — значительно выше. С помощью элементов типа трансформаторов, инверторов (схем выпрямления) и конверторов (схем формирования переменного тока) удастся построить статические преобразователи, обеспечивающие все необходимые виды преобразования электроэнергии.

Электромашинные и статические преобразователи аналогично первичным генераторам снабжаются соответственно регуляторами напряжения и частоты для получения требуемого качества электроэнергии, а также аппаратурой защиты, управления и коммутации.

В аварийных режимах питание вторичных потребителей первой категории также осуществляется от аккумуляторных батарей.

В целом элементный состав первичных и вторичных систем электроснабжения, обеспечивающих питание шин соответствующих ЦРУ, достаточно сложный и взаимосвязанный. Несмотря на это, задача выбора элементов самолетных систем электроснабжения существенно упрощается в связи с тем, что номенклатура выпускаемых промышленностью регуляторов частоты и напряжения, а также блоков защиты и управления сильно ограничена. Поэтому основное внимание следует уделить выбору генераторов и привода в первичных системах и выбору преобразователей во вторичных системах электроснабжения, которые определяют последующий выбор регуляторов и других вспомогательных блоков. При этом учитываются результаты предварительного выбора источников электроэнергии на стадии структурно-параметрического проектирования. Уточнение и окончательный выбор элементного состава осуществляются на основе уточненных графиков нагрузок ЦРУ и РУ, полученных при детализации первичных и вторичных сетей.

Детализация систем электроснабжения завершается построением электрических связей резервного и аварийного питания первичных и вторичных ЦРУ путем анализа и сравнения практически ограниченного числа возможных вариантов. Выбор элементов и связей осуществляется по критериям массы, габаритов и надежности, являющихся основными для бортовых систем и оборудования. В целом задачи детализации систем электроснабжения также можно решать в САПР путем диалога «проектировщик—машина» и просмотра справочно-нормативной документации, а также использования накопленного опыта предыдущих разработок.

§ 6.6. Изображение принципиальных схем

Графическое изображение принципиальных схем с численно-буквенными пояснениями, текстами и таблицами завершает процесс синтеза принципиальных схем и выполняется в двух вариантах:

- 1) чертеж, как правило, большого формата, на котором представлена изображаемая схема в полном объеме;
- 2) альбом чертежей, каждый из которых представляет отдельный фрагмент полной схемы (желательно автономный фрагмент, например схема отдельного потребителя). В большинстве случаев изображение схемы на одном чертеже невозможно из-за сложности и громоздкости проектируемых систем. Поэтому в дальнейшем имеется в виду альбом чертежей.

Стандартные *правила построения* чертежа принципиальных схем в сочетании со специфическими отраслевыми и местными правилами существенно облегчают процесс формирования чертежей. Особенно это касается текстовой и табличной части чертежа, которая включает перечень элементов схемы, технические требования, надписи на поле чертежа, штампы с основной надписью и т. д. При заданном ассортименте форматов выбор количества чертежей, определения форматов, нанесение штампов, рамок и стандартных надписей производится практически однозначно и может автоматически выполняться в САПР. Если схема изображена на нескольких листах, то основной большой штамп наносится только на первый лист, а на втором и последующих листах в правом нижнем углу ставится только малый штамп.

Перечень элементов схемы представляет собой таблицу, связывающую позиционное обозначение элемента, его тип и его марку. Обозначение элемента в общем случае состоит из трех частей, указывающих вид элемента, его номер и функциональное назначение. Вид и номер элемента являются обязательной частью условного буквенно-цифрового обозначения и в обязательном порядке входят в перечень элементов на чертеже. Для уточнения вида элементов допускается применять буквенные коды. Например, наиболее распространенные элементы авиационных электросхем имеют следующие нормированные буквенные коды:

- А — устройства;
- В — громкоговорители, микрофоны, сельсины;
- С — конденсаторы;
- Д — схемы интегральные, микросборки;
- Е — осветительные, нагревательные устройства;

Г — разрядники, предохранители;
Н — батареи, аккумуляторы;
Х — приборы звуковой, световой сигнализации;
К — реле, контакторы, пускатели;
L — катушки индуктивности, дроссели;
М — двигатели;
Р — приборы, измерительное оборудование;
R — **резисторы**;
S — выключатели, переключатели, срабатывающие от различных воздействий;

Т — **трансформаторы**;

V — приборы электровакуумные, полупроводниковые и т. д.

Примерный состав перечня элементов авиационных электросхем приведен ниже:

1) блок с нераскрытой внутренней схемой (черный ящик);
2) блок с раскрытой (или частично раскрытой) внутренней схемой (покупной блок, «чужой» блок собственной разработки);

3) соединитель;

4) контакт (штырь, гнездо);

5) клемма;

6) элементы электрорадиооборудования:

устройства коммутационные и контактные соединения (реле типа ТКЕ, ТКД, ТКС; реле типа РЭС; реле поляризованное; контакторы; выключатели, переключатели, кнопки; переключатели **МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ**);

аппараты защиты (предохранители, автомат защиты);

радиоэлементы;

приборы акустические (телефон, микрофон, ларингофон, головка акустическая);

антенны, волноводы;

устройства электрозапальные (свеча зажигания искровая);

источники тока электрохимические (элемент гальванический или аккумулятор; батарея гальванических (аккумуляторных) элементов);

машины электрические;

трансформаторы, дроссели, магнитные усилители;

резисторы, конденсаторы;

приборы электроизмерительные;

приборы полупроводниковые (диоды, транзисторы, мостовые **схемы**);

сельсины-датчики, сельсины-приемники;

преобразователи;

источники света;

термопары;

7) шины;

8) обрыв **линии связи**.

Часть параметров элементов не входит в перечень, а указывается на поле чертежа. Ниже приведены некоторые из этих параметров и место их указания на чертеже:

- 1) тип устройства — для формирования графического образа;
- 2) наименование устройства — в перечень элементов;
- 3) обозначение устройства — в перечень элементов;
- 4) позиция устройства — на поле чертежа и в перечень элементов;
- 5) индекс (сокращенное обозначение — на поле чертежа и в перечень элементов);
- 6) место установки — в перечень элементов;
- 7) номер шпангоута — в перечень элементов и для автоматического макетирования;
- 8) тип соединителя — для формирования соединителя с соответствующим количеством контактов;
- 9) позиция соединителя — на поле чертежа;
- 10) вид соединения;
- 11) количество контактов;**
- 12) наименование контактов — на поле чертежа;**
- 13) сигнал — на поле чертежа;**
- 14) тип экрана — для изображения экрана на поле чертежа;
- 15) бирка связи — для указания бирки связи на поле чертежа.**

Таблица (перечень) элементов авиационных электросхем включает следующие столбцы:

- номер листа (чертежа) и обозначение зоны размещения элемента;
- позиционное обозначение элемента (в случае разнесенного способа изображения элемента позиционное обозначение заносится в перечень один раз; например, для реле — по позиции обмотки);
- наименование и обозначение элемента;
- сокращенное обозначение элемента;
- количество элементов в схеме;
- пространственное размещение элемента (номер электроотсека и номер шпангоута).

Данные по каждому элементу заносятся в таблицу строкой. В целом процедуры составления перечня элементов нормированы настолько, что могут выполняться практически однозначно (автоматически в САПР). Проектировщику остается только дать нумерацию схем после

детализации элементного состава источников, сетей и потребителей проектируемой системы и разбиения ее на составные системы по функциональным или иным признакам. Каждой составной системе ставится в соответствие ее схема. Номера схем также формируются автоматически в соответствии с действующим стандартом предприятия. Номер схемы записывается в основной надписи и в правом верхнем углу каждого листа. Таблица элементов по возможности также размещается в верхней правой части чертежа. Однако в большинстве случаев в альбомах чертежей таблицы элементов выносятся на отдельные **ЛИСТЫ**.

Технические требования к элементам и электрическим связям между ними составляются и вносятся в альбом чертежей в виде самостоятельных листов или надписей на поле чертежа по аналогии с таблицей элементов. Остальные тексты в виде надписей на поле чертежа или таблиц (позиционное обозначение, наименования контактов, бирки и адреса проводов, таблицы контактов и т. п.) также составляются по действующим стандартам и нормам и могут автоматически выполняться при формировании чертежа схемы. Таким образом, вся текстовая часть чертежей схем не представляет проблем для исполнения в САПР. Поэтому текстовую часть, за исключением надписей на поле чертежа, целесообразно выполнить на начальном этапе формирования чертежа, а надписи на поле чертежа — на последнем этапе после изображения графической части чертежа.

Наиболее проблематичным является построение *графической части* чертежа, т. е. непосредственно принципиальной схемы. Здесь, как уже указывалось ранее, возникают две группы взаимосвязанных задач:

- 1) выбор и размещение на свободном поле чертежа условных изображений элементов;
- 2) трассировка электропроводных связей между контактами элементов.

Если первую задачу можно решить произвольно, то решение второй задачи существенно зависит от результатов решения первой задачи. Благодаря этому обстоятельству процесс графического изображения принципиальной схемы можно представить в виде последовательного двухэтапного процесса, где на первом этапе решается первая задача, а на втором этапе — вторая задача. Такое представление процесса решения позволяет получить наилучший результат с помощью вычислительной схемы динамического программирования, приведенной на рис. 6.9.



Рис. 6.9. Вычислительная схема динамического программирования

Поиск наилучшего результата можно вести как по одному критерию, например минимуму суммарной длины электрических связей, так и по нескольким критериям, используя методы многокритериального поиска типа Паретто-множества и др. Кроме минимума длин электрических связей, в качестве критериев поиска могут быть выбраны минимум количества точек излома в линии связи, минимум числа точек пересечений связей и др. Однако следует отметить, что все эти критерии, вообще говоря, не гарантируют достижения наилучшего результата — наглядности и компактности изображения схемы в целом. К сожалению, эти качества пока не поддаются формализации и могут быть оценены только с помощью профессиональных экспертов. Поэтому формальные критерии, поддающиеся количественной оценке, следует выбирать так, чтобы экспертные оценки сочли этот выбор удовлетворительным.

Условное графическое изображение элемента выбирается однозначно, следуя нормативно-справочной информации (за исключением редких случаев, когда она отсутствует и надо строить вновь). Однако размещение условного изображения элемента на поле чертежа возможно в различных вариантах. Количество вариантов размещения условных изображений совокупности элементов значительно больше. Поэтому выбор наилучшего варианта возможен только при поиске по схеме, приведенной на рис. 6.9. Для уменьшения

множества генерируемых вариантов надо учитывать ряд типовых ограничений и рекомендаций, а именно:

- условные изображения элементов схемы размещаются так, чтобы направления контактов совпадали с координатными осями чертежа, т. е. четыре основных положения элемента в поле чертежа;
- условные изображения элементов размещаются так, чтобы сохранить функциональную структуру схемы, например источники наверху, распределительные устройства в середине, потребители внизу;
- условные изображения однотипных элементов одинакового уровня иерархии располагаются в ряд, например изображения шин ЦРУ.

Эти и другие правила, апробированные опытным путем на предприятиях, а также опыт и интуиция проектировщиков позволяют сразу же выбрать более или менее удачный вариант размещения, который в дальнейшем улучшается путем перебора вариантов отдельных элементов. Генерация и перебор вариантов размещения целесообразно поручить проектировщику, чтобы использовать его экспертные оценки и неформальные методы.

Электрические связи между элементами условно изображаются на чертеже в виде ломаных линий (трасс или маршрутов), состоящих из отрезков прямых линий, параллельных координатным осям. Кроме условия параллельности координатным осям связи удовлетворяют еще ряду типовых требований, например расстояние от линии (трассы) связи до любого графического изображения на чертеже (элемента, другой линии связи, подписей, штампов и т. д.) не должно быть меньше заданной величины δ . Число отрезков линии связи желательно иметь небольшим. С точки зрения линии связи каждый элемент представляет собой прямоугольник, в который вписывается условное графическое изображение элемента. Конечными адресами линии связи являются адреса контактов соответствующих элементов. В связи с этим для каждого элемента составляются таблицы контактов.

§ 6.7. Размещение и трассировка электросвязей

Данная задача конкретизируется следующим образом. Заданными считаются размеры поля чертежа, перечень и условные графические изображения элементов вместе с контактами и адресами линий связи. Необходимо так разместить элементы и осуществить трассировку связей, чтобы доставить минимум значению целевой функции и удовлетворить всем ограничениям на графическое изображе-

ние схемы. Целевую функцию в общем случае можно представить суммой трех слагаемых:

- 1) суммарной длины всех связей схемы;
- 2) штрафа за увеличение суммарного количества точек излома линий связи;
- 3) штрафа за увеличение суммарного количества точек пересечений **линий связи**.

Последнее слагаемое без заметного ущерба можно заменить введением требования — исключить явно излишние точки пересечения (рис. 6.10). Тогда целевая функция имеет всего два слагаемых и один надстрочный коэффициент, что существенно облегчает процесс поиска.

В соответствии с рис. 6.9 решение задачи начинается с *трассировки электрических связей* при фиксированном размещении элементов, точнее, их условных изображений. Выбор совокупности трасс одновременно не представляется возможным. Следовательно, требуется установить определенную очередность (последовательность) трассировки каждой связи в отдельности. Выбор этой последовательности также невозможен формальным образом. Здесь могут быть полезны предварительные знания об изображаемой схеме, например структурная схема, и опыт и интуиция проектировщика. В качестве общих рекомендаций можно предложить такую последовательность трассировки. Вначале рассматриваются двухадресные связи, идущие от элементов верхнего уровня к соседним элементам нижнего уровня в соответствии со структурной схемой. После трассировки всех двухадресных связей можно перейти к многоадресным связям по принципу «от простого к сложному».

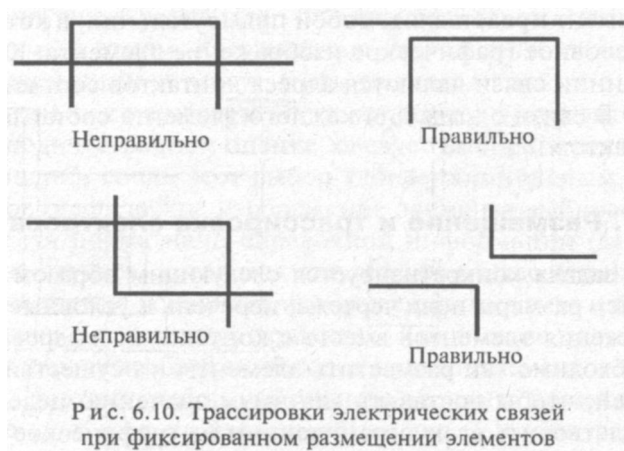


Рис. 6.10. Трассировки электрических связей при фиксированном размещении элементов

Определив так или иначе последовательность трассировки, следует перейти к задаче трассировки каждой связи в отдельности. Учитывая условие параллельности отрезков линии связи координатным осям, для решения задачи можно рекомендовать *метод покоординатного поиска*, называемый часто методом **Гаусса—Зейделя**. Несмотря на простоту организации и наглядность процесса поиска, метод покоординатного поиска не обеспечивает достижения глобального оптимума и в определенных ситуациях может заикнуться (застрять) даже на пути к локальному оптимуму. Кроме того, метод ориентирован на области поиска, обладающие свойствами непрерывности, гладкости и открытости. Поиск в замкнутом пространстве, особенно со сложной конфигурацией, может не привести к цели. В силу указанных недостатков необходимо контролировать процесс поиска и корректировать его направления.

Возможности применения метода покоординатного поиска рассмотрим на примерах конкретных ситуаций (рис. 6.11). Сначала возьмем простейший случай (рис. 6.11, а), когда на свободном поле чертежа зафиксированы только два элемента, изображенных прямоугольниками. Каждый элемент имеет по одному контакту (точ-

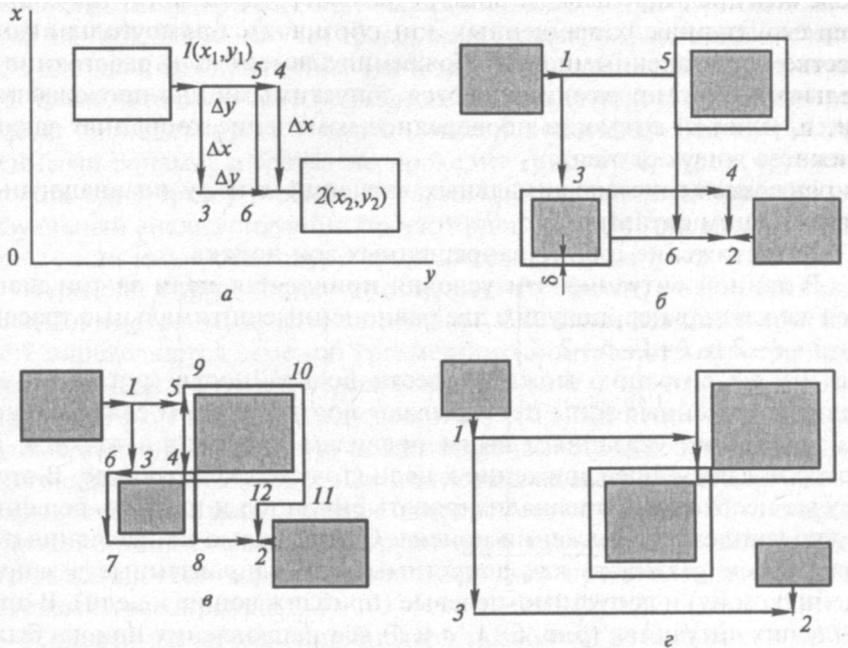


Рис. 6.11. Оптимальные трассировки электрических связей для случая двух контактов

ки 1 и 2), которые необходимо соединить. Точку 1 примем за начальную точку поиска, а точку 2 — за конечную. Направление поиска определим с помощью пробных приращений Δx и Δy в точке 1 как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Из четырех возможных направлений движения только два ведут к цели. Начиная поиск в любом из этих допустимых направлений, всего за два шага придем к цели (точке 2). Двигаясь поочередно вдоль x и y , получаем трассу 1—3—2. Если же поменять очередность изменения координат, то получим трассу 1—4—2. Нетрудно показать, что обе трассы равноценны и являются оптимальным решением задачи, так как имеют минимальную длину и минимальное число точек излома. Любая другая трасса, например 1—5—6—2, будет хуже, так как при той же длине удвоится число точек излома. Следует также добавить, что выход трассы за пределы прямоугольника 1—3—2—4 нежелателен из-за увеличения как длины, так и числа точек излома.

Теперь несколько усложним ситуацию (рис. 6.11, б). Кроме элементов с контактами 1 и 2 в поле чертежа введены еще два прямоугольных изображения блоков. Наличие новых элементов создает в поле чертежа запрещенные **ЗОНЫ**, через которые не могут проходить трассы. Границы запрещенных зон обозначим прямоугольниками (рамками), удаленными от изображения элементов на расстояние δ . Граничные линии рамки являются допустимыми для прохождения трасс. В новой ситуации поочередное изменение координат заканчивается в двух случаях:

- 1) достижение максимальных значений x и Δy по аналогии с предыдущим случаем;
- 2) достижение границ запрещенных зон поиска.

В данной ситуации эти условия приводят к цели за три шага. Так же как и ранее, получим две равноценные оптимальные трассы: 1-3-4-2 и 1-5-6-2.

Эту же ситуацию можно довести до крайности (рис. 6.11, в), если запрещенные зоны перекрывают проход линиям связи. Поиск из точки 1 по указанным выше правилам приводит в точку 4, из которой дальнейшее движение к цели (точке 2) невозможно. В этом случае необходимо проанализировать ситуацию и принять решение о дальнейшем продолжении поиска. С этой целью направления поиска будем различать как допустимые (не направленные в запрещенную зону) и допустимо-целевые (приближающие к цели). В предыдущих ситуациях (рис. 6.11, а и б) все направления поиска были допустимо-целевыми. Однако в последнем случае (рис. 6.11, в) эти направления не привели к цели. Для продолжения поиска можно

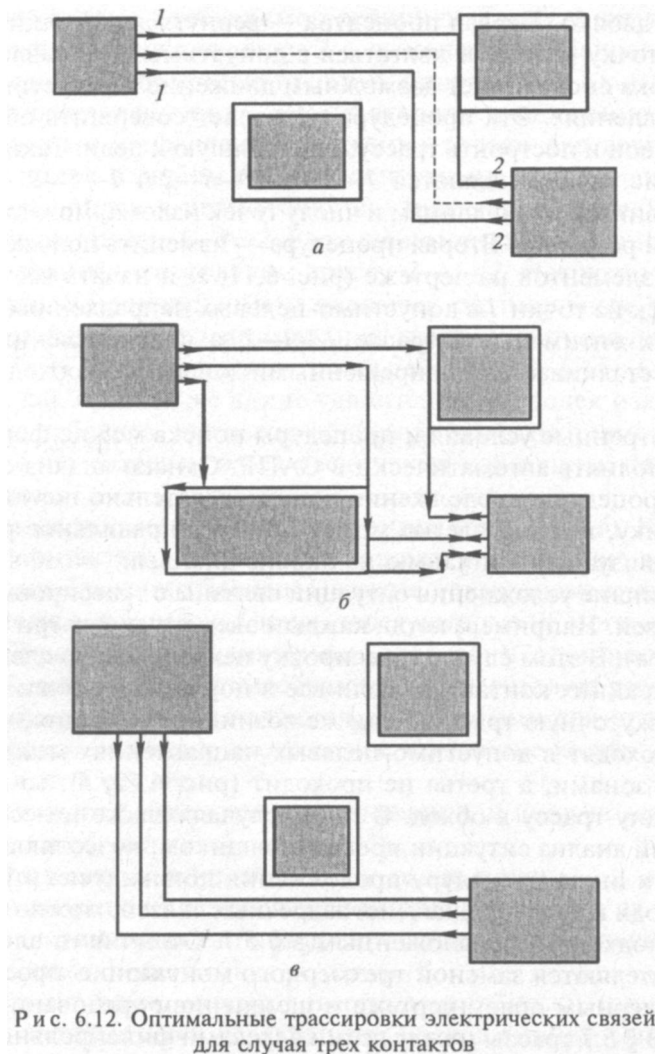
поступить двойко. Первая процедура — вернуться из точки 4 в предыдущую точку излома и двигаться в допустимых направлениях до тех пор, пока снова станет возможным движение в допустимо-целевых направлениях. Эта процедура позволяет совершить обход запрещенных зон и построить трассу, приводящую к цели. Такими трассами на рис. 6.11, в являются 1–3–6–7–8–2и 1–5–9–10–11–12–2. Сравнивая их по длинам и числу точек излома, можно выбрать наилучший результат. Вторая процедура — изменить положение связываемых элементов на чертеже (рис. 6.11, з) и начать все сначала. Тогда поиск из точки 1 в допустимо-целевых направлениях Δx сразу приводит к оптимальной трассе 1–3–2, а в направлении Δy по-прежнему сталкивается с запрещенными зонами и необходимостью их обхода.

Рассмотренные условия и процедуры поиска можно формализовать и выполнять автоматически в САПР. Однако анализ ситуации и выбор процедуры продолжения поиска желательно поручить проектировщику, который легко может принять правильное решение, наблюдая визуально ситуацию на экране дисплея.

Дальнейшие усложнения ситуаций связаны с трассировкой групповых связей. Например, когда каждый элемент имеет три контакта (рис. 6.12, а). В этом случае трассировку целесообразно сделать сначала для крайних контактов. Если все в порядке, то можно построить промежуточную трассу. Если же возникнет ситуация, когда две трассы проходят в допустимо-целевых направлениях между запрещенными зонами, а третья не проходит (рис. 6.12, б), то придется пускать одну трассу в обход. В таких случаях также целесообразен визуальный анализ ситуации проектировщиком, позволяющий выбрать ту или иную процедуру продолжения поиска (рис. 6.12, в).

Переходя к трассировке многоадресных связей, можно воспользоваться подходом, предложенным в § 5.7. Отличия от алгоритмов § 5.7 определяются заменой трехмерного монтажного пространства сети двумерным полем чертежа и изменением требований к трассировке. В § 5.7 трассы между всеми адресами фиксированы и необходимо найти оптимальную последовательность адресов для каждой многоадресной связи. Здесь же поиск последовательности адресов и связывающих их трасс ведется одновременно. Однако это не представляет принципиальных затруднений, так как для каждой пары соседних адресов можно воспользоваться предложенными выше методами трассировки.

Изложенные методы и процедуры позволяют реализовать в САПР процесс синтеза графического изображения принципиальных схем в полуавтоматическом режиме, в котором поиск двухадресных трасс



в допустимых и допустимо-целевых направлениях ведется автоматически, а решения по выбору последовательности связей, размещению элементов и процедур продолжения поиска в критических ситуациях принимаются проектировщиком в результате визуального наблюдения строящейся схемы.

Г Л А В А 7

Анализ физических процессов

§ 7.1. Задачи анализа и моделирования

Динамика физических процессов в электротехнических системах, как уже отмечалось в гл. 2, описывается в компактной форме векторным дифференциальным уравнением (2.1), коэффициенты которого связаны векторным уравнением (2.2). Вместе оба равенства образуют так называемую общую математическую модель ЭТС, которая отражает множество моделируемых физических процессов. Их конкретизация осуществляется с помощью фиксации постоянных коэффициентов, начальных условий и правой части дифференциальных уравнений. Отыскание таких решений для разных сочетаний фиксированных величин и есть сущность задач анализа переменных во времени физических процессов. В процессе проектирования задачи анализа интересны не только с точки зрения прямого наблюдения или регистрации динамических процессов. Путем многократного решения этих задач в различных вариантах можно осуществить также статистический анализ физических процессов. Результаты статистического анализа широко используются для различных целей, например оценки корреляционных связей между параметрами и процессами системы, чувствительности процессов к изменениям параметров и управляющих воздействий и, наконец, для сравнительного анализа ряда вариантов проектируемой системы.

Таким образом, задачи анализа физических процессов сводятся по существу к анализу результатов их моделирования. Для воспроизведения динамических процессов в ЭТС и их элементах используются разные методы математического моделирования, рассмотренные в гл. 3. Выбор того или иного метода зависит от желаемой точности и быстродействия модели в САПР. Наиболее точными являются моде-

ли, построенные на базе теоретических методов. Это объясняется достаточно высокой точностью расчетов переходных и установившихся процессов, которую обеспечивают методы теоретической электротехники, реализуемые с помощью ЭВМ. Теоретические модели многих ЭТС и их элементов получили широкое применение и признание. Однако их применение в САПР сталкивается с определенными трудностями. Во-первых, элементная база современных ЭТС постоянно расширяется и для ряда новых элементов хорошо апробированные математические модели еще не разработаны. Во-вторых, чем сложнее модель, тем она «медленнее» (меньше **быстродействие**).

Функциональный анализ ЭТС требует моделирования большого количества динамических процессов в установившихся и переходных режимах работы. Этот анализ необходим для оценки выполнения требований и условий технического задания, государственных стандартов, отраслевых норм и пр. Например, чтобы только оценить всплески и провалы напряжения в энергосистеме, нужно рассмотреть переходные процессы при подключении и отключении нагрузок различных величин и характера, внезапном коротком замыкании в различных режимах, форсировании возбуждения генератора, обрывах фаз и т. п. Для анализа требуемого множества физических процессов за разумно допустимое машиносчетное время необходимо иметь не одну модель, а целое семейство моделей с различной точностью и быстродействием. Поэтому наряду с точными, но «медленными» моделями появляется потребность также в грубых (менее точных), но зато «быстрых» моделях. Последние строятся в большинстве случаев на базе статистических или кибернетических методов (см. гл. 3).

Необходимость вариаций моделей появляется как при моделировании многих элементов ЭТС, так и системы в целом. Структура математической модели системы может меняться в зависимости от выбора координат для физических переменных отдельных элементов. При этом не обязательно, чтобы точность моделей всех элементов находилась на одном уровне. Например, нередко для глубокого и всестороннего анализа одного из элементов достаточно, чтобы точной была лишь его модель. Модели остальных элементов при этом могут быть грубыми. Таким образом, от моделей ЭТС в САПР требуются достаточно высокая универсальность и гибкость, которые позволяют сократить семейство используемых моделей и быстро **осуществить** их коренную перестройку. Поэтому взамен жестких традиционных моделей частного характера целесообразнее создавать цифровые модели для САПР, которые обеспечивают гибкую смену структуры и режимов работы ЭТС.

Такой подход был реализован с помощью пакета прикладных программ (ППП) «Динамика», который был предназначен для моделирования самолетных ЭЭС с любой конфигурацией и произвольным составом элементов [11]. Разработчики ППП «Динамика» исходили из следующих предпосылок:

1) ППП предназначен для широкого круга проектировщиков, не имеющих специальных познаний в области ЭВМ и программирования;

2) ППП состоит из трех главных и взаимосвязанных компонентов: математического, информационного и программно-технического. Каждый из компонентов может совершенствоваться и видоизменяться автономно, независимо от других.

Математический компонент включает цифровые модели элементов ЭЭС, уравнения связи между элементами, специальные уравнения математической стыковки элементов в случае различных координат переменных, а также алгоритмы сборки и решения полной цифровой модели ЭЭС с любой фиксированной структурой. Информационный компонент состоит из информационных массивов различного назначения: исходные, промежуточные и выходные данные моделирования и различные базы данных. Программно-технический компонент — комплекс специальных программ и средств вычислительной техники, который обеспечивает автоматизированное решение задач анализа динамических процессов ЭЭС.

Декомпозиция ЭЭС на функциональные элементы и функциональные связи для любой фиксированной структуры позволяет легко построить математическую модель, используя принцип структурного моделирования. Математическая модель ЭЭС образуется в виде совокупности математических моделей функциональных элементов и уравнений функциональных связей.

Таким образом, проблема математического моделирования ЭЭС в целом сводится к проблеме моделирования отдельных ее элементов, которая решается значительно проще. Для большинства функциональных элементов ЭЭС уже разработаны хорошо апробированные математические модели. Если получение математических моделей теоретическим путем затруднительно для отдельных элементов, то в этом случае можно использовать методы кибернетического моделирования.

Математические модели элементов могут изменяться в зависимости от их конструктивного исполнения, а также от структуры и режимов работы ЭЭС. В этих случаях для каждого элемента целесообразно формировать наборы (библиотеки) математических моделей, охватывающих все практически возможные ситуации. Каждая

модель при этом должна представляться в виде функционального многополюсника с различными входными и выходными величинами, которые выбираются таким **образом**, чтобы удовлетворить условиям сочленения с моделями других функциональных элементов согласно структуре ЭЭС.

Рассмотренный подход к математическому моделированию ЭЭС позволяет при сохранении элементной базы произвольно варьировать структурой системы, уточнять или заменять модели отдельных элементов без ущерба для моделей других элементов, наращивать без ограничений библиотеку моделей типовых элементов, т. е. обеспечивает возможность непрерывного развития математических моделей ЭЭС и ее элементов.

Изложенный выше процесс составления математической модели ЭЭС, а также расчет динамических процессов и анализа результатов автоматизируются с помощью ППП «Динамика». Структурно-функциональная схема этого ППП дана на рис. 7.1. В процессе функционирования ППП выделяются три этапа. На первом этапе формируется математическая модель ЭЭС заданной структуры; на втором этапе выполняется моделирование заданных динамических процессов; на третьем этапе осуществляется вывод и анализ результатов моделирования. На каждом этапе тестируются ошибки и выдаются диагностические сообщения.

В символическую библиотеку входят программные реализации математических моделей функциональных элементов ЭЭС, модели управления расчетными режимами ЭЭС, а также систематизированные сведения об элементах ЭЭС, т. е. элементная база данных. В библиотеку загрузочных модулей включены программы, обеспечивающие автоматическое построение математической модели ЭЭС.

Исходная информация для моделирования формируется из двух частей: информации, задаваемой пользователем, и информации, хранящейся в элементной базе данных. Информация, задаваемая пользователем, может включать структуру моделируемой ЭЭС, параметры функциональных элементов, метод интегрирования дифференциальных уравнений, последовательность моделируемых режимов ЭЭС, форму вывода результатов моделирования. Исходная информация, формируемая с помощью базы данных, ограничивается в основном параметрами и характеристиками функциональных элементов.

С учетом ориентации на пользователей-проектировщиков, не имеющих специальных знаний по программированию и вычислительной технике, для формирования и ввода задания специально разработан неалгоритмический входной язык, отличающийся про-

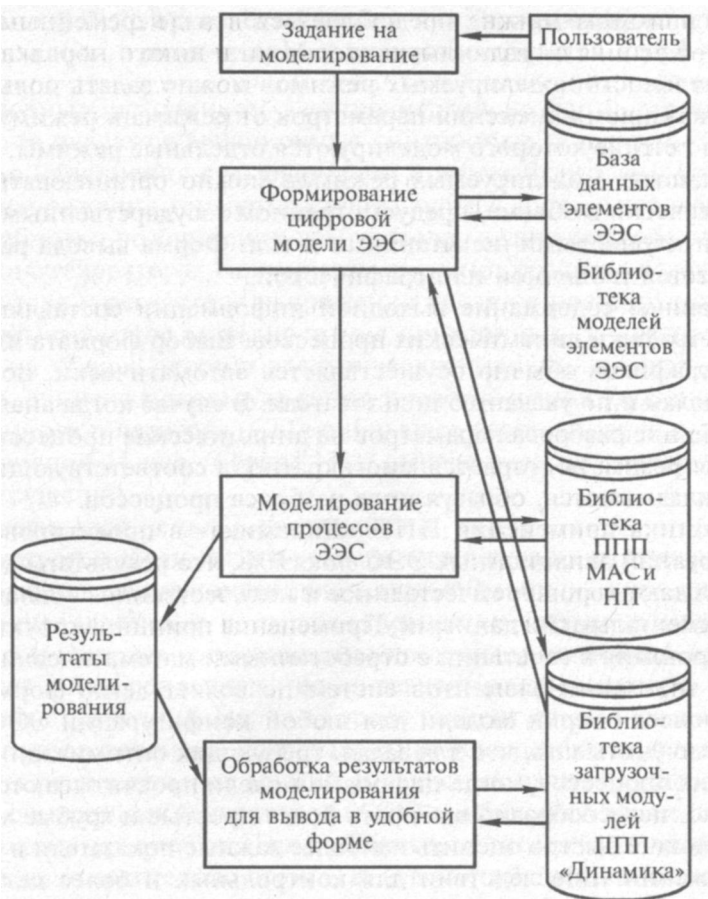


Рис. 7.1. Структурно-функциональная схема ППП «Динамика»

стотой и наглядностью. Это освобождает пользователя от необходимости детального изучения математических моделей и вычислительных методов.

Для задания структуры пользователю достаточно указать элементы ЭЭС и условия связи между входными и **ВЫХОДНЫМИ** величинами элементов. Параметры элементов надо задавать в том случае, если элементы не включены в базу данных. Разброс параметров можно задать в соответствии с нормальным или равномерным законом распределения вероятностей. Метод и шаг интегрирования можно задавать исходя из набора методов с фиксированным шагом (**Рунге—Кутта** четвертого порядка, Симпсона, Адамса, трапе-

ций и прямоугольников) или набора методов с переменным шагом (Рунге—Кутта четвертого порядка и Милна пятого порядка). Последовательность моделируемых режимов можно задать пользователем с указанием изменения параметров от режима к режиму и времени, в течение которого моделируются отдельные режимы. Последовательность моделируемых режимов можно организовать также автоматически в объеме, предусмотренном государственными стандартами, стендовыми испытаниями и т. п. Форма вывода результатов задается табличной или графической.

Основное содержание выходной информации составляют таблицы и графики динамических процессов. Выбор формата или масштаба графиков обычно **осуществляется** автоматически, но может быть сделан и по указанию пользователя. В случае когда анализируется влияние разброса параметров на динамические процессы, один и тот же режим повторяется многократно, а соответствующие кривые накладываются, образуя поле разброса процессов.

Практика применения ППП «Динамика» в проектировании и исследовании авиационных ЭЭС показала, что результаты моделирования дают хорошее качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными. Применение принципа структурного моделирования в сочетании с отработанными математическими моделями отдельных элементов систем позволяет легко формализовать процесс сборки модели для любой конфигурации ЭЭС. При этом надо учитывать, что для задач, требующих оптимизации динамических процессов, когда цифровые модели просчитываются многократно, целесообразно выбирать более простые и грубые модели, позволяющие быстро оценить наиболее важные показатели в первом приближении. Впоследствии для контрольных и более детальных поверочных расчетов можно заменить простые модели сложными, медленно действующими, но зато более точными. Возможность оперативной перестройки структуры, функциональных режимов и параметров ЭЭС позволяет также создавать имитационные модели, моделирующие реальное поведение системы в разных ситуациях, например в течение всего полета.

Разработка и включение в САПР подобного прикладного программного обеспечения сводит к минимуму действия проектировщиков ЭТС. От них требуется по существу лишь то, что они знают на профессиональном уровне — выбор моделей отдельных элементов системы из базы данных или разработка этих моделей в случае их отсутствия. Учитывая это, далее детально рассмотрим математические модели типовой элементной базы авиационных ЭЭС и конкретные примеры их функционального анализа.

§ 7.2. Математическое моделирование источников электроэнергии

Основным источником электроэнергии на борту современных самолетов являются авиационные синхронные генераторы бесконтактного исполнения с возбудителем и подвозбудителем. Регулирование напряжения генератора производится путем управления током в обмотке возбуждения возбудителя, питающего обмотку возбуждения генератора. Источником питания обмотки возбуждения возбудителя и регулятора напряжения является подвозбудитель.

Математическое моделирование синхронных генераторов опирается на общую теорию электрических машин, которая, в свою очередь, широко использует метод преобразования координат. Для синхронного генератора (СГ) наибольшее распространение получили уравнения **Парка—Горева** [31], выведенные на основе следующих допущений:

- 1) магнитная цепь СГ не насыщена;
- 2) потери в стали и гистерезисные свойства не учитываются;
- 3) распределение намагничивающих сил и индукций в пространстве синусоидально, т. е. высшие гармоники тока не учитываются;
- 4) индуктивные сопротивления постоянны по осям d , q ;
- 5) активные сопротивления не зависят от температуры.

Запись уравнений **Парка—Горева** зависит от выбора направленных векторов переменных, чередования координатных осей d , q , O , системы относительных единиц и базисных величин. Для авиационных синхронных генераторов (АСГ) наибольшее применение нашли полные уравнения **Парка—Горева**, записанные в мгновенных значениях относительно осей d , q , 0 в системе относительных единиц Xad .

Исследования АСГ показывают, что пренебрежение насыщением оказывает большое влияние на достоверность результатов, поскольку АСГ работают в режимах предельных электромагнитных нагрузок. Поэтому обычно насыщение магнитопровода АСГ учитывается по продольной оси d . При этом анализ результатов моделирования с учетом насыщения с помощью характеристики холостого хода показал наличие большой погрешности в определении максимальных всплесков напряжения, характерных для самолетных электроэнергетических систем (СЭС). Поэтому для исследования процессов в АСГ предлагается использовать более точный метод учета насыщения по отдельным характеристикам статора и ротора.

Исходя из приведенных соображений в качестве исходных уравнений АСГ в данной работе приняты следующие уравнения:

$$\dot{U}_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - (1 + s_r)\Psi_q - r_{cr}i_d; \quad (7.1)$$

$$U_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} + (1 + s_r)\Psi_d - r_{cr}i_q; \quad (7.2)$$

$$U_f = \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f; \quad (7.3)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + r_{1d}i_{1d}; \quad (7.4)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + r_{1q}i_{1q}; \quad (7.5)$$

$$\Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma}i_d; \quad (7.6)$$

$$\Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma}i_q; \quad (7.7)$$

$$\Psi_f = \Psi_{\delta f} + x_{\sigma f}(i_f - F_p); \quad (7.8)$$

$$\Psi_{1d} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma 1d}i_{1d}; \quad (7.9)$$

$$\Psi_{1dq} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma 1q}i_{1q}; \quad (7.10)$$

$$\Psi_{\delta d} \left(\frac{1}{x_{ad}} + m_c \right) = i_d + i_{1d} + i_f - F_p; \quad (7.11)$$

$$\Psi_{\delta q} \frac{1}{x_{aq}} = i_q + i_{1q}; \quad (7.12)$$

$$\Psi_{\delta}^2 = \Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2; \quad (7.13)$$

$$m_c = F_1(\Psi_{\delta}^2); \quad (7.14)$$

$$F_p = F_2(\Psi_f). \quad (7.15)$$

Магнитные характеристики статора $m_c = F_1(\Psi_{\delta}^2)$ и ротора $F_p = F_2(\Psi_f)$ рассчитываются по выражениям:

$$\Psi_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\Phi_{\delta 0}}; \quad (7.16)$$

$$m_c = \frac{F_z(\Psi_{\delta}) + F_a(\Psi_{\delta})}{2W_f i_{f\alpha 3} \Psi_{\delta}}; \quad (7.17)$$

$$\Psi_f = \Psi_\delta \left[1 + x_{\delta f} \left(\frac{1}{x_{ad}} + m_c \right) \right]; \quad (7.18)$$

$$F_p = \frac{i_f(\Psi_\delta)}{i_{\beta a3}} - (\Psi_f - \Psi_\delta) \frac{1}{x_{\delta f}}; \quad (7.19)$$

$$i_{\delta a3} = \frac{F_{\delta 0} x_{ad}}{2W_f}. \quad (7.20)$$

Обозначения величин, используемых в уравнениях (7.1)–(7.20), общеизвестны.

Исходные уравнения СГ необходимо преобразовать к виду, удобному для моделирования. Учитывая сложность и переменный характер структуры СЭС в полетных режимах, наиболее универсальным и целесообразным для СЭС является принцип структурного моделирования. В данном случае этот принцип предполагает преобразование уравнений к виду операторных функций передачи, чтобы все «выходные» функции выражались через «входные» алгебраическими или дифференциальными зависимостями. Кроме того, для уменьшения количества уравнений имеет смысл уравнения (7.1)–(7.15) привести к виду:

$$U_d = -\frac{p\Psi_d}{\omega_0} - (1 - s_r)\Psi_q - r_{cr}i_d; \quad (7.21)$$

$$U_q = -\frac{p\Psi_q}{\omega_0} + (1 - s_r)\Psi_d - r_{cr}i_q; \quad (7.22)$$

$$U_0 = -i_0 r_0 - \frac{x_0}{\omega_0} \frac{di_0}{dt}; \quad (7.23)$$

$$\Psi_{\delta d} = \left[\frac{1}{x_{\delta f}} \Psi_f + \frac{1}{x_\sigma} \Psi_d - \Psi_{\delta d} m_c (\Psi_\delta^2) \right] \times \quad (7.24)$$

$$\times \frac{x_{ad} x_{\delta f} x_\sigma}{x_{ad} x_\gamma + x_\sigma x_{\delta f} + x_{ad} x_{\delta f}} \frac{(x_{\sigma 1d} / r_{1d} \omega_0) p + 1}{\left(\frac{x_{\sigma 1d}}{r_{1d} \omega_0} + \frac{x_{ad} x_{\delta f} x_\sigma}{x_{ad} x_\sigma + x_\sigma x_{\delta f} + x_{ad} x_{\delta f}} \cdot \frac{1}{r_{1q} \omega_0} \right) p + 1};$$

$$\Psi_{\delta q} = \frac{x_{aq}}{x_\sigma + x_{aq}} \Psi_q \frac{(x_{\sigma 1q} / r_{1d} \omega_0) p + 1}{\left(\frac{x_{\sigma 1q}}{r_{1q} \omega_0} + \frac{x_{aq} x_\sigma}{x_{aq} + x_\sigma} \cdot \frac{1}{r_{1q} \omega_0} \right) p + 1}; \quad (7.25)$$

$$\Psi_f = \frac{\Psi_{\delta d} + \frac{x_{\sigma f}}{x_{ad}} \frac{U_f}{U_{fex}} - x_{\sigma f} F_p}{\frac{x_{\sigma f}}{r_f \omega_0} p + 1}; \quad (7.26)$$

$$\Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma} i_d; \quad (7.27)$$

$$\Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma} i_q; \quad (7.28)$$

$$i_f = \frac{1}{x_{\sigma f}} \Psi_f - \frac{1}{x_{\sigma f}} \Psi_{\delta d} + F_p (\Psi_f). \quad (7.29)$$

Уравнение (7.23) в симметричных режимах работы СГ может не рассматриваться, поскольку ток нулевой последовательности в этих режимах отсутствует ($i_0 = 0$).

При алгоритмизации расчета процессов в СГ необходимо учесть возможность стыковки моделей СГ и моделей других элементов СЭС. В качестве примера, иллюстрирующего стыковку моделей, рассмотрим наиболее распространенную с точки зрения моделирования систему генерирования «генератор—регулятор—статическая нагрузка». На этом примере покажем, что структура уравнений СГ будет изменяться для различных режимов работы. В качестве характерных для такой системы следует рассмотреть режимы включения возбуждения СГ на холостом ходу, подключения и отключения **нагрузки**, короткого замыкания и выхода из режима короткого замыкания.

Структура уравнений для СГ и статической нагрузки будет изменяться в соответствии с рис. 7.2, на котором представлены три блок-схемы (структуры *A*, *B*, *C*).

Структура *A* используется для расчета режимов включения возбуждения на холостом ходу, роста, снижения нагрузки, выхода из режима короткого замыкания. Для структуры *A* уравнения статической активно-индуктивной нагрузки (*H*) имеют вид, предлагаемый в соответствии с блок-схемой:

$$i_d = \frac{\frac{1}{r_H} U_d - \frac{x_H}{r_H} i_q}{\frac{x_H}{r_H \omega_0} p + 1}; \quad (7.30)$$

$$i_q = \frac{\frac{1}{r_H} U_q + \frac{x_H}{r_H} i_d}{\frac{x_H}{r_H \omega_0} p + 1}. \quad (7.31)$$

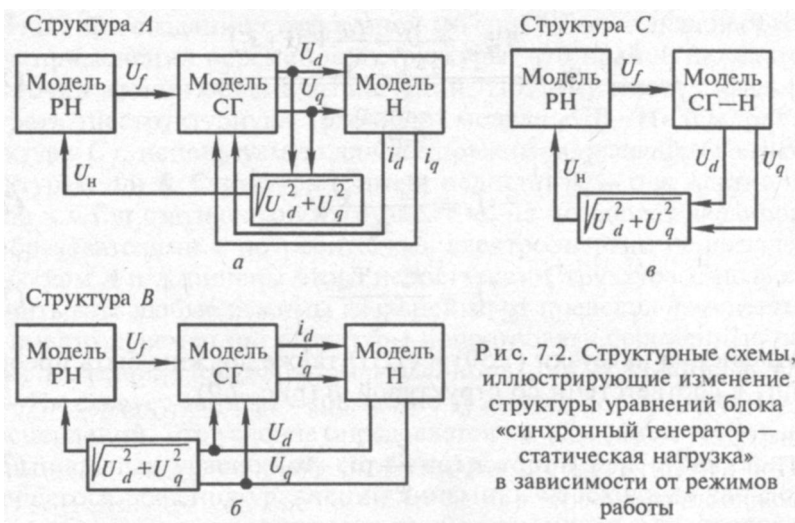


Рис. 7.2. Структурные схемы, иллюстрирующие изменение структуры уравнений блока «синхронный генератор — статическая нагрузка» в зависимости от режимов работы

Анализ уравнений (7.21)—(7.31) показывает, что эти уравнения соответствуют режимам включения возбуждения СГ на холостом ходу, подключения и отключения нагрузки, выхода из режима короткого замыкания, но не соответствуют режиму короткого замыкания. При режиме короткого замыкания (т. е. $z_n = 0$ или $r_n = 0, x_n = 0$) из

уравнения (7.30) следует, что $\frac{U_d}{r_n} \rightarrow \infty$, т. е. $i_d \rightarrow \infty$ (машинная бесконечность ведет к переполнению регистров, т. е. к неустойчивому

решению). Аналогично, из уравнения (7.31) $\frac{U_q}{r_n} \rightarrow \infty$, т. е. $i_q \rightarrow \infty$

Таким образом, уравнения (7.30) и (7.31) теряют смысл в режимах короткого замыкания. Отсюда вывод: в режимах короткого замыкания уравнения СГ и Н не могут быть описаны в соответствии со структурой А (рис. 7.2), когда входами модели СГ являются токи (i_d, i_q), а выходами — напряжения (U_d, U_q)

В режимах короткого замыкания уравнения СГ и Н должны быть представлены в виде, соответствующем структуре В. В этом случае уравнения (7.24), (7.25), (7.27), (7.29) можно оставить без изменения, а уравнения (7.21), (7.22), (7.26), (7.28) необходимо преобразовать к виду:

$$\Psi_d = \frac{\Psi_{\delta d} - \frac{r_{\text{ст}}}{x_{\sigma}} U_d - \frac{r_{\text{ст}}}{x_{\sigma}} \Psi_q (1 + s_r)}{\frac{x_{\sigma}}{r_{\text{ст}} \omega_0} p + 1}; \quad (7.32)$$

$$\Psi_q = \frac{\Psi_{\delta q} - \frac{r_{\text{ст}}}{x_\sigma} U_q + \frac{r_{\text{ст}}}{x_\sigma} \Psi_d (1 + s_r)}{\frac{x_\sigma}{r_{\text{ст}} \omega_0} p + 1}; \quad (7.33)$$

$$i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{\delta q}}{x_\sigma}; \quad (7.34)$$

$$i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{\delta d}}{x_\sigma}. \quad (7.35)$$

Уравнения нагрузки (7.30) и (7.31) также должны быть преобразованы в соответствии со структурой *B* (рис. 7.2):

$$U_d = r_n i_d + \frac{x_n}{\omega_0} p i_d + x_n i_q; \quad (7.36)$$

$$U_q = r_n i_q + \frac{x_n}{\omega_0} p i_q - x_n i_d. \quad (7.37)$$

Анализ уравнений (7.36) и (7.37) показывает, что эти уравнения не могут быть использованы в режимах, сильно отличных от режима короткого замыкания. Например, рассмотрим режим холостого хода (т. е. $z_n = \infty$ или $r_n = \infty$; $x_n = \infty$). Тогда из уравнений (7.36) и (7.37) следует, что $U_d \rightarrow \infty$; $U_q \rightarrow \infty$, так как члены уравнения, содержащие r_n и x_n , стремятся к бесконечности. При подстановке значений U_d и U_q в уравнения (7.32)—(7.35) система уравнений становится неустойчивой. Таким образом, структура *B* не удовлетворяет в режимах, сильно отличающихся от режима короткого замыкания. Остается ответить на вопрос: начиная с какого значения необходимо перейти к расчетам по структуре *A*, т. е. найти критическое значение $z_{н.кр}$?

Проведенные расчеты показали, что эта величина зависит от метода интегрирования (количества итераций на каждом шаге), величины шага интегрирования и т. п. В результате таких исследований $z_{н.кр}$ было определено эмпирически в пределах $z_{н.кр} \leq 0,2 z_{н.ном}$. Таким образом, с помощью уравнений, соответствующих структуре *A*, могут быть решены задачи моделирования в блоке «СГ—Н», за исключением режима короткого замыкания или близких к нему режимов, когда $z_n \leq 0,2 z_{н.ном}$ ($S_n = 5 S_{ном}$). В случае когда $z_n \leq z_{н.кр}$, необходимо перейти к структуре *B*. Налагаемые на каждую из рассмотренных структур *A* и *B* ограничения предполагают изменение формы записи уравнений, т. е. программной реализации в процессе вычислений в зависимости от величины z_n .

Итак, при создании структурной модели СГ возникла необходимость применения переменной структуры, что крайне нежелательно с точки зрения объема вычислений. Поэтому имеет смысл рассмотреть «неструктурную» (блочную) модель «СГ—Н» (см. рис.7.2, структура С), используемую для всех режимов, рассчитываемых по структурам А и В. Структура С имеет недостаток — она жестко привязана к СГ и статической нагрузке, т. е. не позволяет варьировать преобразователями и потребителями электроэнергии на выходе СГ (структуры А и В лишены этого недостатка). Структура С позволяет рассчитывать любые режимы независимо от пределов изменения z_n , т. е. вместо переменной структуры использовать переменные параметры моделей. При блочном моделировании уравнения в блоке «СГ—Н» следует записать совместно и выразить относительно потокосцеплений. Это условие определяется на основании теории дифференциальных уравнений, согласно которой для существования сходящегося решения уравнений динамики необходимо удовлетворить требование непрерывности всех переменных. Это требование распространяется и на производные. Уравнения СГ и Н, разрешенные относительно потокосцеплений, обладают этими свойствами.

Для того чтобы выразить уравнения в блоке «СГ—Н» через потокосцепления $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_{\delta d}, \Psi_{\delta q}$, токи и напряжения следует выразить через эти потокосцепления. Из уравнений (7.27) и (7.38) для i_d и i_q получим выражения:

$$i_d = (\Psi_d - \Psi_{\delta d})/x_\sigma; \quad (7.38)$$

$$i_q = (\Psi_q - \Psi_{\delta q})/x_\sigma. \quad (7.39)$$

Напряжения U_d, U_q выразим через потокосцепления (см. уравнения (7.36), (7.37)) и подставим в уравнения (7.32) и (7.33), откуда получим:

$$\begin{aligned} p\Psi_d = & -\frac{(r_{\sigma} + r_n)\omega_0}{x_\sigma + x_n}(\Psi_d - \Psi_{\delta d}) + \frac{x_n}{x_\sigma + x_n}p\Psi_{\delta d} + \\ & + \frac{x_n\omega_0}{x_\sigma + x_n}(\Psi_q - \Psi_{\delta q}) - \frac{(1+s_r)x_\sigma\omega_0}{x_\sigma + x_n}\Psi_q; \end{aligned} \quad (7.40)$$

$$\begin{aligned} p\Psi_q = & -\frac{(r_{\sigma} + r_n)\omega_0}{x_\sigma + x_n}(\Psi_q - \Psi_{\delta q}) + \frac{x_n}{x_\sigma + x_n}p\Psi_{\delta q} - \\ & - \frac{x_n\omega_0}{x_\sigma + x_n}(\Psi_d - \Psi_{\delta d}) + \frac{(1+s_r)x_\sigma\omega_0}{x_\sigma + x_n}\Psi_d. \end{aligned} \quad (7.41)$$

Совместное решение уравнений (7.24)–(7.26), (7.29) и (7.40), (7.41) позволяет моделировать переходные процессы в блоке «СГ–Н» без учета ограничений на величину $z_{н}$. В этом случае токи и напряжения, описываемые классом функций с разрывом первого рода, можно получить как величины, зависящие от потокосцеплений, по уравнениям (7.38) и (7.39) для токов i_d и i_q и по уравнениям, полученным подстановкой (7.38) и (7.39) в уравнения (7.21) и (7.22) для U_d , U_q :

$$U_d = -\frac{p\Psi_d}{\omega_0} - (1 + s_r)\Psi_q - \frac{r_{ст}}{x_\sigma}(\Psi_d - \Psi_{\delta d}); \quad (7.42)$$

$$U_q = -\frac{p\Psi_q}{\omega_0} + (1 + s_r)\Psi_d - \frac{r_{ст}}{x_\sigma}(\Psi_q - \Psi_{\delta q}). \quad (7.43)$$

Таким образом, структура С (рис. 7.2) позволяет рассматривать режимы работы независимо от величины $z_{н}$. Поэтому пользоваться формой записи уравнений относительно потокосцеплений рекомендуется при моделировании такой последовательности режимов работы СГ на статическую нагрузку, когда необходимо в их числе рассмотреть режим короткого замыкания. Структурной формой записи уравнений СГ, выраженной относительно напряжений (структура А), рекомендуется пользоваться во всех остальных случаях. Эта форма позволит подключать различные типовые нагрузки, не изменяя структуру уравнений, описывающих работу СГ. Например, такая форма записи позволит рассмотреть одновременную работу нескольких потребителей от СГ (рис. 7.3), в то время как структура С жестко привязана к блоку «СГ – статическая нагрузка» и не позволяет

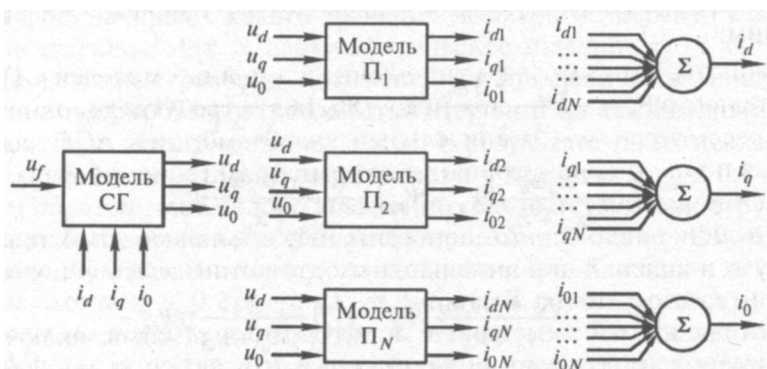


Рис. 7.3. Моделирование параллельной работы потребителей электроэнергии от СГ

варьировать модели преобразователей и потребителей электроэнергии на выходе модели СГ.

Применение уравнений, соответствующих структурам *A* и *C*, позволит обойти изменение структур (при переходе от *A* к *B*), т. е. структуру *B* можно вообще исключить из рассмотрения. Таким образом, для цифрового моделирования математическая модель АСГ выбрана в двух вариантах: структурная модель СГ, соответствующая структуре *A*, и блочная модель «СГ—Н», соответствующая структуре *C*.

Возбудители и **под возбудители** генераторов можно моделировать с различной степенью детализации. В общем случае можно использовать те же уравнения, что и для основного генератора, и учесть в параметрах специфику конструктивного исполнения. Тогда возбудитель можно описать приближенно одним апериодическим звеном с коэффициентом усиления и постоянной времени обмотки возбуждения возбудителя. Это приемлемо при условии дополнительного учета насыщения согласно характеристике холостого хода. Подвозбудитель, как правило, достаточно описать линейной аппроксимацией внешней характеристики.

Таким образом, возбудитель и подвозбудитель генератора моделируются достаточно простыми уравнениями, а основные СГ — полными уравнениями **Парка—Горева** с учетом насыщения. При решении задач в сложных структурах СЭС возникает вопрос о возможности использования упрощенных моделей **Парка—Горева** и для основных АСГ, что позволило бы рационально использовать ресурсы вычислительной техники. Единое мнение о возможности и допустимой степени упрощения моделей СГ и, в частности, для СЭС пока не сформировалось, хотя работы в этом направлении проводятся.

Свойства и взаимосвязь упрощенных и полных моделей СГ применительно к СЭС изучены недостаточно и требуют дополнительного рассмотрения. Сравнительный анализ моделей АСГ, составленных по полным и упрощенным уравнениям **Парка—Горева**, произведен применительно к рассматриваемым СЭС.

В отличие от традиционных критериев оценки моделей по количеству и порядку дифференциальных уравнений здесь использованы критерии точности и машинного времени.

Исходя из этих критериев моделируются режимы включения возбуждения, подключения номинальной нагрузки и отключения нагрузки.

Результаты моделирования приведены в **табл.7.1.**

Таблица 7.1

Уравнения, описывающие процессы СГ	Процессорное время счета, с	Экономленое время относительно п. 1, %
1. Расчет с учетом насыщения по отдельным характеристикам статора и ротора на основании полных уравнений Парка—Горева	128	—
2. Влияние трансформаторной ЭДС не учтено	120	6,25
3. Влияние трансформаторной ЭДС и демпферных обмоток не учтено	117	8,6
4. Упрощенные уравнения Парка—Горева без учета насыщения, трансформаторной ЭДС, демпферных контуров	96	25

Анализ результатов моделирования показал, что пренебрежение влиянием трансформаторных ЭДС и демпферных контуров существенного влияния на переходные процессы в рассматриваемых режимах не оказывает, но при этом и сэкономленное время (6...9%) также не существенно. **Расчеты** же, проведенные на основании упрощенных уравнений **Парка—Горева** без учета насыщения, дают большую погрешность (около 50% по отношению к эксперименту), что не позволяет использовать их при расчетах, несмотря на существенную экономию машиносчетного времени. Поэтому предпочтение при построении математической модели АСГ было отдано полным уравнениям **Парка—Горева** с учетом насыщения по отдельным характеристикам статора и ротора.

Генераторы постоянного тока, как коллекторные, так и бесконтактные, представляют по сути синхронные генераторы с последующим выпрямлением переменного тока в постоянный. Поэтому для них можно использовать математические модели, аналогичные моделям возбудителей. Наконец, аккумуляторные батареи можно описать подобно возбудителям с помощью внешней характеристики, а во многих случаях еще проще — источником постоянной ЭДС.

§ 7.3. Математическое моделирование регуляторов напряжения

Регуляторы напряжения (РН), используемые в СЭС, различаются по быстродействию, конструктивному исполнению и элементной базе, способам формирования сигналов управления.

В зависимости от характера воздействия на обмотку возбуждения СГ (либо обмотку возбуждения возбудителя СГ) РН подразделяются на РН непрерывного или дискретного действия. В РН *непрерывного действия* управляющее воздействие (как правило, это ток обмотки возбуждения возбудителя) изменяется пропорционально сигналу рассогласования напряжения в точке регулирования по отношению к номинальному напряжению. К таким регуляторам относятся угольные РН и РН на магнитных усилителях. В РН *дискретного действия* управляющее воздействие формируется в зависимости от дискретных значений сигнала рассогласования. В этом случае непрерывный сигнал квантуется как по времени, так и по уровню. Например, рассматриваемые здесь транзисторно-тиристорные РН относятся к РН с фазоимпульсной модуляцией (**ФИМ**), а транзисторные (электронные) РН относятся к РН с широтно-импульсной модуляцией (**ШИМ**). Отличия в способах формирования управляющих сигналов и элементной базы приводит к существенным отличиям РН не только по принципиальным схемам, но и по функциональному составу блоков, входящих в их состав. Указанное обстоятельство не позволяет разработать единую обобщенную модель РН, учитывающую все виды существующих в СЭС РН, как это было сделано для СГ. Поэтому по мере появления РН соответственно создавались их математические модели.

В современных СЭС трехфазного переменного тока используются три основных типа РН: РН на магнитных усилителях, транзисторно-тиристорные РН и транзисторные РН, разработанные с использованием микросхем. (Угольные РН не удовлетворяют стандартным требованиям и в настоящее время не используются.) Каждый из перечисленных типов РН имеет свои модификации, однако общий принцип действия каждого в отдельности типа РН остается неизменным. Поэтому далее рассматриваются математические модели этих трех основных типов РН. Учет модификаций в этом случае можно производить с помощью изменения исходных данных РН (коэффициентов, параметров, постоянных времени и т. п.).

Моделирование регулятора напряжения с магнитными усилителями. РН с магнитными усилителями предназначен для автоматического регулирования возбуждения СГ и стабилизации напряжения.

Регулирование напряжения СГ при изменении величины и характера нагрузки СЭС осуществляется путем изменения тока возбуждения возбудителя $I_{вв}$, воздействующего, в свою очередь, на ток возбуждения СГ.

РН включает в своем составе измерительный орган (ИО), ток на выходе которого зависит от отклонения напряжения СГ от заданно-

го значения, и двухкаскадный магнитный усилитель (МУ) с внутренней обратной связью (MU_I и MU_{II}), питающий обмотку возбуждения возбуждителя В.

Измерительный орган представляет собой мостовую схему, в два плеча которого включены омические сопротивления, а в два другие — нелинейные элементы — стабилитроны. Выходная диагональ моста включена на среднее напряжение генератора через выпрямитель и понижающий трансформатор.

Сигнал с измерительного органа I_{II} поступает на обмотки управления магнитного усилителя MU_I . Подмагничивание MU_{II} , обеспечивающее самовозбуждение и работу МУ на заданном участке его характеристики, осуществляется током смещения.

Для стабилизации напряжения в переходных режимах применяется стабилизирующий трансформатор, первичная обмотка которого включена в цепь I_{II} , а сигнал со вторичной обмотки поступает на обмотку управления магнитного усилителя MU_I . Стабилизирующий трансформатор работает только в переходных режимах и выдает сигнал, пропорциональный изменению тока возбуждения, ослабляя действие обмотки управления и повышая тем самым устойчивость системы возбуждения и регулирования СГ.

Принцип действия РН состоит в следующем. При увеличении напряжения в точке регулирования МДС F' , создаваемая обмоткой управления первого каскада магнитного усилителя MU_I , также увеличивается. Вследствие этого снижается ток в управляющей обмотке второго каскада магнитного усилителя MU_{II} , а следовательно, и МДС $MU_{II} F''$. При практически неизменной МДС обмотки смещения рабочая точка MU_{II} , положение которой определяется разностью МДС обмоток смещения и управления, сдвигается влево (рис. 7.4). При этом напряжение и ток в цепи возбуждения уменьшаются и напряжение СГ стремится к первоначальному значению.

Математическая модель РН на магнитных усилителях предложена и апробирована в Московском энергетическом институте. Удовлетворительное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментов позволяет выбрать указанную математическую модель и на ее базе составить структурную модель РН для использования в гибкой цифровой модели.

Исходные уравнения РН следует преобразовать к виду, удобному для моделирования, с учетом принципа структурного моделирования. Согласно рис. 7.1 модель системы возбуждения и регулирования напряжения характеризуется напряжением в точке регулирования в качестве «входной» функции и напряжением возбуждения СГ в качестве «выходной», т. е., записывая уравнения РН, необхо-



ДИМО учесть это и выразить напряжение возбуждения СГ относительно напряжения в точке регулирования.

Измерительный орган РН имеет статическую характеристику, приведенную на рис. 7.5. К рассмотрению принимается прямая часть характеристики, показанная пунктиром. Такое допущение справедливо, поскольку в нелинейной зоне ток I_n вызывает насыщение МУ₁, в результате чего он оказывается нечувствительным к величине тока I_n . Рабочая зона МУ₁ характеризуется линейной зависимостью тока I_n от напряжения в точке регулирования $U_{тр}$. С учетом этого допущения уравнение ИО можно записать в виде

$$I_n = k_1 (U_o + U_{тр}). \quad (7.44)$$

Наличие стабилизирующего трансформатора приводит к дифференцированию $I_{вв}$ и составляющей намагничивающей силы первого каскада усилителя, образованной сигналом по отклонению. Таким образом, уравнение намагничивающей силы F' может быть представлено в виде

$$F' = I_n + T_{ст} \frac{dI_n}{dt} - k \frac{dI_{вв}}{dt}, \quad (7.45)$$

где $T_{ст}$ — постоянная времени статора.

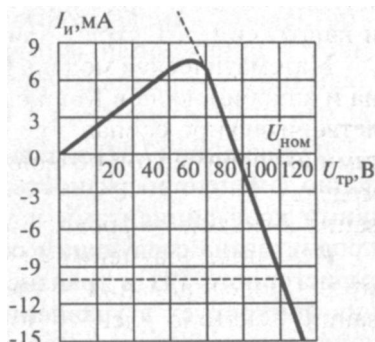


Рис. 7.5. Статическая характеристика измерительного органа РН

В уравнениях РН инерционность МУ может быть учтена в виде аperiodического звена первого порядка, постоянная времени которого $T_{МУ}$ равна сумме постоянных времени МУ, т. е.

$$F' = T_{МУ} \frac{dF''}{dt} + F'' \quad (7.46)$$

Учет нелинейности МУ производится по экспериментальной статической характеристике, приведенной на рис. 7.5:

$$U_{вв} = f(F''). \quad (7.47)$$

Для цепи возбуждения возбудителя можно записать уравнение

$$U_{вв} = L_{вв} \frac{dI_{вв}}{dt} + r_{вв} I_{вв}, \quad (7.48)$$

откуда напряжение возбуждения СГ U_f для случая нелинейной характеристики холостого хода можно получить из уравнения

$$U_f = f(I_{вв}). \quad (7.49)$$

Таким образом, уравнения (7.44)—(7.49) описывают работу РН на МУ. В операторной форме

$$\Delta U = k_{и}(U_o + U_{тп}); \quad (7.50)$$

$$F' = (pT_{ст} + 1) \Delta U - k_{ст} p I_{вв}; \quad (7.51)$$

$$F'' = \frac{1}{pT_{МУ} + 1} F'; \quad (7.52)$$

$$U_{вв} = f(F''); \quad (7.53)$$

$$I_{вв} = \frac{1/r_{вв}}{1 + pT_{вв}} U_{вв}; \quad (7.54)$$

$$U_f = f(I_{вв}). \quad (7.55)$$

В уравнении (7.51) значение тока измерительного органа $I_{и}$ умышленно заменено на разность напряжений ΔU и учтено соответствующими коэффициентами в уравнениях (7.51) и (7.52). Эта замена продиктована следующим соображением: в моделях транзисторно-тиристорного РН и транзисторного РН рассогласование напряжения фигурирует в уравнениях измерительного органа, и с целью унификации математических моделей желательно, чтобы в уравнениях РН на МУ также фигурировало ΔU . В структурной форме модель РН в виде уравнений (7.50)—(7.55) показана на рис. 7.6.

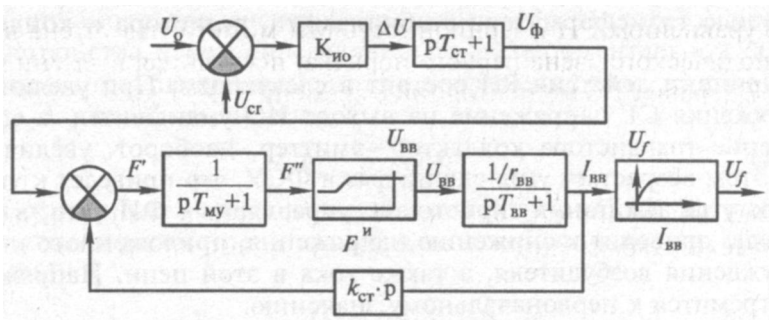


Рис. 7.6. Структурная модель РН с магнитными усилителями

Моделирование транзисторно-тиристорного регулятора напряжения.

РН (в транзисторно-тиристорном исполнении) представляет «второе поколение» РН, предназначенных для работы с широким парком СГ различной мощности. РН поддерживает напряжение СГ в заданных пределах, изменяя ток $I_{\text{вв}}$ в обмотке возбуждения возбудителя (ОВВ), как и в предыдущем случае с РН на МУ.

РН состоит из следующих функциональных узлов: измерительного органа (ИО), фазосдвигающего устройства (ФСУ), трех формирователей импульсов (ФИ) (по одному на каждую фазу), выходного усилителя мощности (УМ), стабилизирующего контура (СК).

Напряжение генератора выпрямляется однополупериодным выпрямителем и подается на вход нелинейного моста, в плечи которого включены нелинейные элементы — стабилитроны. На выходе моста подключен переход **эмиттер—база** транзистора. Сопротивление **коллектор—эмиттер** транзистора играет роль управляемого сопротивления в трехфазном фазосдвигающем устройстве типа **R—C-цепочки**. Величина сопротивления коллектор-эмиттер транзистора зависит от величины напряжения в точке регулирования. Изменение величины сопротивления от минимального до максимального значения ведет к изменению фазы выходного напряжения ФСУ, которое управляет работой формирователей импульсов. ФИ является источником управляющих импульсов для тиристоров выходного усилителя **мощности** и **состоит из** модулятора и формирующего устройства. Выходной усилитель представляет собой трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Для обеспечения регулирования угла открытия тиристоров от 0 до 180° напряжения питания анодных цепей и цепей управления сфазированы между собой. Для устойчивой работы РН и исключения автоколебаний в РН используется гибкая обратная связь с

помощью трансформатора стабилизации, резистора и конденсатора.

Принцип действия РН состоит в следующем. При увеличении напряжения СГ напряжение на выходе ИО уменьшится, а сопротивление транзистора **коллектор—эмиттер**, наоборот, увеличится. При этом возрастает угол сдвига фаз в ФСУ, что приведет к увеличению угла зажигания тиристорov, управляемых ФИ. Это, в свою очередь, приводит к снижению напряжения, приложенного к цепи возбуждения возбудителя, а также тока в этой цепи. Напряжение СГ стремится к первоначальному значению.

Математическая модель транзисторно-тиристорного РН известна и обеспечивает удовлетворительное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментов. В связи с этим на базе математической модели можно составить структурную модель РН и включить ее в ГЦМ.

При составлении математической модели РН приняты следующие допущения:

- высшие гармоники в выходной цепи напряжения РН являются следствием дискретного характера работы выпрямителей с частотой питающего напряжения, и выходной усилитель мощности рассматривается в виде непрерывного элемента системы;
- вентили преобразователя идеальны, потери в них отсутствуют, коммутации вентилей в статических и динамических режимах происходят аналогично.

При принятых допущениях выходной усилитель мощности рассматривается как непрерывный безынерционный элемент, на выходе которого подключена ОВВ:

$$U_{\text{вв}} = k_y U_y, \quad (7.56)$$

где $U_{\text{вв}} \geq 0,23 \text{ В} \approx 0$ — напряжение на выходе системы управления выпрямителя; k_y — коэффициент усиления, зависящий от напряжения источника питания ПВ.

Для напряжения источника питания ПВ может быть записано выражение

$$U_{\text{пв}} = E_{\text{пв}} - r_{\text{пв}} I_{\text{вв}}. \quad (7.57)$$

С учетом уравнения (7.57) для выходного напряжения системы управления выпрямителя U_y можно записать выражение

$$U_y = U_{\text{пв}} - U_{\text{вв}} = E_{\text{пв}} - r_{\text{пв}} I_{\text{вв}} - U_{\text{вв}}, \quad (7.58)$$

где U_y является функцией напряжения **коллектор—эмиттер**

$$U_y = f(U_{\text{к-э}}). \quad (7.59)$$

Нелинейность транзистора, используемого в цепи фазосдвигающего устройства, также определяется по экспериментальной характеристике, отражающей зависимость напряжения **коллектор—эмиттер** $U_{к-э}$ от тока **база—эмиттер** I_6 .

$$U_{к-э} = f(I_6). \quad (7.60)$$

На основании анализа нелинейности (7.59) и (7.60) могут быть объединены и рассмотрены как зависимость U_y от тока базы транзистора **ФСУ** I_6 .

$$U_y = f(U_6), \quad (7.61)$$

так как между ними нет существенных инерционных элементов.

Экспериментальная зависимость (7.61) приведена на рис. 7.7.

Ток базы определяется по схеме замещения цепи вторичной обмотки трансформатора стабилизации и включает две составляющие I_6' и I_6'' .

$$I_6' = \frac{k_2(pT_3 + 1)}{pT_4 + 1} \Delta U; \quad (7.62)$$

$$I_6'' = \frac{pT_5}{pT_4 + 1} I_{вв}; \quad (7.63)$$

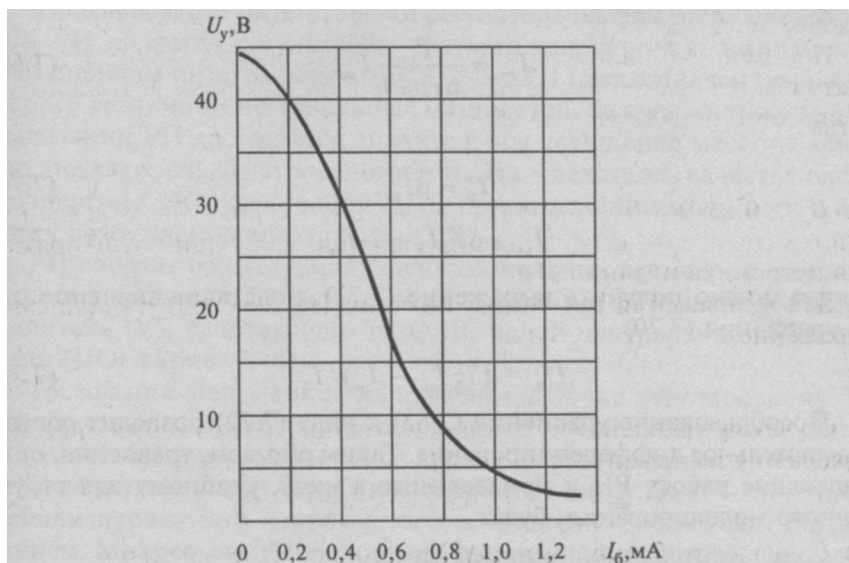


Рис. 7.7. Зависимость напряжения управления U_y от тока базы транзистора I_6

$$I_6 = I'_6 - I''_6; \quad I_6 \geq 0, \quad (7.64)$$

где T — постоянная времени структурных элементов.

Отклонение напряжения ΔU в точке регулирования от опорного напряжения (напряжения уставки) определяется по формуле

$$\Delta U = U_0 - U_\phi, \quad (7.65)$$

где U_ϕ — напряжение на выходе входного фильтра измерительного органа:

$$U_\phi = \frac{k_1(pT_1 + 1)}{pT_2 + 1} U_{\text{тр}}. \quad (7.66)$$

Для моделирования системы возбуждения СГ используем известные формулы (7.54), (7.55):

$$I_{\text{вв}} = \frac{1/r_{\text{вв}}}{pT_{\text{вв}} + 1} U_{\text{вв}}; \quad (7.67)$$

$$U_f = f(I_{\text{вв}}). \quad (7.68)$$

Таким образом, уравнения (7.56)—(7.68) описывают работу транзисторно-тиристорных РН. С целью упрощения найдем промежуточную величину $I_{\text{вч}}$:

$$I_{\text{вч}} = \frac{T_5}{pT_4 + 1} I_{\text{вв}}; \quad (7.69)$$

тогда

$$I''_6 = pI_{\text{вч}}, \quad (7.70)$$

$$I_{\text{вч}} + pT_4 I_{\text{вч}} = T_5 I_{\text{вв}}, \quad (7.71)$$

откуда можно получить выражение (7.72), подставив значение $pI_{\text{вч}}$ из уравнения (7.70)

$$I''_6 = (T_5 I_{\text{вв}} - I_{\text{вч}})/T_4. \quad (7.72)$$

Преобразование уравнения (7.63) к виду (7.72) позволит обойти нежелательное дифференцирование. Таким образом, уравнения, описывающие работу РН и приведенные к виду, удобному для структурного моделирования, будут

$$U_\phi = \frac{k_1(pT_1 + 1)}{pT_2 + 1} U_{\text{тр}}; \quad (7.73)$$

$$\Delta U = U_o - U_{тр}; \quad (7.74)$$

$$I'_6 = \frac{k_2(pT_3 + 1)}{pT_4 + 1} \Delta U; \quad (7.75)$$

$$I''_6 = (T_5 I_{вв} - I_{вч}) / T_4; \quad (7.76)$$

$$I_{вч} = \frac{T_5}{pT_4 + 1} I_{вв}; \quad (7.77)$$

$$I_6 = I'_6 - I''_6; \quad I_6 \geq 0; \quad (7.78)$$

$$U_y = f(I_6); \quad (7.79)$$

$$U_{пв} = E_{пв} - r_{пв} I_{вв}; \quad (7.80)$$

$$U_{вв} = U_{пв} - U_y; \quad U_{вв} \geq 0,23; \quad (7.81)$$

$$I_{вв} = \frac{1/r_{вв}}{pT_{вв} + 1} U_{вв}; \quad (7.82)$$

$$U_f = f(I_{вв}). \quad (7.83)$$

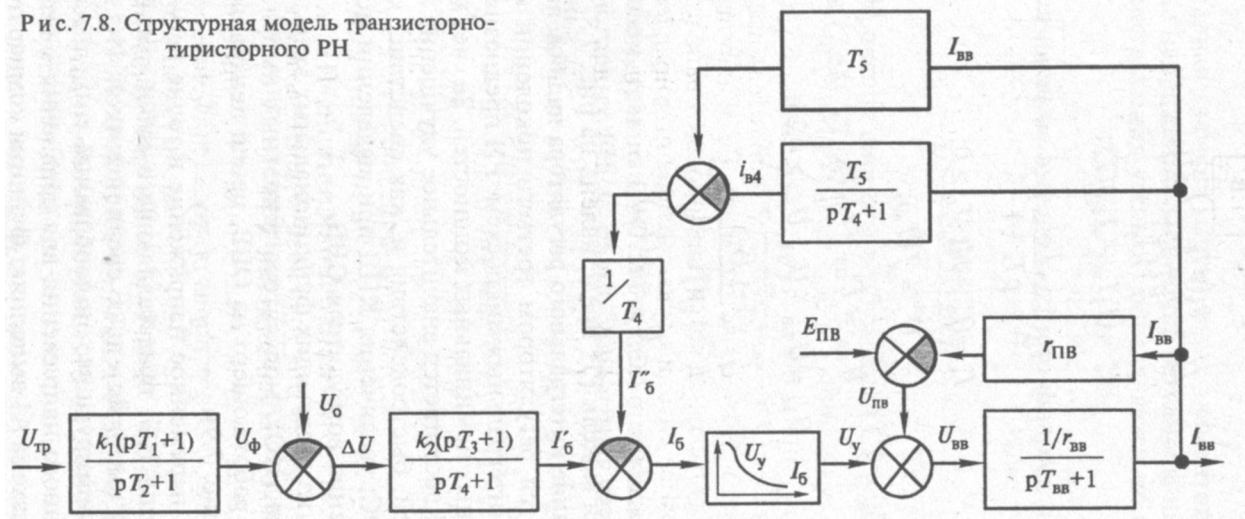
Структурная модель РН представлена на рис. 7.8.

Моделирование интегрального регулятора напряжения. Электронный РН является регулятором третьего поколения и выполнен с применением интегральных микросхем. РН предназначен для работы с СГ различных номинальных мощностей. За счет микросхемной реализации РН достигается значительное улучшение массогабаритных показателей, быстродействия и, как следствие, качества электроэнергии СЭС; увеличения КПД при выделении мощности в обмотку возбуждения возбудителя ОВВ.

РН состоит из следующих функциональных элементов: измерительного органа (ИО), модулятора широтных импульсов (МШИ), усилителя (У), работающего на ОВВ, цепей центральной обратной связи (ЦОС) (рис. 7.9).

Трехфазное переменное напряжение в точке регулирования $U_{тр}$ поступает на вход ИО, представляющего собой трехфазный однополупериодный выпрямитель со средней точкой. ИО включает также цепочку, формирующую пилообразные импульсы, и источник стабилизированного напряжения для сравнения с входным напряжением. Микросхема А1 выполняет функции компаратора. Она формирует прямоугольные импульсы, скважность которых γ пропорциональна разности входных напряжений микросхем, т. е. осуществ-

Рис. 7.8. Структурная модель транзисторно-тиристорного РН



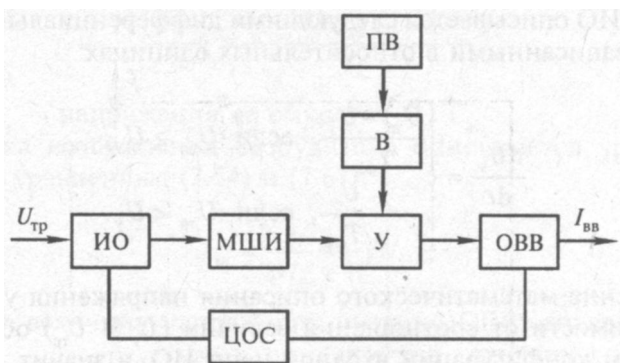


Рис. 7.9. Функциональная схема интегрального РН

ляет широтную модуляцию — блок МШИ (рис. 7.9). Сформированные импульсы подаются на вход безынерционного усилителя У, собранного по схеме с общим эмиттером. Усилитель питается от вспомогательного источника с частотой 800 Гц и напряжением 7,5 В. Усиленные импульсы подаются на силовой транзистор, работающий в ключевом режиме и осуществляющий управление питанием обмотки возбуждения возбудителя ОВВ от подвозбудителя. Центральная обратная связь (ЦОС) предназначена для повышения устойчивости работы РН. Напряжение с ЦОС поступает на ИО, ослабляя действие входного сигнала.

Работа РН осуществляется следующим образом. Изменение величины напряжения в точке регулирования ведет к изменению напряжения, поступающего на вход микросхем А1. В результате сравнения входного напряжения и напряжения уставки U_0 на выходе микросхемы появляется импульс, длительность которого пропорциональна разности напряжений. Это приводит к изменению времени подключения ОВВ к источнику питания ПВ, т. е. изменится среднее значение величины тока возбуждения возбудителя $I_{вв}$ и, как следствие, — выходное напряжение СГ.

Математическая модель электронного РН предложена и апробирована в работах. Удовлетворительное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментов позволяет выбрать указанную математическую модель и на ее базе разработать структурную модель РН для использования в ГЦМ.

Исходные уравнения РН следует преобразовать к виду, удобному для моделирования, с учетом принципа структурного моделирования, т. е. в качестве «входной» функции следует рассматривать напряжение в точке регулирования $U_{тр}$, а в качестве выходной — напряжение возбуждения СГ.

Работа ИО описывается следующими дифференциальными уравнениями, записанными в относительных единицах:

$$\frac{dU_y}{dt} = \begin{cases} \frac{U_{\text{тр}} - U_y}{T_{\Phi 1}}, & \text{если } U_{\text{тр}} \geq U_y, \\ -\frac{U_y}{T_{\Phi 2}}, & \text{если } U_{\text{тр}} < U_y. \end{cases} \quad (7.84)$$

Изменение математического описания напряжения управления U_y в зависимости от соотношения величин ($U_y \geq U_{\text{тр}}$) обусловлено изменением конфигурации входной цепи ИО, а значит, и изменением соответствующих постоянных времени.

Подаваемое на ИО напряжение обратной связи $U_{\text{ос}}$ вычитается из U_y , ослабляя его, и на входе компаратора (микросхемы А1) сравниваются два сигнала: U_o — напряжение уставки и сумма напряжений U_y и $U_{\text{ос}}$:

$$\Delta U = U_y - U_{\text{ос}} - U_o. \quad (7.85)$$

На выходе компаратора формируется сигнал, скважность j которого, выраженная в о. е., пропорциональна величине ΔU и может изменяться от 0 до 1:

$$j = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta U \geq \Delta U_2; \\ j_0 + k_j \Delta U, & \text{если } \Delta U_1 < \Delta U < \Delta U_2; \\ 1, & \text{если } \Delta U \leq \Delta U_1, \end{cases} \quad (7.86)$$

где $\Delta U_1, \Delta U_2$ — предельные значения ΔU , при которых j принимает граничные значения: 1, 0.

Модель подвозбудителя описывается уравнением, аналогичным уравнению (7.57):

$$U_{\text{пв}} = E_{\text{пв}} - r_{\text{пв}} I_{\text{вв}}. \quad (7.87)$$

Уравнения ЦОС имеют вид:

$$\frac{dU_{\text{фос}}}{dt} = \frac{-0,5jU_{\text{пв}}K_{\text{фос1}} + (U_D + U_{\text{ос}})k_{\text{фос2}} - U_{\text{фос}}}{T_{\text{фос}}}, \quad (7.88)$$

$$\frac{dU_D}{dt} = \frac{U_{\text{фос}} - U_D - U_{\text{ос}}}{T_D}, \quad (7.89)$$

$$\frac{dU_{oc}}{dt} = \frac{(U_{oc} - U_D)k_{oc} - U_{oc}}{T_{oc}}, \quad (7.90)$$

где $U_D, U_{\phi oc}$ — напряжения на емкостях C_3, C_4

Обмотка возбуждения возбудителя описывается уравнением, подобным уравнениям (7.54) и (7.67):

$$I_{\text{вв}} = \frac{1/r_{\text{вв}}}{pT_{\text{вв}} + 1} jU_{\text{пв}}, \quad (7.91)$$

где $jU_{\text{пв}}$ — величина напряжения питания ОВВ, определяемая по формуле

$$U_{\text{вв}} = \gamma U_{\text{пв}}. \quad (7.92)$$

Таким образом, уравнения (7.84)—(7.92) описывают работу интегрального РН. Здесь с целью унификации уравнения записываются относительно реальных значений. В операторной форме исходные уравнения РН следует представить в следующем виде:

$$E_1 = \frac{U_{\text{тр}} - U_y}{T_{\phi 1}}; \quad (7.93)$$

$$E_2 = \begin{cases} -\frac{U_y}{T_{\phi 1}}, & \text{если } E_1 < 0; \\ E_1, & \text{если } E_1 \geq 0; \end{cases} \quad (7.94)$$

$$\frac{dU_y}{dt} = E_2; \quad (7.95)$$

$$\Delta U = U_y - U_o - U_{oc}; \quad (7.96)$$

$$j = j_0 + k_j \Delta U; \quad (7.97)$$

$$j \geq 0; \quad j \leq 1; \quad (7.98)$$

$$U_{\text{пв}} = E_{\text{пв}} - r_{\text{пв}} I_{\text{вв}}; \quad (7.99)$$

$$I_{\text{вв}} = \frac{1/r_{\text{вв}}}{pT_{\text{вв}} + 1} \gamma U_{\text{пв}}; \quad (7.100)$$

$$U_{\text{пв(о.е)}} = \frac{U_{\text{пв}}}{U_{\text{вв баз}}}; \quad (7.101)$$

$$U_{\text{фос}} = \frac{-0,5\gamma U_{\text{ПВ(о.е)}} k_{\text{фос1}} + (U_D + U_{\text{ос}}) k_{\text{фос2}}}{pT_{\text{фос}} + 1}; \quad (7.102)$$

$$U_{\text{ос}} = \frac{(U_{\text{ос}} - U_D) k_{\text{ос}}}{pT_{\text{ос}} + 1}; \quad (7.103)$$

$$U_D = \frac{U_{\text{фос}} - U_{\text{ос}}}{pT_D + 1}; \quad (7.104)$$

$$U_f = f(I_{\text{вв}}). \quad (7.105)$$

§ 7.4. Математическое моделирование преобразовательных устройств

В качестве преобразовательных устройств в цифровой модели СЭС рассматриваются трансформаторы и трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ). ТВУ включают в свой состав трансформаторы, поэтому задачу моделирования трансформаторов можно рассматривать как частный случай моделирования ТВУ.

Отметим, что общепринятые математические модели ТВУ для использования в моделях СЭГ отсутствуют, хотя модели авиационных трансформаторов для решения частных задач были разработаны ранее. Необходимо разработать более общие математические модели.

ТВУ предназначены для работы в СЭС переменного трехфазного тока в качестве вторичных источников электроэнергии. Они преобразуют переменное напряжение 200/115 В в постоянное напряжение 27 В при частоте питания первичного напряжения 400 Гц.

ТВУ состоят из двух основных функциональных узлов: трансформатора и блоков выпрямителя.

Трансформатор понижает линейное напряжение СГ U_1 , подаваемое на первичные обмотки, с 200 В, 400 Гц до заданного U_2 на каждой вторичной обмотке. Первичные и вторичные обмотки трансформатора соединены зигзагообразно. Это позволяет получить сдвиг электрических градусов между соответствующими вторичными линейными напряжениями, уменьшить пульсацию напряжения при выпрямлении.

Выходные напряжения на вторичных обмотках трансформатора сдвинуты по фазе на 30 эл. град. Напряжение от вторичных обмоток подается на выпрямительное устройство.

Достаточно точное моделирование ТВУ с учетом состояния вентиляльных устройств выпрямительных блоков предполагает математическое описание электрической схемы ТВУ, соответствующее каждому конкретному состоянию вентиля (открытому или закрытому). Подобная математическая модель будет иметь существенный недостаток — увеличение требуемого для расчетов машинного времени, связанное с выбором мелкого шага интегрирования ($10^{-5} \dots 10^{-6}$ с), и увеличением объема вычислений за счет достаточно громоздкого математического описания в соответствии с состоянием каждого вентиляльного устройства. В то же время расчет одного режима работы СЭС, включающей СГ, РН, статическую нагрузку, требует значительно меньшего времени.

Чтобы привести в соответствие машинное время моделирования процессов ТВУ и СЭС, достаточно ограничиться рассмотрением динамических процессов в ТВУ по огибающим напряжений как на входе, так и на выходе. При таком подходе в математической модели отсутствует возможность воспроизведения пульсаций выпрямленного напряжения. Зато для описания переходных процессов отпадает необходимость учета изменения структуры выпрямительных цепей в соответствии с изменением состояния вентиля.

С учетом указанных соображений предлагается приближенная математическая модель, в которой учитываются первые гармоники. При написании уравнений, описывающих работу ТВУ, приняты следующие допущения:

- первичные и вторичные обмотки трансформатора полностью идентичны для всех трех фаз, ток нагрузки равномерно распределяется по всем трем фазам первичной цепи трансформатора;
- потери, обусловленные гистерезисом стального магнитопровода, и потери на вихревые токи отсутствуют (потери на гистерезис составляют около 0,08% потребляемой первичной цепью трансформатора в режиме мощности, а потери на вихревые токи значительно меньше, так как магнитопровод шихтован);
- выходная мощность ТВУ соответствует мощности на вторичных обмотках трансформатора с учетом мощности, рассеиваемой на вентиляльных блоках;
- потери в вентиляльных блоках учитываются нелинейным сопротивлением r_{Σ} , величина которого зависит от тока нагрузки ТВУ.

С учетом принятых допущений ТВУ можно рассматривать как двухобмоточный трансформатор, имеющий известную схему замещения, приведенную на рис. 7.10, где

$$w_2 = w_{2p} n = w_1; \quad (7.106)$$

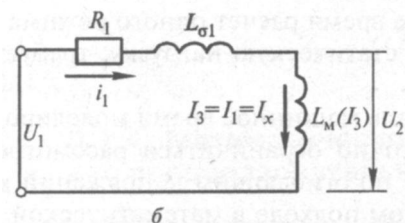
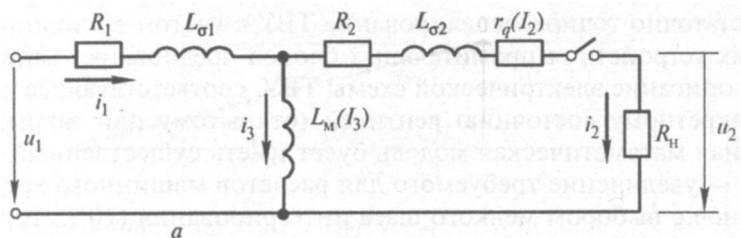


Рис. 7.10. Эквивалентная схема замещения ТВУ:
a — в режиме работы на нагрузку и режиме короткого замыкания;
б — в режиме холостого хода

$$i_2 = i_{2p} / n; \tag{7.107}$$

$$U_2 = U_{2p} n; \tag{7.108}$$

$$R_2 = R_{2p} n^2; \tag{7.109}$$

$$L_{\sigma 2} = L_{\sigma 2p} n^2; \tag{7.110}$$

$$L_M = L_{M1} = L_{M2} = Mn, \tag{7.111}$$

где w_2 , i_2 , U_2 , R_2 , $L_{\sigma 2}$ — приведенные значения количества витков, тока, напряжения, сопротивления, индуктивности рассеяния вторичной обмотки, рассчитываемые исходя из векторных диаграмм; L_M , L_{M1} , L_{M2} — индуктивность намагничивающей ветви со стороны первичных и вторичных обмоток; $n = w_1/w_{2p}$ — коэффициент трансформации, равный отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки. С индексом «р» здесь даны реальные значения токов, напряжений и параметров вторичной обмотки, с индексом «2» — приведенные (обычно в литературе обозначения приведенных параметров даны со штрихами).

Исходя из диаграммы (рис. 7.11) можно определить суммарное значение витков вторичной цепи трансформатора, которое определяется как геометрическая сумма обмоток вторичной цепи, соединенных зигзагообразно. Для этого рассмотрим векторную диаграмму, приведенную на рис. 7.11, полученную из рис. 7.10, для одной



из фаз. Эквивалентное число витков вторичной обмотки фазы можно определить как геометрическую сумму вторичных обмоток w_{21} и w_{22} по формуле

$$w_2 = \left(\frac{w_{21}}{2} + w_{22} \right) / \cos 15^\circ = 1,035 \left(\frac{w_{21}}{2} + w_{22} \right). \quad (7.112)$$

Аналогично можно вычислить значения индуктивности рассеяния и активного сопротивления для эквивалентной вторичной обмотки трансформатора:

$$L_{\sigma 2} = 1,035 \left(\frac{L_{\sigma 21}}{2} + L_{\sigma 22} \right); \quad (7.113)$$

$$R_2 = 1,035 \left(\frac{R_{21}}{2} + R_{22} \right). \quad (7.114)$$

Значение коэффициента выпрямления для **12-тактной** схемы выпрямления ($m = 12$), необходимое для определения выходного напряжения ТВУ по известному напряжению на входе блоков выпрямителя, определяется из формулы для среднего значения выпрямленного напряжения:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} \sqrt{2} U_\phi \cos \theta \cdot d\theta = \frac{m\sqrt{2}}{2\pi} 2 \sin \frac{\pi}{m} U_\phi = 1,396 U_\phi, \quad (7.115)$$

где U_ϕ — действующее значение фазного напряжения вторичной цепи трансформатора.

Коэффициент выпрямления блоков выпрямителя ТВУ равен

$$K_V = \frac{U_{\text{вых}}}{U_\phi} = 1,396. \quad (7.116)$$

Для схемы замещения (рис. 7.10, а) справедливы уравнения

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_3}{dt}; \\ -u_2 &= i_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - L_m \frac{di_3}{dt} + r_q(I_2) i_2; \\ i_3 &= i_1 - i_2, \end{aligned} \quad (7.117)$$

где u_1, u_2, i_1, i_2 — мгновенные значения токов и напряжений первичной и вторичной обмоток; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ — индуктивность рассеяния обмоток; R_1 — активное сопротивление первичной обмотки; R_2 — сумма активного сопротивления вторичных обмоток; $r_q(I_2)$ — сопротивление, обусловленное падением напряжения на вентильных блоках; i_3 — результирующий ток первичной обмотки, создающий МДС, равную МДС, создаваемую реальными токами первичной и вторичной цепей:

$$\begin{aligned} i_3 w_1 &= i_1 w_1 - i_2 w_2; \\ i_3 &= i_1 - i_2 \frac{w_{2p}}{w_1} = i_1 - i_2. \end{aligned} \quad (7.118)$$

Значение индуктивности намагничивающей ветви L_m определяется по характеристике холостого хода и является нелинейной функцией величины тока I_3 :

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{U_1}{I_x}\right)^2 - \left(\frac{P_x}{I_x^2}\right)^2}, \quad (7.119)$$

где U_1, I_x — действующие значения напряжения первичной цепи и тока холостого хода ($I_1 = I_x$, если $I_2 = 0$); P_x — мощность, получаемая от источника питания в режиме

$$X_m = w L_m. \quad (7.120)$$

Таким образом, $L_m(I_3) = L_m(I_x)$.

Предположив, что $U_n = U_2$, где $U_n = i_2 R_n$ для активной нагрузки на выходе ТВУ, величины сопротивлений R_2 и r_q можно учесть в R_2 , т. е.

$$R_{2\Sigma} = R_2 + r_q(I_2) + R_n. \quad (7.121)$$

При нулевых начальных условиях система уравнений (7.117) может быть записана в области преобразования Лапласа:

$$U_1 = I_1 R_1 + L_{\sigma 1} p I_1 + L_M p I_M; \quad (7.122)$$

$$L_M p I_M = I_2 R_{2\Sigma} + L_{\sigma 2} p I_2; \quad (7.123)$$

$$I_3 = I_1 - I_2. \quad (7.124)$$

Из (7.122) и (7.124):

$$U_1 = I_1 [R_1 + p(L_{\sigma 1} + L_M)] - L_M p I_2, \quad (7.125)$$

или

$$I_1 [R_1 + p(L_{\sigma 1} + L_M)] = U_1 + L_M p I_2. \quad (7.126)$$

Из (7.123) подставим значение $p I_2$ в выражение (7.126), чтобы исключить нежелательное дифференцирование.

Из (7.123) и (7.124):

$$L_M p (I_1 - I_2) = I_2 R_{2\Sigma} + L_{\sigma 2} p I_2, \quad (7.127)$$

или

$$p I_1 L_M = I_2 R_{2\Sigma} + (L_{\sigma 2} + L_M) p I_2, \quad (7.128)$$

откуда

$$p I_2 = \frac{p I_1 L_M - I_2 R_{2\Sigma}}{L_{\sigma 2} + L_M}. \quad (7.129)$$

Подставив (7.129) в выражение (7.126), получим

$$I_1 [R_1 + p(L_M + L_{\sigma 1})] = U_1 + L_M \left(\frac{p I_1 L_M - R_{2\Sigma} I_2}{L_M + L_{\sigma 1}} \right), \quad (7.130)$$

преобразуем выражение (7.130) для I_1 :

$$I_1 \left[R_1 + p \left(L_{\sigma 1} + L_M - \frac{L_M^2}{L_{\sigma 2} + L_M} \right) \right] = U_1 - \frac{R_{2\Sigma} L_M}{L_M + L_{\sigma 2}} I_2, \quad (7.131)$$

где

$$L_M - \frac{L_M^2}{L_{\sigma 2} + L_M} = \frac{L_{\sigma 2} L_M + L_M^2 - L_M^2}{L_{\sigma 2} + L_M} = \frac{L_{\sigma 2} L_M}{L_{\sigma 2} + L_M},$$

и обозначим

$$L_3 = L_{\sigma 1} + \frac{L_{\sigma 2} - L_M}{L_{\sigma 2} + L_M}. \quad (7.132)$$

Таким образом, выражение для I_1 , согласно (7.131) и (7.132),

$$I_1(R_1 + pL_3) = U_1 - \frac{R_{2\Sigma} L_M}{L_M + L_{\sigma 2}} I_2. \quad (7.133)$$

С учетом того, что $L_M \gg L_{\sigma 2}$, можно считать, что $\frac{L_M}{L_M + L_{\sigma 2}} \approx 1$

Например, для известных марок ТВУ соотношение значений следующее: ВУ-3Б — среднее значение $L_M = 0,075$ Гн, $L_{\sigma 2} = 26,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; ВУ-6Б — среднее значение $L_M = 0,09$ Гн, $L_{\sigma 2} = 39,5 \cdot 10^{-6}$ Гн. Тогда выражение (7.133) можно записать

$$I_1(R_1 + pL_3) = U_1 - I_2 R_{2\Sigma}. \quad (7.134)$$

Типовыми режимами для ТВУ являются: работа в режиме холостого хода, работа под нагрузкой и режим короткого замыкания. При работе в режиме холостого хода $I_2 = 0$, и выражение (7.134) имеет вид

$$I_1(R_1 + pL_3) = U_1. \quad (7.135)$$

В режимах работы под нагрузкой и режиме короткого замыкания для трансформаторов справедливо: $I_1 \approx I_2$, так как $I_3 \ll I_1$ (это требование для существующих трансформаторов ТВУ выполняется: $I_1 = 15...20$ А, $I_3 = 0,8...1,3$ А), поэтому выражение (7.134) можно представить:

$$I_1(R_1 + R_{2\Sigma} + pL_3) = U_1. \quad (7.136)$$

Таким образом, обобщив уравнения (7.135) и (7.136), получим

$$I_1 = \frac{1/R_3}{1 + pT_1} U_1, \quad (7.137)$$

332
где

$$R_3 = \begin{cases} R_1 & \text{при } R_2 = \infty; \\ R_1 + R_2 & \text{при } R_2 \neq \infty; \end{cases} \quad (7.138)$$

Исходя из схемы замещения (см. рис. 7.11) для I_2 запишем уравнение, выразив I_3 через I_1 таким образом, чтобы отсутствовало дифференцирующее звено:

$$I_2 R_{2\Sigma} = p I_3 L_M. \quad (7.140)$$

Согласно уравнению (7.124):

$$I_2 = I_1 - I_3. \quad (7.141)$$

Подставим (7.141) в (7.140)

$$(I_1 - I_3) R_{2\Sigma} = p I_3 L_M \quad (7.142)$$

или

$$I_1 R_{2\Sigma} = I_3 R_{2\Sigma} (1 + p T_2), \quad (7.143)$$

где

$$T_2 = \frac{L_M}{R_{2\Sigma}}. \quad (7.144)$$

Разделим выражение (7.143) на $I_1 R_{2\Sigma}$ и получим:

$$I_3 = \frac{1}{1 + p T_2} I_1. \quad (7.145)$$

Рассмотрим типовые режимы работы ТВУ. При режиме холостого хода $p = 0$ или $\lim_{R_2 \rightarrow \infty} T_2 = 0$ справедливо выражение:

$$I_3 = I_1, \quad (7.146)$$

Для режимов работы под нагрузкой и короткого замыкания справедливо выражение (7.145).

Таким образом, работа ТВУ описывается следующими уравнениями:

$$R_3 = \begin{cases} R_1 & \text{при } R = \infty; \\ R_1 + R_2 & \text{— в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$L_3 = L_{\sigma 1} + \frac{L_{\sigma 2} L_M}{L_{\sigma 2} + L_M}; \quad (7.147)$$

$$T_1 = L_3/R_3;$$

$$I_3 = \begin{cases} I_1 & \text{при } R_2 = \infty, \\ \frac{1}{1 + pT_2} I_1 & \text{— в остальных случаях,} \end{cases}$$

где $T_2 = L_m/R_{2\Sigma}$;

$$R_{2\Sigma} = R_2 + rq(I_2) + R_n.$$

Традиционное преобразование уравнений (7.145) и (7.143) в осях d , q не дает устойчивого численного решения из-за малых значений $\cos\varphi < 0,1$ трансформатора в режиме холостого хода, поэтому необходимо записать уравнение (7.147) для модулей токов и напряжений и затем привести их к принятой форме записи, т. е. к осям d , q , жестко связанным с ротором СГ:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_3^2 + (\omega L_3)^2}} \frac{1}{1 + pT_1}; \quad (7.148)$$

$$I_3 = \frac{I_1}{\sqrt{1 + (\omega T_1)^2}} \frac{1}{1 + pT_1}, \quad (7.149)$$

и перейдем к осям d , q :

$$I_{1d} = \frac{U_{1d}}{\sqrt{R_3^2 + (\omega L_3)^2}} \frac{1}{1 + pT_1}; \quad (7.150)$$

$$I_{1q} = \frac{U_{1q}}{\sqrt{R_3^2 + (\omega L_3)^2}} \frac{1}{1 + pT_1}; \quad (7.151)$$

$$I_{3d} = \frac{I_{1d}}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \frac{1}{1 + pT_2}; \quad (7.152)$$

$$I_{3q} = \frac{I_{1q}}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \frac{1}{1 + pT_2}; \quad (7.153)$$

$$I_{2d} = I_{1d} - I_{3d}; \quad (7.154)$$

$$I_{2q} = I_{1q} - I_{3q}. \quad (7.155)$$

Для значений токов и напряжения на выходе ТВУ справедливы уравнения:

$$I_1 = \sqrt{I_{1d}^2 + I_{1q}^2}; \quad (7.156)$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2d}^2 + I_{2q}^2}; \quad (7.157)$$

$$I_3 = \sqrt{I_{3d}^2 + I_{3q}^2}; \quad (7.158)$$

$$U_{dH} = I_{2d} R_H; \quad (7.159)$$

$$U_{qH} = I_{2q} R_H. \quad (7.160)$$

$$I_2 = 0,$$

$$U_{dH} = I_{1d} \omega_0 L_M; \quad (7.161)$$

$$U_{qH} = I_{1q} \omega_0 L_M; \quad (7.162)$$

$$U_{\text{вых}} = k_v U_H = k_v \sqrt{U_{dH}^2 + U_{qH}^2}. \quad (7.163)$$

Включение входного напряжения на ТВУ осуществляется в указываемый пользователем момент времени $T_{\text{ТВУ}}$, т. е. должно выполняться условие:

$$\left. \begin{array}{l} U_{1d} = 0 \\ U_{1q} = 0 \end{array} \right\}, \text{ если } t \leq T_{\text{ТВУ}}. \quad (7.164)$$

Таким образом, моделирование ТВУ осуществляется в абсолютных величинах, приведенных к первичной обмотке трансформатора, по уравнениям (7.150)—(7.164). Входное напряжение ТВУ — линейное напряжение на выходе СГ, т. е. входным напряжением U_1 является напряжение в относительных единицах (о.е.) СГ, увеличенное в $\sqrt{3} U_{\text{СГ баз}}$:

$$U_1 = U_{\text{СГ}} \sqrt{3} U_{\text{СГ баз}}. \quad (7.165)$$

Выходом структурной модели ТВУ является ток первичной обмотки трансформатора, приведенный к базовым величинам СГ в соответствии с выражением

$$I_{1\text{СГ}} = I_1 / (\sqrt{3} I_{\text{СГ баз}}). \quad (7.166)$$

Полученная структурная модель позволяет также рассматривать симметричные режимы работы трансформаторов с учетом их насы-

щения. При исследовании режимов работы трансформаторов с отличной от трансформаторов ТВУ схемой включения первичных и вторичных обмоток необходимо заново получить формулы приведения параметров вторичных обмоток трансформатора к первичным. В этом случае математическая модель трансформатора представляется уравнениями (7.150)—(7.155).

§ 7.5. Математическое моделирование потребителей электроэнергии

При моделировании типовых потребителей электроэнергии в СЭС рассматривается несколько видов нагрузок: статическая, двигательная и импульсная.

Структурные модели нагрузок должны быть составлены в соответствии с требованиями их согласования на уровне «ВХОДНЫХ—ВЫХОДНЫХ» воздействий, т. е. каждую из рассматриваемых нагрузок необходимо привести к виду, представленному на рис. 7.3, где на вход модели подается напряжение источника питания в осях $d, q, 0$, а на ее выходе снимается ток нагрузки в осях $d, q, 0$.

Анализ математических моделей СЭС показывает, что уравнения потребителей (П) электроэнергии принимают наиболее компактную и простую форму при их преобразовании к вращающимся координатам, жестко связанным с ротором СГ. Запись уравнений П, описываемых законами Кирхгофа, легко преобразовать к осям $d, q, 0$ для случаев симметричной нагрузки. Для случаев несимметричного распределения нагрузок по фазам СГ удобно использовать смешанную запись уравнений, используя оси $d, q, 0$ для описания процессов в СГ, а фазные оси A, B, C для описания процессов в П. При этом переход от одной системы координат к другой осуществляется с помощью уравнений преобразования, позволяющих осуществить стыковку координатных осей. Смешанная запись уравнений позволяет оценить форму кривых статорных токов и напряжений СГ. С учетом приведенных соображений рассмотрим математические модели указанных типовых нагрузок СЭС.

Моделирование статической нагрузки. В основу моделирования статической активно-индуктивной нагрузки положены известные дифференциальные уравнения:

$$U_A = i_A r_A + L_A \frac{di_A}{dt}; \quad (7.167)$$

$$U_B = i_B r_B + L_B \frac{di_B}{dt}; \quad (7.168)$$

$$U_c = i_c r_c + L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (7.169)$$

где $r = z \cos \varphi$; $x = z \sin \varphi$; $L = x/\omega_0$ для каждой из фаз A, B, C .

Уравнения (7.167)–(7.169), преобразованные к осям d, q, O для симметричных режимов, когда ток и напряжение нулевой последовательности равны нулю, имеют вид

$$U_d = r_n i_d + \frac{x_n}{\omega_0} p i_d + x_n i_q; \quad (7.170)$$

$$U_q = r_n i_q + \frac{x_n}{\omega_0} p i_q + x_n i_d. \quad (7.171)$$

С учетом особенностей составления структурных моделей потребителей запишем уравнения для статической нагрузки таким образом, чтобы входами являлись напряжения, а выходами — токи. Тогда из уравнений (7.170) и (7.171) имеем:

$$i_d = \frac{U_d / r_n - (x_n / r_n) i_q}{\frac{x_n}{r_n \omega_0} p + 1}; \quad (7.172)$$

$$i_q = \frac{U_q / r_n - (x_n / r_n) i_d}{\frac{x_n}{r_n \omega_0} p + 1}. \quad (7.173)$$

Аналогичное преобразование осуществим для уравнений (7.167)–(7.169):

$$i_A = \frac{U_A}{r_A \left(\frac{L_A}{r_A} p + 1 \right)}; \quad (7.174)$$

$$i_B = \frac{U_B}{r_B \left(\frac{L_B}{r_B} p + 1 \right)}; \quad (7.175)$$

$$i_C = \frac{U_C}{r_C \left(\frac{L_C}{r_C} p + 1 \right)}. \quad (7.176)$$

Уравнения (7.174)—(7.176) позволяют моделировать каждую фазу нагрузки в отдельности, т. е. допускают моделирование несимметричной нагрузки.

В уравнениях (7.172), (7.173) и (7.174)—(7.176) предполагается, что коэффициент мощности $\cos \varphi$ нагрузки отличен от нуля. В противном случае, т. е. при отсутствии индуктивной составляющей нагрузки, постоянная времени апериодического звена, равная $\frac{x_n}{r_n \omega_0}$ в (7.172), (7.173) и (L/r) для каждой фазы в уравнениях (7.174)—(7.176), будет стремиться к нулю. Это приводит к неустойчивому численному решению. Поэтому для расчета режимов работы при чисто активной нагрузке рекомендуется указывать высокий коэффициент мощности, но не равный единице, например, $\cos \varphi = 0,95$. Другим выходом из положения является создание отдельной модели для активной нагрузки. Например, для симметричных режимов уравнения активной нагрузки можно получить из (7.172), (7.173):

$$i_d = \frac{U_d}{r_n}; \quad (7.177)$$

$$i_q = \frac{U_q}{r_n}. \quad (7.178)$$

Таким образом, математическая модель статической нагрузки в наиболее общем случае описывается уравнениями (7.174)—(7.176). Эти уравнения позволяют моделировать как симметричные, так и несимметричные режимы подключения нагрузки по отдельным фазам. Однако при таком моделировании статической нагрузки необходимо дважды осуществлять преобразование координатных осей, как это показано ниже. Кроме того, моделирование мгновенных значений токов и напряжений вместо их огибающих приводит к необходимости уменьшения шага интегрирования. Все это ведет к значительному увеличению требуемого для расчетов машинного времени. Поэтому для моделирования симметричных режимов рекомендуется использовать более простую форму записи уравнений (7.172), (7.173), которые лишены указанных недостатков. Эти уравнения не позволяют, однако, моделировать симметричные режимы при единичном коэффициенте мощности. Поэтому для случая чисто активной нагрузки предлагается использовать уравнения (7.177), (7.178).

Моделирование двигательной нагрузки (асинхронного двигателя). Вопросы моделирования асинхронных двигателей достаточно пол-

но исследованы в различных работах, откуда можно сделать следующие выводы. Систему уравнений, описывающих АД, необходимо записать относительно осей d, q ротора. Это позволит, с одной стороны, сократить количество уравнений, описывающих работу АД, с другой — легко осуществить стыковку моделей СГ и АД. Использование Г- и Т-образных схем замещений для моделирования АД дает недопустимо большую погрешность в определении напряжения (порядка 20% для Г-образной и 10% — для Т-образной схем) и максимального электромагнитного момента АД (45 и 25% соответственно). Поэтому для моделирования АД необходимо использовать более точные математические модели, составленные по уравнениям Парка—Горева. При выборе полных или упрощенных уравнений Парка—Горева для моделирования АД будем руководствоваться соображениями выигрыша по времени, как это сделано для СГ. Анализируя машинное время, требуемое для расчета режима пуска АД от СГ по полным и упрощенным уравнениям, а также учитывая результаты сравнения полных и упрощенных уравнений для СГ, приведенные в § 7.2, можно вычислить, что сэкономленное время расчетов при переходе к упрощенным уравнениям для АД составит около 7%. Таким образом, с точки зрения машинного времени большой разницы между моделированием АД по полным и упрощенным уравнениям Парка—Горева нет. Поэтому, как более точные, выберем полные уравнения Парка—Горева.

Исходные уравнения математической модели АД имеют вид:

$$p\Psi_{da} + (1 + s_r) \Psi_{qa} + r_{1a} i_{da} = U_{da}; \quad (7.179)$$

$$p\Psi_{qa} + (1 + s_r) \Psi_{da} + r_{1a} i_{qa} = U_{qa}; \quad (7.180)$$

$$p\Psi_{1da} + (s_{дв} + s_r) \Psi_{1qa} + r'_{2a} i_{da} = 0; \quad (7.181)$$

$$p\Psi_{1qa} + (s_{дв} + s_r) \Psi_{1da} + r'_{2a} i_{qa} = 0; \quad (7.182)$$

$$ps_{дв} = \frac{1}{T_j} (M_c - M_{эм}), \quad (7.183)$$

где $M_{эм} = \Psi_{qa} i_{da} - \Psi_{da} i_{qa}$. (7.184)

При моделировании работы АД на вентиляторную нагрузку момент сопротивления может быть описан уравнением (специфика применения АД в системах самолетного электропривода исключает возможность внезапного изменения нагрузки на валу):

$$M_c = M_0 + M_n \left[\frac{\omega_0}{\omega_n} (1 - \Delta s) \right]^2. \quad (7.185)$$

Уравнения потокосцеплений:

$$\Psi_{da} = \Psi_{\delta da} + x_{1a} i_{da}; \quad (7.186)$$

$$\Psi_{qa} = \Psi_{\delta qa} + x_{1a} i_{qa}; \quad (7.187)$$

$$\Psi_{1da} = \Psi_{\delta da} + x'_{2a} i_{1da}; \quad (7.188)$$

$$\Psi_{1qa} = \Psi_{\delta qa} + x'_{2a} i_{1qa}; \quad (7.189)$$

$$\Psi_{\delta da} = x_{ada} (i_{da} + i_{1da}); \quad (7.190)$$

$$\Psi_{\delta qa} = x_{aqa} (i_{qa} + i_{1qa}). \quad (7.191)$$

С учетом особенностей составления структурных моделей потребителей, а также с целью уменьшения количества исходных уравнений (7.181)—(7.193) запишем уравнения АД таким образом, чтобы входами модели являлись напряжения, а выходами — токи. Тогда имеем:

$$p\Psi_{da} = -\omega_0 (U_{da} + r_{1a} i_{da} + \Psi_{qa}); \quad (7.192)$$

$$p\Psi_{qa} = -\omega_0 (U_{qa} + r_{1a} i_{qa} + \Psi_{da}); \quad (7.193)$$

$$\Psi_{1da} = \frac{\Psi_{da} - x_{1a} i_{da} - \frac{x'_{2a}}{r'_{2a}} \Delta s \Psi_{1qa}}{\frac{x'_{2a}}{r'_{2a} \omega_0} p + 1}; \quad (7.194)$$

$$\Psi_{1qa} = \frac{\Psi_{qa} - x_{1a} i_{qa} - \frac{x'_{2a}}{r'_{2a}} \Delta s \Psi_{1da}}{\frac{x'_{2a}}{r'_{2a} \omega_0} p + 1}; \quad (7.195)$$

$$i_{da} = \left[\left(\frac{1}{x_{0a}} + \frac{1}{x'_{2a}} \right) \Psi_{da} - \frac{1}{x'_{2a}} \Psi_{1da} \right] / \left(1 + \frac{x_{1a}}{x_{0a}} + \frac{x_{1a}}{x'_{2a}} \right); \quad (7.196)$$

$$i_{qa} = \left[\left(\frac{1}{x_{0a}} + \frac{1}{x'_{2a}} \right) \Psi_{qa} - \frac{1}{x'_{2a}} \Psi_{1qa} \right] / \left(1 + \frac{x_{1a}}{x_{0a}} + \frac{x_{1a}}{x'_{2a}} \right); \quad (7.197)$$

$$p\Delta s = \frac{1}{T_j} (M_c - M_{эм}), \quad (7.198)$$

где $\Delta s = s_{дв} + s_r$; $s_r = \frac{\omega_r - \omega_0}{\omega_0}$; $s_{дв} = \frac{\omega_0 - \omega_{дв}}{\omega_0}$.

Если частота вращения ротора СГ задается постоянной, то $\Delta s = s_{\text{дв}}$. Для пуска АД в определенный момент времени необходимо выполнение условия:

$$\left. \begin{aligned} U_{da} &= 0; \\ U_{qa} &= 0; \\ M_c &= 0; \\ M_0 &= 0, \end{aligned} \right\} \text{если } t \leq T_{\text{АД}}, \quad (7.199)$$

где $T_{\text{АД}}$ — время пуска АД; t — текущее значение времени. Таким образом, структурная модель АД, подготовленная для включения в цифровую модель, описывается уравнениями (7.192)—(7.199).

Моделирование импульсной нагрузки. Для моделирования импульсно-периодической нагрузки необходимо предусмотреть программные блоки, «формирующие» импульсы в виде прямоугольных импульсов или в виде пачек импульсов. Формирователи импульсов для удобства работы имеют по два синхронных выхода. Использование блоков формирования импульсов позволяет задавать начальную фазу импульсов, указать время «включения—отключения» импульсов, ширину импульса и (или) пачки импульсов, уровни импульса и паузы, значение величины вывода формирователя до включения и после отключения.

Для нормального функционирования блоков формирования импульсов необходимо задать параметры импульсов, формируя тем самым требуемый закон следования прямоугольных импульсов. Имея закон коммутации импульсов, его можно «подключить» к любому виду нагрузки. Например, можно задать определенный закон следования импульсов нагрузки на определенных фазах либо симметричной коммутации импульсов; задать последовательность импульсов на выходе ТВУ и т. д. Для этого достаточно указать, что величина той или иной нагрузки равна «выходу» программного блока формирователей импульсов (ИМР 1). Второй синхронный «выход» блока (ИМВ 2) может быть использован, например, для изменения величины постоянной времени обмотки возбуждения возбудителя $T_{\text{вв}}$, которая, как известно, изменяется в зависимости от моделируемых режимов.

§ 7.6. Функциональный анализ самолетных электросистем

Функциональный анализ проведем на примере одноканальной системы электроснабжения с несимметричной статической **нагрузкой**. Выбор одноканальной системы обусловлен тем, что на современных самолетах параллельная работа синхронных генераторов обычно не допускается по ряду причин (сложность синхронизации, ухудшение надежности и т. д.). Поэтому каналы генерирования электроэнергии работают автономно, обычно по одному или два канала на борт. При выходе из строя одного канала его нагрузка передается другому каналу. В случае перегрузки оставшихся каналов менее ответственные приемники электроэнергии отключаются.

Для составления математической модели рассматриваемой системы отметим, что элементный состав одноканальной системы электроснабжения при постоянной частоте включает синхронный генератор СГ с возбудителем В и подвозбудителем ПВ, регулятор напряжения РН, преобразователи рода тока Пр и статические приемники электроэнергии СПЭ. Декомпозиция системы на функциональные элементы и связи между ними позволяет легко построить математическую модель системы, используя принцип структурного моделирования. Как показано в гл. 3, для большинства элементов самолетных электросистем имеются хорошо апробированные математические модели. Более того, для отдельных элементов известны библиотеки математических моделей, которые изменяются в зависимости от конструктивного исполнения элемента, а также структуры и режимов системы. Каждая модель при этом представляется в виде функционального многополюсника с различными входными и выходными величинами, которые выбираются таким образом, чтобы удовлетворить условиям сочленения с моделями других элементов согласно структуре системы.

Простейший пример структурной схемы математической модели одноканальной системы электроснабжения с несимметричной статической нагрузкой приведен в той же гл. 3. Для авиационного СГ, являющегося единственным источником электроснабжения нагрузки (Н), выбрана математическая модель в виде системы полных уравнений **Парка—Горева**, использующих ортогональные координатные оси $d, q, 0$. Эта система уравнений приведена также в гл. 3. Магнитное насыщение учитывается раздельно по каждой оси d и q с помощью соответствующих характеристик насыщения для статора и ротора генератора. Регулятор напряжения генератора представлен математической моделью для схемы регулирования с широтно-им-

пульсной модуляцией. Несимметричная статическая нагрузка носит активно-индуктивный характер и математически смоделирована с помощью уравнений, составленных в фазных осях a , b , c . Коэффициент нагрузки принят равным 0,8. Все параметры генератора, регулятора и нагрузки, используемые при определении коэффициентов их математических моделей, приняты равными соответствующим реальным параметрам, определенным в результате экспериментальных исследований.

В структуру математической модели системы электроснабжения включены также уравнения связи между элементами и блоки математической стыковки элементов при переходе из одной системы координат в другую. На базе полной математической модели проведен сравнительный анализ результатов моделирования с аналогичными данными, полученными экспериментальным путем для трех случаев:

- 1) включение СГ в режиме холостого хода;
- 2) подключение номинальной нагрузки к генератору в режиме холостого хода;
- 3) полное отключение номинальной нагрузки в установившемся режиме работы.

Во всех трех случаях очень важными для сравнения являются следующие показатели переходных процессов: всплески и провалы напряжения, а также длительность (время) протекания переходных процессов. Всплески напряжения имеют место в случаях 1 и 3, провал — в случае 2. Указанные всплески и провалы позволяют определить максимальные и минимальные значения напряжения в системе электроснабжения и оценить их с точки зрения удовлетворения предъявляемых технических требований.

Данные сравнительного анализа представлены ниже.

Случай 1. Максимальные напряжения при включении СГ равны 142,8 В (модель) и 145 В (эксперимент), а длительность процесса — 0,055 с (модель) и 0,044 с (эксперимент). Разница по напряжению — 2,2 В и по времени — 0,011 с.

Случай 2. Минимальные напряжения при подключении нагрузки равны 102,2 В (модель) и 98 В (эксперимент), а длительность процесса — 0,035 с (модель) и 0,035 с (эксперимент). Разница по напряжению — 4,2 В и по времени — 0 с.

Случай 3. Максимальные напряжения при отключении нагрузки равны 136,8 В (модель) и 139 В (эксперимент), а длительность процесса — 0,05 с (модель) и 0,06 с (эксперимент). Разница по напряжению — 2,2 В и по времени — 0,01 с.

Расхождения между результатами моделирования и эксперимента для всех трех случаев являются удовлетворительными. Максимальное отклонение по напряжению — 4,2 В, что не превышает 5% номинального напряжения СГ, а по времени — 0,011 с, что составляет не более 20%.

В ряде случаев при проектировании сложных систем вначале требуется переходные процессы оценить приблизительно с помощью более простых математических моделей, исключающих необходимость решения громоздких дифференциальных уравнений. Кстати, информация, получаемая при решении дифференциальных уравнений точной модели, обычно является избыточной на начальных стадиях проектирования. В таких случаях часто прибегают к грубым оценкам качества переходных процессов, которое косвенно связано с такими параметрами, как постоянные времени элементов системы, переходные и сверхпереходные сопротивления электрических цепей и т. п. Такие оценки даются с помощью приближенных решений простых алгебраических уравнений, которые можно получить, используя статистические методы моделирования, в частности метод планируемого эксперимента.

Примеры косвенных оценок переходных процессов статистическими методами в системе электроснабжения, которая здесь рассматривается, приведены в гл. 3. В этих примерах также дан анализ процессов подключения и отключения номинальной нагрузки СГ в сравнении с экспериментом. Уравнения для показателей переходных процессов записаны относительно отклонений напряжений системы. Алгебраически суммируя вычисленные отклонения с номинальным значением напряжения, получим наибольшее и наименьшее значения напряжения СГ при его всплесках и провалах. Погрешность этих косвенных оценок находится в пределах 10%, что ненамного больше погрешностей математического моделирования на базе дифференциальных уравнений динамики, а погрешности оценок времени переходных процессов косвенным образом вообще соизмеримы с погрешностями их точного моделирования. Вероятно, это объясняется недостаточно полным учетом в математических моделях всех факторов, влияющих на механическую инерцию и трение авиационных СГ.

Более сложным является пример моделирования одноканальной электросистемы с тремя разными нагрузками. Структура модели (рис. 7.12) построена по аналогии со структурной схемой одноканальной системы электроснабжения с одной нагрузкой. В нее добавлены лишь две новые нагрузки. Допустим, что одна из них является по-прежнему статической и имеет несимметричный ха-

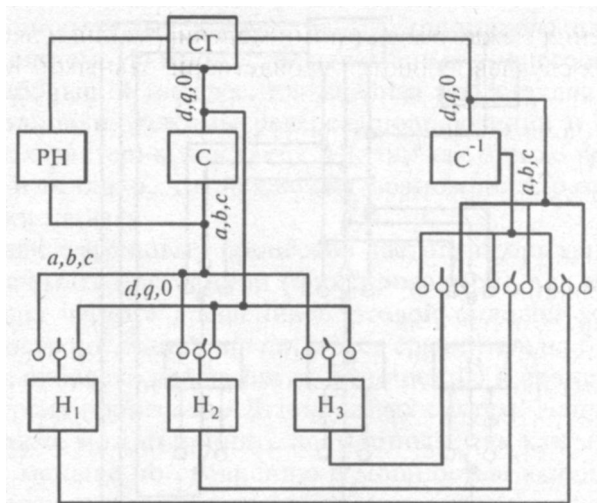


Рис. 7.12. Структурная схема электрической системы с различными видами нагрузки

рактер. Другая нагрузка тоже статическая, но симметричная. А третья нагрузка — обычный асинхронный двигатель. Системы координат для математических моделей нагрузок выбраны следующими: для первой и третьей нагрузок — фазные оси, а для второй — ортогональные оси, жестко закрепленные на вращающемся роторе СГ, т. е. такие же, как у СГ. Структурная схема также включает два блока математической стыковки, которые преобразуют ортогональные оси ротора в фазные оси, и наоборот. Отличие заключается лишь в том, что возбудитель и **ПОД** возбудитель включены в блок СГ, а измерительный орган — в блок РН. Это сделано потому, что указанные элементы системы производятся конструктивно, как единое целое. Кроме того, структурная схема (рис. 7.12) имеет ключи, которые вместе с блоками математической стыковки согласуют координатные оси всех моделей и нужным образом корректируют конфигурацию структуры.

Ранее указывалось, что число потребителей электроэнергии на борту большое и может исчисляться сотнями и тысячами. Чтобы избежать соответствующего многообразия структурных схем при вариациях нагрузок, можно унифицировать процесс их построения. Для этого следует сначала проанализировать весь набор координатных систем, требуемый для элементного состава системы. Например, для систем электроснабжения переменного тока в практике математического моделирования используются три основные системы координат:

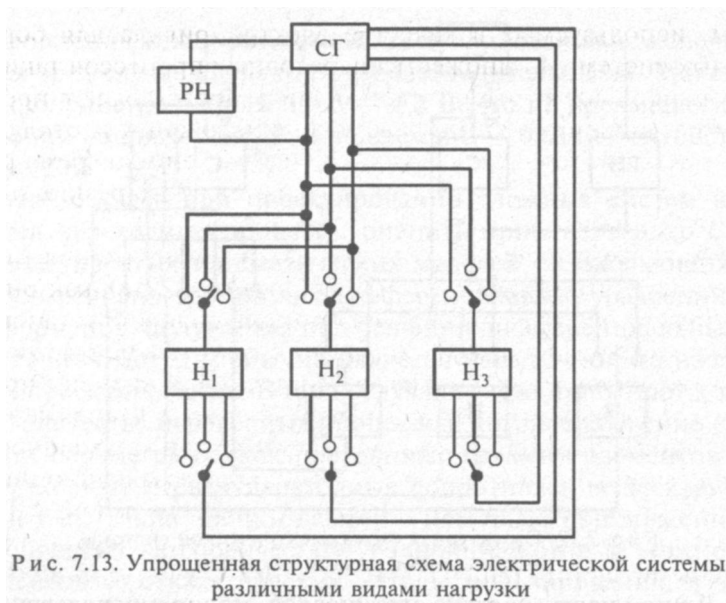


Рис. 7.13. Упрощенная структурная схема электрической системы различными видами нагрузки

- 1) ортогональные оси, закрепленные на вращающемся роторе электрических машин;
- 2) ортогональные оси, закрепленные на неподвижном статоре электрических машин;
- 3) фазные оси (оси фазных обмоток) на статоре или роторе электрических машин.

Учитывая это обстоятельство, схему, приведенную на рис. 7.12, можно упростить, если выход каждого элемента совместить со стыковочным блоком, преобразующим систему координат данного элемента в три указанные координатные системы. Совмещение означает, что стыковочные блоки включаются в элементные блоки и на схеме не показываются. Это придает схемным блокам универсальность, позволяя их выходы с помощью ключей подключить к блокам, реализующим любую из отмеченных систем координат. Унифицированная таким путем структурная схема показана на рис. 7.13.

§ 7.7. Анализ переходных процессов авиационных асинхронных двигателей

Здесь рассмотрены качественные показатели переходных процессов в авиационных асинхронных двигателях, которые потребляют значительную долю бортовой электроэнергии переменного тока. Среди них наиболее мощными являются АД с короткозамкнутым

ротатором, используемые в качестве электропривода для бортовых топливных систем. Из множества переходных процессов таких двигателей наибольший интерес для анализа представляют процессы пуска и остановки. Режимы реверса, подключения и отключения нагрузки не характерны для таких АД, так как они во время работы погружены в топливо, что исключает возможность резких изменений нагрузки на валу.

При анализе пусковых процессов частоту напряжения питания АД можно считать постоянной (фиксированной), так как она пропорциональна частоте вращения бортовой силовой установки. А инерционность последней препятствует сравнительно быстрому изменению ее скорости вращения по отношению к времени протекания переходных процессов АД топливных систем. Напряжение питания АД также можно принять постоянным, так как мощность АД на порядок меньше по сравнению с мощностью авиационных СГ. Наконец, активные сопротивления электрических цепей АД также приняты постоянными, а индуктивные сопротивления — пропорциональными частоте напряжения питания. С учетом принятых допущений для анализа процессов пуска и остановки целесообразно выбрать математическую модель, построенную на основе неподвижной ортогональной системы координат. Эта модель, записанная относительно физических значений переменных, имеет следующий вид:

$$\frac{d\Psi_{\alpha}^s}{dt} = V_{\text{нф}} \sqrt{2} \cos \omega_0 t - r_1 i_{\alpha}^s; \quad \frac{d\Psi_{\alpha}^r}{dt} = -\omega_0 j \Psi_{\beta}^r - r_2^1 i_{\alpha}^r;$$

$$\frac{d\Psi_{\beta}^s}{dt} = V_{\text{нф}} \sqrt{2} \sin \omega_0 t - r_1 i_{\beta}^s; \quad \frac{d\Psi_{\beta}^r}{dt} = -\omega_0 j \Psi_{\alpha}^r - r_2^1 i_{\beta}^r;$$

$$i_{\alpha}^s = \frac{L_r}{A} \Psi_{\alpha}^s - \frac{M}{A} \Psi_{\alpha}^r; \quad i_{\alpha}^r = -\frac{M}{A} \Psi_{\alpha}^s + \frac{L_s}{A} \Psi_{\alpha}^r; \quad (7.200)$$

$$i_{\beta}^s = \frac{L_r}{A} \Psi_{\beta}^s - \frac{M}{A} \Psi_{\beta}^r; \quad i_{\beta}^r = -\frac{M}{A} \Psi_{\beta}^s + \frac{L_s}{A} \Psi_{\beta}^r;$$

$$m_{\gamma} = \frac{3}{2} p M (i_{\beta}^s i_{\alpha}^r - i_{\alpha}^s i_{\beta}^r); \quad \frac{d\gamma}{dt} = \frac{p}{j\omega_0} m_{\gamma} - \frac{p}{j\omega_0} m_c; \quad m_c = M_0 + \frac{\omega^2}{\omega_{\text{р ном}}^2} \gamma^2,$$

где $A = L_s L_r - M^2$; $L_s = (X_0 + X_1)/\omega_0$; $L_r = (X_0 + X_2^1)/\omega_0$; $M = X_0/\omega_0$; r_1 , r_2^1 , X_1 , X_2^1 , X_0 — параметры общеизвестной Т-образной схемы замещения АД.

Исследования математической модели АД показали, что электромагнитные процессы в обмотках АД протекают значительно быс-

трее электромеханических (из-за наличия жидкостного трения) и эти процессы можно рассматривать отдельно. Принимая частоту вращения ротора неизменной по отношению к изменениям токов АД, можно рассматривать квазистационарные процессы пуска, при которых напряжения и токи изменяются по гармоническому закону и образуют симметричную двухфазную систему в любой момент времени. Тогда уравнения в осях а, β распадаются на две пары независимых идентичных уравнений, каждую из которых можно рассматривать самостоятельно. Причем каждая пара может быть получена путем рассмотрения квазистационарного процесса пуска в классической Т-образной схеме замещения АД, т. е. для анализа достаточно одной пары. В результате такого подхода можно существенно упростить математическую модель АД и представить ее в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_s}{dt} &= U_s - r_1 i_s; & \frac{d\Psi_r}{dt} &= -r_2' i_r + \gamma \frac{d\Psi_r}{dt}; \\ i_s &= \frac{L_r}{A} \Psi_s - \frac{M}{A} \Psi_r; & i_r &= -\frac{M}{A} \Psi_s + \frac{L_s}{A} \Psi_r; \\ b_{m_s} &= -\frac{3p}{\omega_0} i_r \frac{d\Psi_r}{dt}; & \frac{d\gamma}{dt} &= \frac{p}{j\omega_0} (m_s - m_c); & m_c &= m_s \frac{\omega_0^2}{\omega_n^2} \gamma^2, \end{aligned} \quad (7.201)$$

где моменты записаны относительно средних значений.

На рис. 7.14 приведены осциллограммы пуска для серийного АД с частотой питания 400 Гц. Результаты математического моделирования и обработки осциллограмм даны для сравнения в табличной форме (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Показатели	$i_{n \max}$, А	$I_{уст}$, А	$m_{s \max}$, Н·м	$M_{s \text{кр}}$, Н·м	$M_{s \text{уст}}$, Н·м	$t_{\text{пуск}}$, с
Серийный АД	54,8	9,6	5,0	5,3	3,1	—
Модель	5,8	8,6	6,8	5,4	3,2	1,1

Анализ таблицы показывает, что качество переходных процессов в обоих случаях совпадает. Максимальная погрешность (расхождение в оценке показателе) не превышает 25% и соизмерима с технологическими погрешностями. Последние, с одной стороны, обусловлены производственными отклонениями параметров АД, а с другой стороны, отклонениями параметров топлива (вязкость,

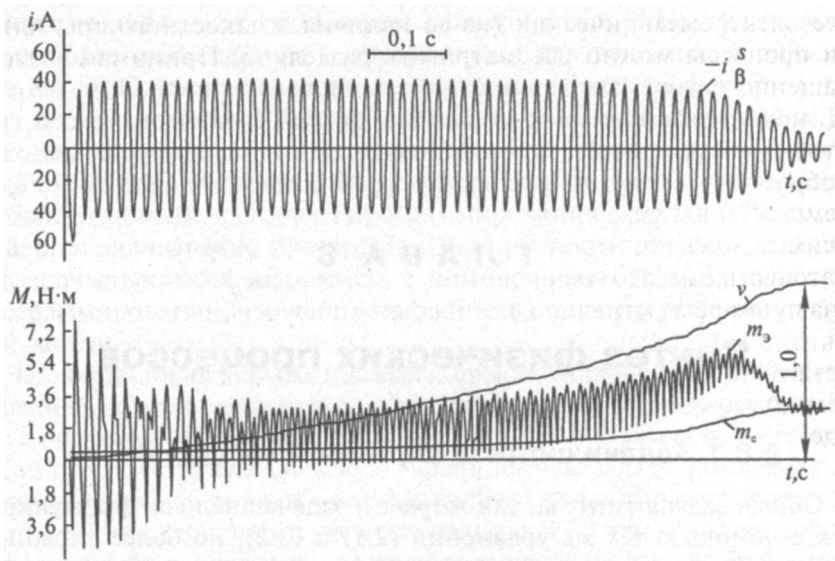


Рис. 7.14. Осциллограммы пуска серийного АД при $f_n = 400$ Гц и $J = 0,2J_n$

температура и т. д.). Кроме того, испытания АД проведены при 20%-й нагрузке, что потребовало корреляции при обработке осциллограмм. Кстати, по этой причине сравнение пуска по времени оказалось невозможным. С учетом изложенного упрощенная математическая модель АД вполне пригодна для использования в проектных расчетах.

Г Л А В А 8

Синтез физических процессов

§ 8.1 Задачи синтеза управляемых процессов

Общая задача синтеза, так же как и задача анализа, формулируется с помощью тех же уравнений (2.1) и (2.2), но более сложным образом. Как видно из выражений (2.3)—(2.6), динамика физических процессов $X(t)$ зависит от выбора двух видов управляющих воздействий: переменных $Y(t)$ и постоянных Z, K . Допустимые области изменений управляющих воздействий ограничивают возможности их выбора, но не полностью. Остается, как правило, еще достаточное множество допустимых вариаций управления. Поэтому на стадии проектирования добавляется еще одно важное условие для выбора управляющих воздействий. Это — оптимальность протекания физических процессов, которая сокращает число возможных вариаций управления до минимума. В такой постановке задача синтеза сводится к оптимизации физических процессов посредством выбора либо переменного управляющего воздействия $Y(t)$, либо постоянных воздействий Z, K . Возможно также их сочетание. Превосходство оптимальных процессов над всеми остальными определяется количественной оценкой одного или нескольких наиболее значимых показателей качества, так называемых критериев оптимальности. Такого типа задачи синтеза динамических процессов относятся к самым сложным задачам вариационного исчисления. Трудности их решения связаны с тем, что одни управляющие воздействия являются функцией времени, а другие — нет.

Обычно эти трудности обходятся путем преобразования исходной задачи синтеза к форме «чистых» вариационных задач, у которых все управления воздействия меняются во времени. С этой целью векторы Z, K рассматриваются как новые вектор-функционалы, производные которых по времени тождественно равны нулю.

Однако такой подход увеличивает размерность и объем задач, делает их более громоздкими и трудоемкими для решения. К задачам синтеза ЭТС он практически неприменим. Более эффективен для этих целей системный подход, основанный на декомпозиции задач и их поэтапном решении методами математического прогаммирования (см. гл. 2). В результате исходная задача синтеза разбивается на более простые подзадачи программирования, каждая из которых решается значительно проще. Полученные таким образом решения подзадач стыкуются, например, с помощью метода динамического прогаммирования, что дает возможность получить решение исходной задачи.

Одной из таких важных подзадач, представляющих также самостоятельный интерес, является синтез оптимальных физических процессов с помощью вариаций управления $Y(t)$. Эта подзадача представляет собой по существу классическую вариационную задачу, которая в различных вариантах решается в теории управляемых динамических процессов. Применительно к проектированию ЭТС такие задачи возникают при выборе оптимальных законов управления переходными процессами и разработке автоматических регуляторов напряжения, частоты и других систем автоматики. Подзадачи выбора управляющих векторов Z и K тоже имеют самостоятельное значение и решаются в тех случаях, когда необходимо улучшить динамические процессы лишь за счет выбора структуры или параметров ЭТС. Такие подзадачи в отличие от подзадач по выбору $Y(t)$ носят не динамический, а статический характер. Они требуют выбора постоянных, а не переменных управляющих воздействий. Этим определяются принципиальные отличия в процессах решения подзадач. Если выбор $Y(t)$ требует оптимизации функционалов времени, то выбор Z и K производится путем поиска оптимума функции многих переменных.

Указанные отличия в выборе управляющих воздействий на физические процессы ЭТС исчезают при переходе от математических моделей к цифровым, вычислительным моделям, которые нужны для САПР. Как указано во второй главе, приведение к задачам математического прогаммирования осуществляется с помощью замены непрерывных функций времени их дискретными аналогами. Благодаря этому дифференциальные уравнения замещаются разностными алгебраическими уравнениями, а вариационные задачи — задачами оптимизации функций многих переменных, которые решаются в САПР поисковыми методами математического прогаммирования. В том же разделе отмечалось, что универсальных методов прогаммирования нет и в практике проектирования оказались эффективными комбинации различных методов. В частности, было обраще-

но внимание на комбинацию трех методов: случайного поиска, покоординатного поиска и динамического программирования.

Несмотря на единый формальный подход к составлению вычислительных моделей и оптимизации управляемых динамических процессов, между вариационными задачами и задачами оптимизации функций многих переменных отличия сохраняются по существу их содержания. Дискретная аппроксимация временных функций требует представить время как сумму новых переменных в виде малых приращений времени. Соответственно малым отрезкам времени происходит замена каждой временной функции множеством новых переменных, связанных между собой. В результате размерность задачи увеличивается настолько, что даже современные ЭВМ не всегда с ней справляются за приемлемое машиносчетное время. Поэтому практическое использование ряда точных методов программирования исключается. В этот ряд входят многие методы поиска, включая метод динамического программирования.

В общем случае достаточно эффективным оказывается применение алгоритмов с комбинацией методов статистических испытаний (Монте-Карло) и покоординатного поиска. Для ограничений достаточно общего вида (8.2) путем введения соответствующих масштабов строится многомерный куб. В этом кубе путем статистических испытаний с определенной вероятностью находится аппроксимирующая управляющая функция, которая принимается за начальное приближение к глобальному оптимуму. Принимая полученное решение за начальное, методом покоординатного поиска находится ближайший локальный оптимум. Если начальное решение находится в сфере притяжения глобального оптимума, то полученное после покоординатного поиска решение можно считать окончательным. При наличии овражных ситуаций можно использовать специальные приемы, например поворот координатных осей.

Варьирование параметров оптимизации y_p ($p = 1, \dots, m$) производится с постоянным шагом Δy . Реакция на изменение y_p определяется интегрированием уравнений динамики на отрезке $[p\Delta t_1, T]$ и соответствующим вычислением H_0 . Последовательность варьирования y_p принципиально можно выбрать как в сторону увеличения y_1, y_2, \dots, y_m , так и наоборот. После варьирования полного набора $\{y_p\}$ процесс повторяется до тех пор, пока изменение любого y_p не приводит к дальнейшему улучшению H_0 . Кроме рассмотренного алгоритма разработана его модификация, касающаяся покоординатного поиска. Здесь при каждом варьировании y_p изменение его величины допускается только на один шаг Δy . Это означает, что при малых Δy общее направление поиска близко к антиградиенту функции H_0 , что в определенных случаях сокращает время поиска.

При наличии нескольких управляющих функций на каждом интервале Δt ищется n параметров оптимизации. Для метода Монте-Карло это означает, что при единичном испытании вырабатывается последовательность псевдослучайных чисел, преобразуемых в случайные наборы $\{y_p\}$, $i=1, \dots, n$. При покоординатном поиске можно поступать двояко. В одном случае процедура поиска сохраняется неизменной. Тогда вариация параметров оптимизации, например, в сторону возрастания производится в последовательности $y_{11}, \dots, y_{1n}, y_{21}, \dots, y_{2n}, \dots, y_{m1}, \dots, y_{mn}$. В другом случае поиск y_{p1}, \dots, y_{pn} на любом интервале Δt осуществляется методами многомерного поиска, например градиентным. Во всех случаях увеличение числа управляющих функций приводит к увеличению времени поиска.

Время поиска оптимальных управлений можно в ряде случаев резко уменьшить, используя специфику постановок классических типов вариационных задач. Эффективные методы решения разработаны в основном для двух типов задач: управление конечным состоянием динамических процессов и управление быстродействием. К этим типам можно свести многие задачи оптимизации переходных процессов в ЭТС. Учитывая это обстоятельство, далее будут более детально рассмотрены вычислительные алгоритмы и практические примеры решения указанных типов задач. Что касается задач, требующих оптимизации функции многих переменных, то они решаются уже известными методами программирования и их комбинациями (см. гл. 2). Для этого типа задач ниже будут даны лишь примеры, связанные с оптимальным выбором структуры и параметров ЭТС.

§ 8.2. Оптимальное управление конечным состоянием

Одной из важных задач оптимального управления переходными процессами является так называемая *задача терминального управления (управления конечным состоянием)*. Она формулируется следующим образом:

- переходные процессы описываются уравнениями динамики, которые в скалярной форме имеют следующий нормализованный вид:

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n), \quad i = 1, \dots, n. \quad (8.1)$$

Управляющие функции $y_i(t)$ ограничены по значению как сверху, так и снизу, что можно представить ограничениями довольно общего характера

$$|y_i| \leq A_i = \text{const}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8.2)$$

Отрезок времени $[0, T]$, на котором рассматриваются переходные процессы, задан. Начальное состояние процессов также задано фиксированными значениями фазовых переменных:

$$x_i(0)' = C_i = \text{const}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (8.3)$$

которые определяют вектор C , изображающий начальную точку траектории переходного процесса в фазовом пространстве. Расстояние от этой точки до начала координат, т. е. величина C , равно

$$|C| = R(C_i) = \left[\sum_{i=1}^n C_i^2 \right]^{1/2}. \quad (8.4)$$

Необходимо найти такие $y_i(t)$, которые удовлетворяют всем указанным условиям и минимизируют расстояние от конечной точки фазовой траектории до начала координат. Следовательно, минимизируемый функционал имеет вид

$$R[x_i(T)] = \left[\sum_{i=1}^n x_i^2(T) \right]^{1/2}. \quad (8.5)$$

Обычно вместо (8.5) удобнее пользоваться положительно определенной квадратичной формой функционала

$$R^2(x_i^2) = \sum_{i=1}^n x_i^2(T). \quad (8.6)$$

Приведением к интегральному виду легко показать, что минимизируемый функционал явным образом зависит только от управляющих функций $y_i(t)$. Для этого используем следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i^2(T) &= \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n x_i^2(T) \right]' dt + \sum_{i=1}^n x_i^2(0) = \\ &= 2 \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{dx_i}{dt} \right) \right] dt + \sum_{i=1}^n x_i^2(0). \end{aligned} \quad (8.7)$$

Подставляя в (8.7.) выражение (8.1) и учитывая (8.4), а также постоянство T , получаем

$$R^2(x_i^2) = 2 \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n x_i f_i(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n) \right] dt + c^2 = R^2(y_1, \dots, y_n). \quad (8.8)$$

Таким образом, задача терминального управления в строгой формулировке требует минимизации функционала (8.8) при выполнении условий (8.2). Однако используя конечномерные аналоги динамических задач, управляющую функцию $y_i(t)$ можно заменить аналогом в виде кусочно-постоянной функции с равными интервалами постоянства Δt , число которых равно m . Другими словами, каждой функции $y_i(t)$ можно приближенно поставить в соответствие набор последовательных значений y_p , также удовлетворяющих условию (8.2):

$$y_i(t) \approx \{y_p\}_i, p = 2, \dots, m. \quad (8.9)$$

Используя (8.9) и учитывая необходимость замены дифференциальных уравнений (8.1) разностными схемами при численном моделировании, покажем, что задача терминального управления приближенно заменяется следующей задачей *математического программирования*:

- минимизировать функцию

$$H_0 = R^2[\{y_p\}_1, \dots, \{y_p\}_n], p = 1, \dots, m \quad (8.10)$$

при условии, **что**

$$|y_p|_i \leq A_i = \text{const}, i = 1, \dots, n. \quad (8.11)$$

Точность аппроксимации задачи тем выше, чем меньше значения Δt и больше m , но при этом резко возрастает число переменных, равное произведению nm .

Учитывая квадратичные свойства исходного целевого функционала, можно предположить наличие единственности решения и одноэкстремальности задачи. Ограничения (8.11) выделяют допустимую область простейшей формы типа многомерного параллелепипеда. Эти функциональные свойства задачи позволяют существенно упростить организацию поиска как внутри, так и на границе допустимой области.

Более сильные упрощения в аппроксимации задачи терминального управления достигаются при допущении линейности управлений динамики и релейного характера управляющих функций, что приемлемо во многих практических случаях. Тогда вместо (8.1) для случая одной управляющей функции имеем

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + b_i y, i = 1, \dots, n, \quad (8.12)$$

а вместо (8.11) — условие

$$y_p = \pm A. \quad (8.13)$$

Увеличение числа управляющих функций принципиально не влияет на формулировку задачи. Принятые допущения позволяют утверждать, что допустимая область включает дискретное множество точек, являющихся вершинами многомерного куба. Следовательно, оптимальное решение находится в одной из этих вершин, что еще более упрощает процесс поиска.

Для решения подобных задач использованы алгоритмы с последовательной комбинацией методов Монте-Карло и покоординатного поиска. Применение локального динамического программирования исключается из-за большого числа переменных. Применение метода Монте-Карло является обязательным даже в предположении унимодальности задачи, так как покоординатный поиск, несмотря на допустимую специфику ограничений, может привести к преждевременной остановке при попадании в «овражные» ситуации. Таким образом, использование случайных испытаний позволяет практически компенсировать отсутствие локального динамического программирования.

В частном случае релейных управлений для переменных задачи справедливо условие (8.13), т. е. они имеют всегда два допустимых значения. Это обстоятельство требует модификации метода Монте-Карло для случайного перебора только тех точек допустимой области, которые принадлежат вершинам многомерного параллелепипеда. Адаптация метода покоординатного поиска осуществляется выбором величины шага $|\Delta y| = 2A$, которая позволяет переходить из одной вершины параллелепипеда в другие.

Вследствие недопустимости изменения величины Δy вероятность преждевременной остановки в точке ложного оптимума возрастает.

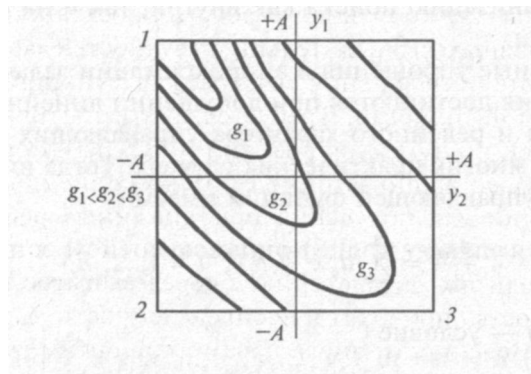


Рис. 8.1. Область поиска релейного управления

Например, на рис. 8.1 представлена схема с начальной точкой 2 и последовательностью изменения переменных в порядке y_2, y_1 . Поиск по y_2 приводит в вершину 3, а по y_1 не дает улучшения. Повторный цикл поиска по y_2, y_1 из точки 3 также не дает улучшения. Таким образом, поиск завершается в точке 3, в то время как оптимальной является точка 1. Учитывая большую вероятность получения ложного оптимума, в данном случае покоординатный поиск обязательно надо повторить многократно из различных начальных точек, отбираемых с помощью метода Монте-Карло, с вариацией последовательности y_2, y_1 и y_1, y_2 .

§ 8.3. Оптимальное управление по быстрдействию

Увеличение быстрдействия управления является одним из путей повышения устойчивости и качества переходных процессов СЭС. Задачи *максимального быстрдействия* можно сформулировать как частные случаи задач оптимизации динамических процессов. Простейшая задача быстрдействия имеет следующий вид:

- минимизировать функционал

$$J = t \tag{8.14}$$

путем выбора управляющих функций $y_1(t), \dots, y_n(t)$, определенных в отрезке времени $[0, t]$, которые удовлетворяют условиям (8.12) и переводят систему из заданного начального состояния (8.3) в начало координат за минимальное время t , где она устанавливается исходя из установившегося режима до переходного процесса и с учетом того, что установившийся режим после переходного процесса соответствует началу координат фазового пространства.

Одна из главных вычислительных трудностей сформулированной задачи — отсутствие явной связи между функционалом (8.14) и управляющими функциями. Требуется найти не только оптимальные управления, но и отрезок времени $[0, t]$, на котором они определены. Это существенно затрудняет применение поисковых методов оптимизации для получения приближенных решений задачи. Аппроксимируя управляющие функции кусочно-постоянными функциями, приходим к определению t через m шагов величиной Δt . Неопределенность t приводит к неопределенности m , а следовательно, и к неопределенности числа параметров оптимизации, что резко затрудняет конструирование алгоритмов поиска решений.

Указанные затруднения можно преодолеть с помощью замены задачи максимального быстродействия семейством задач терминального управления, преимуществом которых является фиксация отрезка $[0, T]$, на котором рассматривается переходный процесс. Это позволяет фиксировать соответственно число параметров оптимизации и использовать для решения указанные выше поисковые алгоритмы.

Для решения задачи быстродействия необходимо минимизировать функционал (8.8) при различных заданных T_1, T_2, \dots и построить зависимость $g_{\text{опт}}(T)$, где для фиксированного T

$$g_{\text{опт}} = \min_{y_1, \dots, y_n} R(y_1, \dots, y_n). \quad (8.15)$$

Первый минимум $g_{\text{опт}}(T)$, равный нулю, является решением задачи максимального быстродействия. Если обозначить $T_{\text{опт}}$ время, соответствующее первому минимуму, то для всех $T \leq T_{\text{опт}}$ функционал (8.8) имеет единственный минимум, а оптимальные управления носят релейный характер. Тогда при кусочно-постоянной аппроксимации управлений условия (8.11) можно заменить условиями (8.13). Для всех $T < T_{\text{опт}}$ $g_{\text{опт}} > 0$, а для $T = T_{\text{опт}}$ $g_{\text{опт}} = 0$. Для всех $T > T_{\text{опт}}$ $g_{\text{опт}} \equiv 0$, а характер оптимальных управлений может отличаться от релейного. Если для $T > T_{\text{опт}}$ оптимальные управления имеют релейный характер, то $g_{\text{опт}} > 0$.

Таким образом, ведя поиск оптимальных управлений в классе релейных функций, легко найти минимум $g_{\text{опт}}(T)$ ввиду его единственности (при всех T , отличных от $T_{\text{опт}}$, $g_{\text{опт}} > 0$, а при $T = T_{\text{опт}}$ $g_{\text{опт}} = 0$). Релейные функции, оптимальные по быстродействию управления, во всех случаях существуют, единственны и особенно хорошо изучены для объектов с линейными уравнениями динамики. Поэтому задача быстродействия для линейных объектов часто называется также *задачей релейного управления*. Число переключений знака управляющих функций за время оптимального переходного процесса зависит от вида корней характеристического определителя дифференциальных уравнений и начального состояния (8.3). Например, если корни действительные, то независимо от (8.3) число переключений меньше или равно $(n - 1)$, где n — порядок системы дифференциальных уравнений.

Для облегчения поиска оптимальных релейных управлений для линейных объектов сформулируем вспомогательную задачу терминального управления. Для наглядности ограничимся случаем одной управляющей функции, увеличение числа которой принципиально не влияет на формулировку. Вспомогательная задача отличается от

ОСНОВНОЙ задачи терминального управления тем, что оптимальное управление находится в классе релейных функций с заданным числом переключений k и чередованием знаков на интервалах постоянства. Если моменты переключений обозначить t_k , а значения y на интервалах постоянства y_1, \dots, y_k , то минимизируемый функционал преобразуется к виду

$$R^2(y) = R^2(t_1, \dots, t_k) = 2 \int_0^{t_1} \left[\sum_{i=1}^n x_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + b_i y_1 \right) \right] dt + \dots + 2 \int_{t_k}^T \left[\sum_{i=1}^n x_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + b_i y_{k+1} \right) \right] dt + c^2, \quad (8.16)$$

где значения y_1, \dots, y_k определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_3 = \dots = \pm A; \\ y_2 &= y_4 = \dots = \mp A. \end{aligned} \right\} \quad (8.17)$$

Моменты переключения не должны совпадать друг с другом, чтобы число заданных переключений не уменьшилось, т. е.

$$0 < t_1 < \dots < t_k < T. \quad (8.18)$$

Таким образом, вспомогательная задача с учетом независимости аргументов t_1, \dots, t_k сводится к минимизации функции (8.16) при выполнении условий (8.15), (8.17) и (8.18). Необходимость минимизации функции во вспомогательной задаче вместо функционала основной задачи существенно упрощает процесс решения. Аппроксимация временных функций в данном случае необязательна для применения поисковых методов решения.

Если число k и чередование знаков y_1, \dots, y_k такое же, как и в оптимальном решении задачи быстрогодействия, то последнее определяется построением $g_{\text{опт}}(T)$, где для фиксированного T

$$g_{\text{опт}} = \min_{t_1, \dots, t_k} R^2(t_1, \dots, t_k). \quad (8.19)$$

Функция $g_{\text{опт}}(T)$ для вспомогательной задачи терминального управления имеет только один минимум, равный нулю и совпадающий с максимальным быстрым действием. Этот минимум легко находится при наличии априорной информации относительно управляющих релейных функций. Чередование знаков часто устанавливается исходя из физических данных о форсировке переходного процесса,

а число k — исходя из теоремы об $(k - 1)$ переключениях. При отсутствии априорной информации можно воспользоваться методом последовательных приближений, т. е. проводить процесс решения для разных k и чередований знаков. Если такой подход окажется малоэффективным, то вспомогательной задачей можно воспользоваться для уточнения решений, полученных с помощью общей задачи терминального управления.

Оптимальный выбор параметров оптимизации t_1, \dots, t_k возможен лишь с помощью метода динамического программирования, для чего необходимо преобразовать вспомогательную задачу k функциональному уравнению Беллмана. Для этого вместо моментов переключений рассмотрим интервалы постоянства управлений T_l . Тогда условие (8.18) заменяется соотношением

$$\sum_{l=1}^{k+1} T_l = T. \quad (8.20)$$

Благодаря (8.20) один из параметров T_l зависит от всех остальных, и, следовательно, число независимых переменных остается прежним и равным k .

Для новых параметров оптимизации (8.16) принимает вид

$$R^2(T_1, \dots, T_{k+1}) = 2 \sum_{l=1}^{k+1} \int_0^{T_l} \sum_{i=1}^n x_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + b_i y_l \right) dt + I^2, \quad (8.21)$$

где $\int_0^{T_l} \sum_{i=1}^n x_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + b_i y_l \right) dt = J_l(T_l, x_{i0l})$, здесь x_{i0l} — начальное условие x_i для l -го интервала постоянства управления.

Если учесть, что для каждого T_l начальные условия x_{i0l} являются функцией всех предыдущих этапов интегрирования и начальных условий задачи C_p , то можно показать, что

$$R^2(T_1, \dots, T_l) = 2 \sum_{l=1}^{k+1} J_l(T_1, \dots, T_l) + c^2. \quad (8.22)$$

Так как J_1 не зависит от T_2, \dots, T_{k+1} , то минимум (8.22) можно представить в виде

$$g_{\text{опт}} = \min_{T_1} \left\{ 2J_1(T_1) + \min_{T_2} \dots \min_{T_{k+1}} \left[2 \sum_{l=2}^{k+1} J_l(T_1, \dots, T_l) + c^2 \right] \right\}, \quad (8.23)$$

где $T_l (l = 1, \dots, k + 1)$ удовлетворяют (8.20) и условию $T_l > 0$

Уравнение (8.23) относится к классу функциональных уравнений динамического программирования, для решения которого можно использовать вычислительные алгоритмы, описанные в [25].

§ 8.4. Стабилизация напряжения синхронного генератора

Требования к стабилизации напряжения СЭС непрерывно повышаются. Наряду с точностью и устойчивостью процессов регулирования требуется значительное быстродействие и ограничение всплесков (провалов) напряжения в переходных режимах. Особенно важное значение быстродействие имеет в случаях, когда нагрузка коммутируется с большой частотой и период коммутации соизмерим с временем переходного процесса. Все эти особенности требуют оценки оптимальных по быстродействию процессов стабилизации напряжения ЭС с учетом предельных ресурсов регулирования.

При решении задачи *быстродействия* сделаны следующие допущения. Авиационный генератор трехфазный, явнополюсный, нагрузка симметричная, частота вращения постоянная, наличием демпферных контуров в первом приближении можно пренебречь. Напряжение регулируется только с помощью одной обмотки возбуждения, т. е. управляющим воздействием является напряжение возбуждения U_b . При этих допущениях динамику АСГ можно описать уравнениями, приведенными в § 7.2.

Чтобы исключить из рассмотрения все напряжения, за исключением управления U_b , следует также привлечь уравнения активно-индуктивной нагрузки в осях d, q . Решая совместно уравнения АСГ и нагрузки и исключая из рассмотрения напряжения U_d, U_q , после несложных преобразований можно получить следующие уравнения системы АСГ—Н в натуральном масштабе времени:

$$\left. \begin{aligned} (1/\omega_c) p i_d &= (1/\Delta i_d) [-(r+r_n)x_b i_d + (x_q+x_n)x_b i_q - r_n x_{ad} i_b + x_{ad} U_b]; \\ (1/\omega_c) p i_q &= (1/\Delta i_q) [-(r+r_n) i_q - (x_d+x_n) i_d + x_{ad} i_b]; \\ (1/\omega_c) p i_b &= (1/\Delta i_d) [-(r+r_n)x_{ad} i_d + (x_q+x_n)x_{ad} i_q - \\ &- r_n(x_d+x_n) i_b + (x_d+x_n) U_b], \end{aligned} \right\} \quad (8.24)$$

где определители системы по осям d, q выражаются следующим образом:

$$\Delta i_d = (x_d+x_n)x_b - x_{ad}^2; \quad \Delta i_q = x_q+x_n. \quad (8.25)$$

Переходные процессы системы рассмотрены для случаев подключения и отключения нагрузки. Коммутация нагрузки предполагается скачкообразной (мгновенной). Следовательно, переходный процесс протекает при значениях r_n, x_n , соответствующих установившемуся режиму после переходного процесса. Начальные значения токов i_d, i_q, i_n , необходимые для расчета, соответствуют установившемуся режиму до переходного процесса. Для их вычисления надо определить соответствующее положение вектора результирующего тока АСГ относительно координатных осей d, q . Это положение характеризуется углом ψ . При стабильном напряжении и неизменном $\cos \varphi$ проекции вектора результирующего тока на оси d, q соответственно пропорциональны:

$$\left. \begin{aligned} \sin \psi &= \sin \varphi + k_I x_q / \sqrt{(\cos \varphi + k_I r)^2 + (\sin \varphi + k_I x_q)^2}; \\ \cos \psi &= \cos \varphi + k_I r / \sqrt{(\cos \varphi + k_I r)^2 + (\sin \varphi + k_I x_q)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (8.26)$$

где $k_I = I/I_n = S/S_n$ — отношение тока (мощности) установившегося режима к току (мощности) номинального режима. С помощью (8.26) определяются установившиеся значения токов

$$i_d = k_I \sin \psi; \quad i_q = k_I \cos \psi. \quad (8.27)$$

Критерий оптимальности задачи быстрогодействия устанавливается с учетом использования задачи терминального управления, в которой установившийся режим после переходного процесса не совпадает с началом координат фазового пространства. Тогда

$$R^2(U_n) = [i_d(T) - i_{d\infty}]^2 + [i_q(T) - i_{q\infty}]^2 + [i_n(T) - i_{n\infty}]^2, \quad (8.28)$$

где индекс « ∞ » относится к установившемуся режиму после переходного процесса; T — фиксированное время переходного процесса.

Ограничение на управление в отличие от (8.13) удобнее задавать в форме

$$U_{n \min} \leq U_n \leq U_{n \max}, \quad (8.29)$$

так как не всегда имеется возможность изменения знака управления. Обычно это изменение возможно лишь по величине.

Из-за линейности (8.24) решение поставленной задачи получается с помощью алгоритмов поиска оптимальных релейных управлений. Для конкретизации рассмотрим процесс отключения нагрузки АСГ со следующими относительными значениями параметров генератора: $r = 0,026$; $r_n = 0,0055$; $x_d = 1,866$; $x_{ad} = 1,8$; $x_q = 1,066$;

$x_{aq} = 1,0; x_b = 2,0$. Параметры нагрузки до и после переходного процесса: $\cos \varphi = 0,8; r_{H0} = 1,28; r_{H\infty} = 3,2; x_{H0} = 0,96; x_{H\infty} = 2,4$. Установившиеся значения токов до и после переходного процесса: $i_{d0} = 0,525; i_{d\infty} = 0,1825; i_{q0} = 0,339; i_{q\infty} = 0,17; i_{b0} = 1,07; i_{b\infty} = 0,74$. Ограничение на управление: $-0,01 \dots +0,01$.

Начальное решение примера получено с помощью алгоритма оптимизации релейного управления для основной задачи терминального управления. При этом изменение T осуществлялось варьированием Δt при постоянном значении $m = 80$. Найденная функция $g_{\text{опт}}(\Delta t)$ показана на рис. 8.2, а пунктирной кривой 1. Дальнейшее уточнение решения достигнуто с помощью алгоритма оптимизации релейного управления для вспомогательной задачи терминального управления (кривая 2 на рис. 8.2, а). Уточненное оптимальное управление и соответствующий переходный процесс показаны на рис. 8.2, б, в. Анализ кривых показывает, что, пренебрегая погрешностями аппроксимации управления, можно отметить три стабильных интервала постоянства в управлении, т. е. два переключения, что в данном случае соответствует теореме об $(l - 1)$ переключениях.

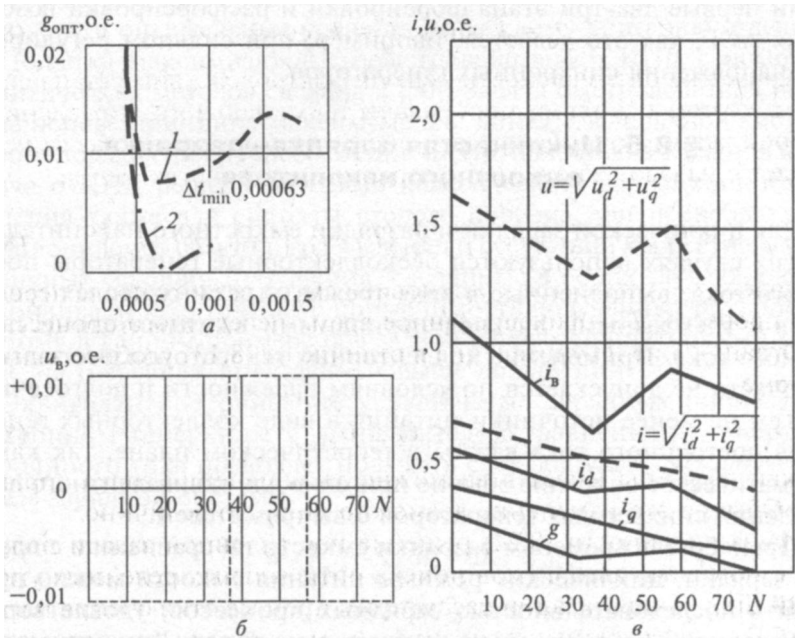


Рис. 8.2. Кривые оптимальной стабилизации напряжения СГ

Предложенные алгоритмы и программы использованы также для решения рассматриваемой задачи с учетом демпферных контуров. Найдены оптимальные процессы для режимов 10%-го увеличения нагрузки и отключения трехфазного короткого замыкания. Управление изменялось в пределах $0 \leq U_n \leq 36$ В. Сопоставление полученных результатов с результатами без учета демпферной обмотки показывает, что последние несущественно влияют на оптимальные процессы. Основное время переходного процесса определяется первыми двумя-тремя интервалами постоянства U_n , что указывает на близость АСГ к объектам управления второго и третьего порядков. По сравнению с реальными процессами стабилизации напряжения АСГ с помощью стандартных блоков регулирования напряжения (БРН) оптимальные процессы дают существенный выигрыш — значительно уменьшается как время регулирования, так и максимальное отклонение напряжения.

В целом анализ полученных решений показывает, что максимальное быстродействие заметно улучшает качество регулирования и малочувствительно к точности математического описания АСГ. Следовательно, при разработке автоматических регуляторов достаточно ограничиться квазиоптимальными процессами, использующими первые два-три этапа форсировки и расфорсировки возбуждения АСГ, как это делается, например, при сильном регулировании напряжения синхронных генераторов.

§ 8.5. Циклическая зарядка—разрядка емкостного накопителя

Для циклической зарядки и разрядки емкостного накопителя во многих случаях используются бесколлекторные генераторы постоянного тока, выполненные в виде трехфазных синхронных генераторов с трехфазными двухполупериодными выпрямителями переменного тока. Применение коллекторных генераторов постоянного тока часто не допускается по условиям надежности и долговечности. Тем не менее источники питания в виде коллекторных генераторов постоянного тока важны в теоретическом плане, так как их математическое описание **обычно** пригодно для эквивалентного представления синхронных генераторов с выпрямителем.

Пренебрегая временем разрядки емкости по сравнению с временем зарядки, циклические режимы питания емкости можно представить последовательностью зарядных процессов, удовлетворяющих условиям реализуемости относительно токов. Динамические и энергетические показатели циклических режимов определяются в

основном параметрами зарядной системы, **частотой** следования разрядов и законами управления зарядных процессов. С учетом использования серийных генераторов параметры зарядной системы, а также частоту следования разрядов можно считать заданными. Тогда повышение динамических и энергетических показателей достигается оптимальным выбором законов управления зарядкой емкости с помощью возбуждения синхронного генератора.

Среди показателей качества зарядных процессов наибольший интерес представляют быстродействие и коэффициент полезного действия. Рост этих показателей увеличивает степень использования генератора и максимальную среднюю мощность, генерируемую в емкостный накопитель. Это приводит к улучшению массовых и габаритных характеристик зарядной системы, что особенно важно для передвижных установок. Одновременно появляется возможность увеличения частоты следования разрядных импульсов.

Таким образом, задачу оптимизации зарядных процессов целесообразно рассматривать в многокритериальной постановке с критериями быстродействия и КПД. Однако, учитывая качественную аналогию влияния критериев на процессы (неантагонистичность критериев), можно предполагать, что оптимальные решения по отдельным критериям расходятся не очень сильно. Поэтому сначала целесообразно найти оптимальные решения по каждому критерию отдельно.

Попытка максимизировать быстродействие и КПД с помощью аналитических методов сделана в [50]. Задача быстродействия решена на основе принципа максимума для линейной зарядной системы второго порядка при пренебрежении индуктивностью в зарядной цепи. Задача о КПД решена методами классического вариационного исчисления также для системы второго порядка при пренебрежении инерционностью обмотки возбуждения и отсутствии корректного учета граничных условий. Допущения, сделанные в обоих случаях, сильно ограничивают практическую применимость полученных результатов. Поэтому в данном примере обе задачи решаются поисковыми методами, не требующими указанных выше допущений.

Эквивалентное описание усредненных зарядных процессов в синхронном генераторе с выпрямителем уравнениями генератора постоянного тока позволяет получить следующую *математическую модель* зарядной системы:

$$\left. \begin{aligned} U_C &= -R_3 i_3 - L_3 di_3 / dt + C_e i_b; \\ dU_C / dt &= (1/C) i_3; \\ U_b &= r_b i_b + L_b di_b / dt, \end{aligned} \right\} \quad (8.30)$$

где U_c — напряжение на емкости; i_3 — зарядный ток; U_b, i_b — напряжение и ток возбуждения; r_b, L_b — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения; R_3, L_3 — эквивалентные параметры обмотки якоря; C_e — коэффициент пропорциональности между ЭДС якоря и током возбуждения; C — емкость накопителя.

Эквивалентные параметры R_3, L_3 приближенно определяются через параметры обмотки якоря синхронного генератора [50]:

$$\left. \begin{aligned} R_3 &\approx 1,75 \sqrt{x_r^2 + r^2}; \\ L_3 &\approx 1,75 x_r / \omega_c, \end{aligned} \right\} \quad (8.31)$$

где $x_r = 0,5(x_d + x_q)$ — усредненное по осям d, q синхронное сопротивление; r — активное сопротивление фазы; ω_c — синхронная угловая скорость.

В уравнениях зарядной системы (8.30) предполагается, что частота вращения генератора постоянная, а параметры не зависят от насыщения (коэффициенты уравнений постоянны). Однако эти допущения непринципиальны и при необходимости их можно учесть без ущерба для алгоритмов поиска оптимума.

Управляющим воздействием зарядной системы является U_b . Вследствие физической ограниченности ресурсов возбуждения и технических затруднений, связанных с изменением знака, U_b ограничивается условием

$$0 \leq U_b \leq U_{b \max}. \quad (8.32)$$

Зарядный процесс в установившемся циклическом режиме периодически повторяется. Поэтому достаточно оптимизировать один зарядный цикл с учетом граничных условий повторяемости. Если разряд емкости происходит мгновенно и полностью, то в момент разряда U_c падает до нуля и, следовательно, зарядный цикл начинается с $U_c = 0$. Начальные и конечные значения токов должны быть равны, так как токи не могут изменяться скачкообразно. Учитывая это и обозначая время зарядного цикла T , имеем следующие граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} i_3(0) = i_3(T) = 0; \quad U_c(0) = 0; \\ U_c(T) = U_{c \max}; \quad i_b(0) = i_b(T) = i_{b0}, \end{aligned} \right\} \quad (8.33)$$

где i_{b0} — ток возбуждения в режиме холостого хода генератора с ЭДС, равной $U_{c \max}$.

С учетом изложенного задача быстрогодействия формулируется так: найти

$$\min_{U_*(t)} t \quad (8.34)$$

при выполнении условий (8.30), (8.32) и (8.33), а задача оптимального КПД: найти

$$\min_{U_*(t)} \int_0^T ri_3^2 dt \quad (8.35)$$

при выполнении условий (8.30), (8.32) и (8.33) и фиксированном

значении T , где $\int_0^T ri_3^2 dt$ — потери в зарядной цепи.

Преобразуя задачу быстрогодействия к семейству задач терминального управления, получаем: найти

$$\min g_{\text{опт}}(T) \quad (8.36)$$

при выполнении условий (8.30), (8.32) и (8.33), где при фиксированном значении T

$$g_{\text{опт}} = \min_{U_*(t)} \left\{ \left[\frac{U_C(T) - U_{C\text{max}}}{U_6} \right]^2 + \left[\frac{i_3(T) - 0}{i_6} \right]^2 + \left[\frac{i_b(T) - i_{b0}}{i_6} \right]^2 \right\}. \quad (8.37)$$

Преобразование задачи КПД к семейству задач терминального управления возможно при введении новой переменной P , равной текущим потерям энергии в зарядной цепи. Тогда вместо (8.30) будем иметь

$$\left. \begin{aligned} U_C &= -R_3 i_3 - L_3 di_3 / dt + C_e i_b; \\ dU_C / dt &= (1/C) i_3; \\ U_b &= r_b i_b + L_b di_b / dt; \\ dP / dt &= ri_3^2, \end{aligned} \right\} \quad (8.38)$$

а задача оптимизации примет следующую форму: найти

$$\min g_{\text{опт}}(P) \quad (8.39)$$

при выполнении условий (8.32), (8.33) и (8.38), где при фиксированном значении P

$$g_{\text{опт}} = \min_{U_*(t)} \left\{ \left[\frac{U_C(T) - U_{C\text{max}}}{U_6} \right]^2 + \left[\frac{i_3(T) - 0}{i_6} \right]^2 + \left[\frac{i_b(T) - i_{b0}}{i_6} \right]^2 \left[\frac{P(T) - P(0)}{P_6} \right]^2 \right\}. \quad (8.40)$$

В задачах терминального управления U_6, I_6, P_6 — базисные величины, введенные для исключения влияния единиц измерения на оценку критериев оптимальности.

Решение обоих семейств задач терминального управления получено с помощью одних и тех же алгоритмов поиска, описанных выше. На рис. 8.3, а, б приведены зависимости $g_{\text{опт}}(T)$ и $g_{\text{опт}}(P)$, с помощью которых определяются оптимальные значения времени и потерь зарядного процесса. На рис. 8.4 представлены соответствующие этим $g_{\text{опт}}$ оптимально управляемые переходные процессы. Оптимальные решения найдены для следующих значений коэффициентов в уравнениях (8.32) и (8.38): $R_3 = 210, L_3 = 0,07, C_e = 150, r_b = 1,25, L_b = 0,0125, 1/C = 555.$

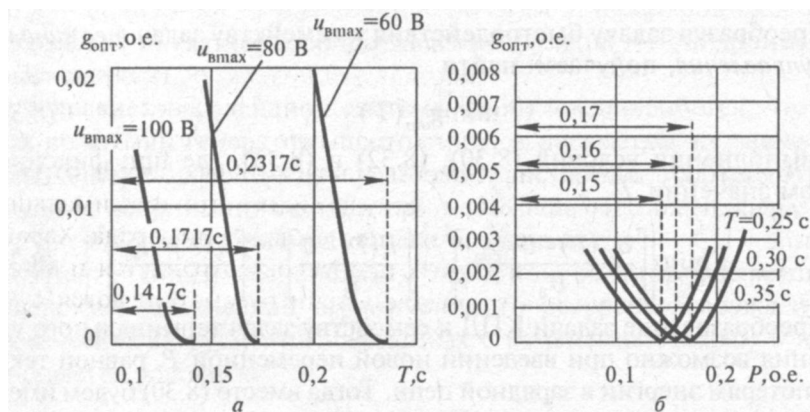


Рис. 8.3. Зависимости $g_{\text{опт}}(T)$ и $g_{\text{опт}}(P)$ для оптимизации зарядных процессов

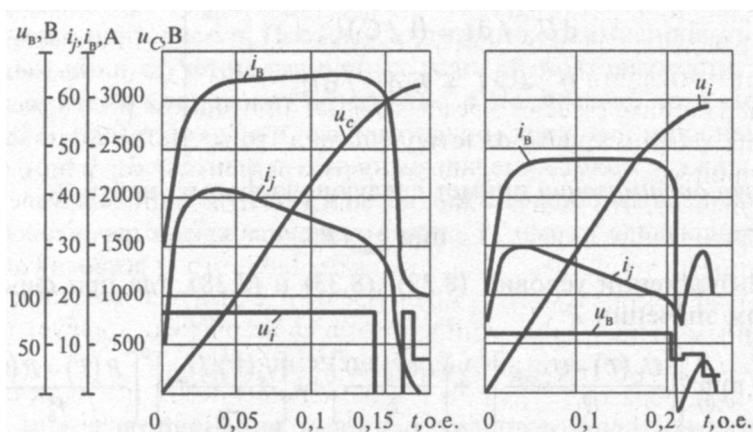


Рис. 8.4. Кривые оптимальных зарядных процессов

Анализ рис. 8.4 показывает, что оптимальное по быстродействию $U_b(t)$ является релейным в силу линейности (8.30). При этом зарядный процесс определяется в основном начальной форсировкой возбуждения, которая длится примерно 85% всего времени переходного процесса. При этом $U_c(t)$ линейно возрастает и только в конце с помощью переключений $U_b(t)$ U_c приближается к $U_{c\max}$. Сравнение оптимально управляемого процесса с неуправляемым процессом при постоянном возбуждении (рис. 8.5, а) показывает, что благодаря оптимальному управлению время зарядки уменьшается на порядок. В таком же отношении увеличивается степень использования генератора, улучшаются его массогабаритные показатели. Зависимость максимального быстродействия от уровня форсировки показана на рис. 8.5, б.

Оптимальное по КПД $U_b(t)$ отличается по характеру от релейного. Однако по аналогии с быстродействием основную роль играет длительная начальная форсировка возбуждения. На этапе начальной форсировки зарядные процессы, оптимальные по быстродействию и КПД, достаточно схожи. Зависимость максимальных потерь от времени зарядки дана на рис. 8.5, а, откуда видно, что максимальное значение КПД увеличивается с возрастанием времени заряда. Характер оптимальных по КПД зарядных процессов сохраняется и в том случае, если вместо потерь в зарядной цепи рассматриваются суммарные потери в цепи якоря и возбуждения генератора, т. е.

$$P = \int_0^t (r i_3^2 + r_b i_b^2) dt. \quad (8.41)$$

Сравнение оптимального по КПД процесса с неуправляемым некорректно из-за различий во времени протекания процессов. Задача оптимизации КПД не может рассматриваться вне времени зарядки. Например, если время зарядки при одном и том же $U_{b\max}$ меньше максимального быстродействия, то, следовательно, зарядный процесс не может удовлетворять граничным условиям (8.33). Это означает, что задача максимизации КПД в данном случае теряет практический смысл. Если же время зарядки стремится к бесконечности, то процесс настолько замедлен, что крайними (граничными) эффектами можно пренебречь и считать изменение $U_c(t)$ линейным от начала до конца. Это, в свою очередь, требует постоянства $i_3(t)$ и соответствующего изменения $U_b(t)$.

Таким образом, задача о максимальном КПД имеет реальный смысл лишь в определенном диапазоне изменения времени зарядки. Нижний предел диапазона определяется соответствующим макси-

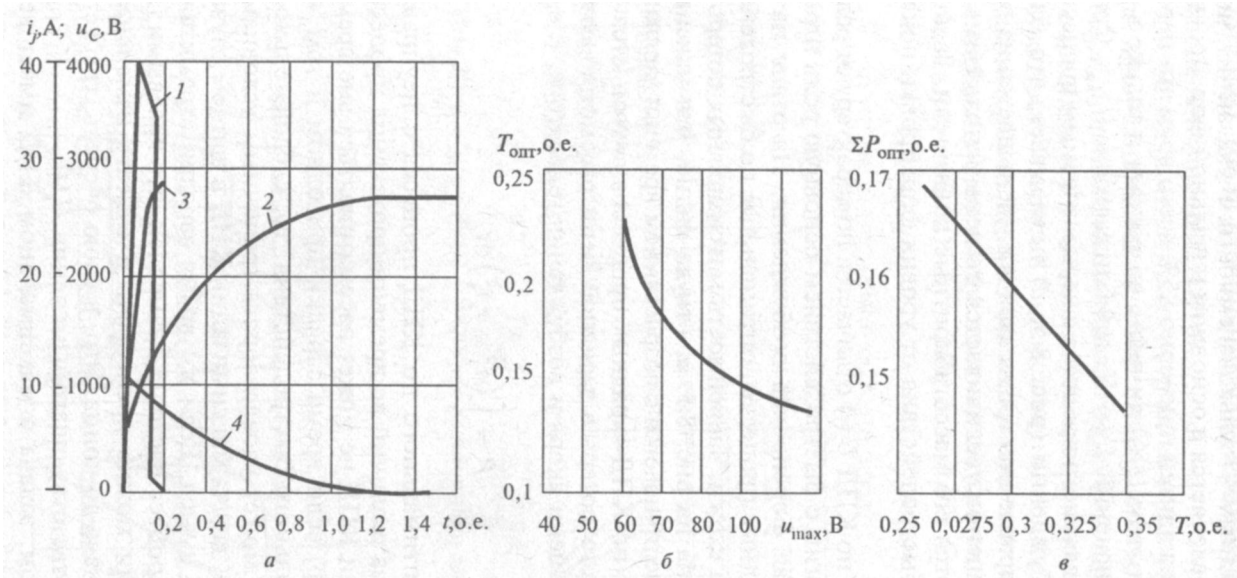


Рис. 8.5. Оптимальные характеристики зарядных процессов:

1 — оптимальный процесс зарядки при $U_{\text{в max}} = 80$ В по i_3 ; 2 — процесс зарядки постоянным возбуждением $U_{\text{в}} = 25$ В по u_c ; 3 — оптимальный процесс зарядки при $u_{\text{в max}} = 80$ В по u_c ; 4 — процесс зарядки с постоянным возбуждением $u_{\text{в}} = 28$ В по i_3

мальным быстродействием, а верхний — минимальными частотами следования разрядных импульсов в емкости. В указанном диапазоне времени характер оптимальных по КПД процессов соответствует кривым (см. рис. 8.5).

Сходство оптимальных по быстродействию и КПД зарядных процессов позволяет установить квазиоптимальный подход к управлению рассматриваемых систем, основанный на форсировке возбуждения почти на всем протяжении зарядного процесса. Практические возможности создания автоматических систем форсированного управления зарядным процессом рассмотрены в [51].

§ 8.6. Синтез электросистем с импульсными приемниками энергии

Наличие импульсных приемников электроэнергии (ИПЭ), имеющих мощность, соизмеримую с мощностью СГ, ведет к существенному ухудшению качества **электроэнергии**. Вследствие этого одновременное питание ИПЭ и обычных статических приемников электроэнергии (СПЭ) становится невозможным. Поэтому для питания ИПЭ, как правило, выделяется отдельный канал генерирования (КГ) ЭС. При этом мощность ИПЭ обычно меньше мощности штатных КГ, что ведет к неполному использованию мощности данного канала, затрудняет резервирование и ухудшает технико-экономические показатели СЭС в целом.

Для решения подобных задач в энергетике используется подход, основанный на последовательном конструировании вариантов. Сущность этого подхода заключается в следующем: сначала в традиционную структуру КГ вводятся простейшие устройства (типа компенсирующих трансформаторов), предназначенные для компенсации отрицательного влияния ИПЭ. Для этой структуры варьируемые параметры КГ и ИПЭ выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное улучшение качества электроэнергии. Если качество электроэнергии все-таки не удовлетворяет нормированным требованиям, то конструируется следующий вариант, т. е. включаются более сложные компенсирующие устройства, затем заново выполняется оптимальный выбор варьируемых параметров КГ и ИПЭ, и так до тех пор, пока не будет найден удовлетворительный конструктивно-параметрический вариант.

Показателем качества, регламентируемым для импульсно-периодических нагрузок и учитываемым при проектировании СЭС, является модуляция напряжения, определяемая как разность наибольшего и наименьшего значений огибающей кривой, построенной по

амплитудным значениям фазного напряжения. В качестве допустимого значения модуляции напряжения в квазиустановившемся режиме работы принято значение, нормируемое стандартами и составляющее 3,5 В, или в процентном отношении к номинальному действующему значению напряжения:

$$\Delta U_{\max} = \frac{3,5}{\sqrt{2} \cdot 120} \cdot 100\% = 2,068\% \approx 2\%.$$

Таким образом, качество электроэнергии считается удовлетворительным и соответственно одновременное питание ИПЭ и СПЭ — возможны, если модуляция напряжения на СПЭ $\Delta U \leq 2\%$. Выполнение этого ограничения для практически рассматриваемых структур с компенсирующими устройствами связано с большими трудностями. Это обусловлено ограниченным числом варьируемых параметров (в основном параметров корректирующих устройств). Поэтому показатель ΔU выбирается в качестве критерия оптимальности при оптимизации варьируемых параметров ЭС.

Канал генерирования с ИПЭ. Первоначально рассматривается вариант автономного канала генерирования, предназначенного для питания ИПЭ. Предполагается, что все параметры ИПЭ заданы.

Структурная схема такого КГ с ИПЭ приведена на рис. 8.6. В составе КГ используется и РН (точка регулирования находится на выходе СГ). ИПЭ может быть эквивалентным образом представлен в виде симметричной трехфазной активно-индуктивной нагрузки с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,9$. ИПЭ характеризуется периодическим изменением потребляемой мощности S_u или нагрузки (для принятой системы относительных единиц справедливо соотношение $Z_u = I/S_u$) в виде последовательности прямоугольных импульсов, представленных на рис. 8.7, а, либо в виде пачек импульсов, представленных на рис. 8.7, б. ИПЭ характеризуется следующими

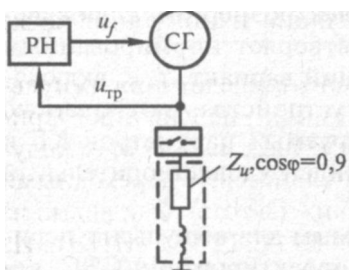


Рис. 8.6. Структурная схема КГ с ИПЭ

временными параметрами: длительностью импульса $T_{\text{имп}}$, длительностью паузы T_n , периодом импульсов или пачек импульсов T либо их частотой ($f = 1/T$). Для предварительной оценки рассматриваемого КГ следует исследовать режимы включения и работы на ИПЭ с заданным характером изменения мощности и параметрами. Предполагается, что до включения ИПЭ КГ питает нагрузку мощностью S_n . Результаты моделирования КГ с ИПЭ приведены в

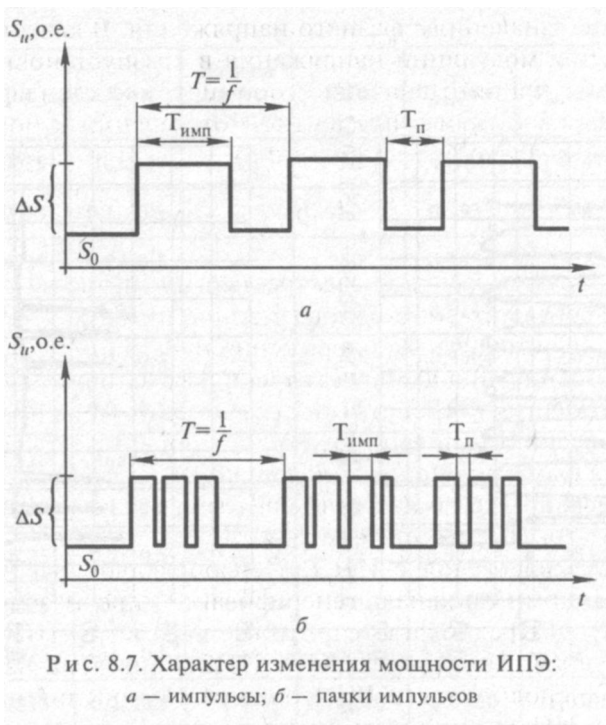


табл. 8.1, графики характерных процессов по напряжению СГ показаны на рис. 8.8.

Приведенные результаты моделирования получены для различных частот следования импульсов, диапазонов изменения мощности и различного характера изменения мощности ИПЭ.

Анализ результатов моделирования показывает, что при изменении диапазона мощности ΔS модуляция напряжения ΔU в квазиустановившихся режимах изменяется пропорционально ΔS . Так, при увеличении пределов ΔS в два раза модуляция напряжения также уменьшается примерно в 0,75 раза.

Можно заметить, что с увеличением частоты следования импульсов модуляция напряжения имеет тенденцию к уменьшению. Причем на высоких частотах работы ИПЭ, согласно рис. 8.8, а, г, модуляция напряжения обусловлена исключительно сверхпереходными составляющими напряжения СГ, а на низких частотах, как видно из рис. 8.8, б, в, — параметрами элементов КГ (СГ, РН, ИПЭ). Из этого можно заключить, что при исследованиях ИПЭ с различной частотой процессы по напряжению можно рассматривать как наложение процессов, обусловленных в отдельности высокочастотными

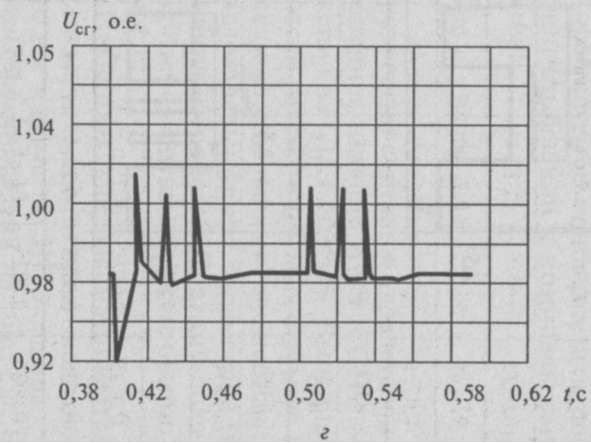
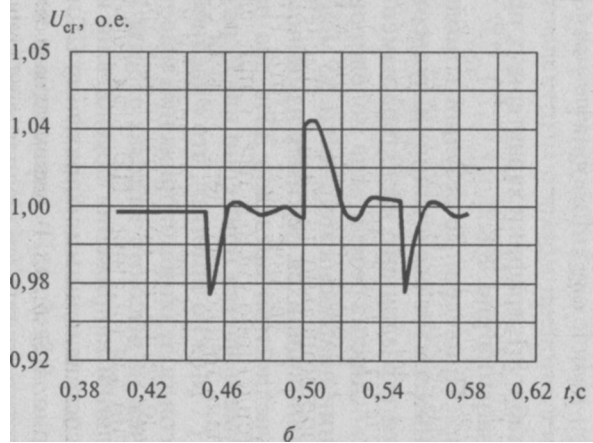
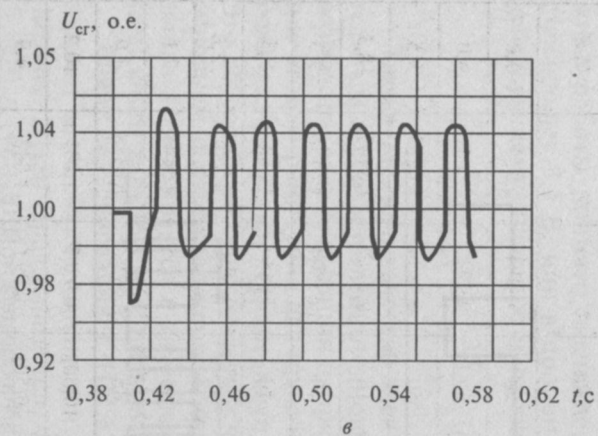
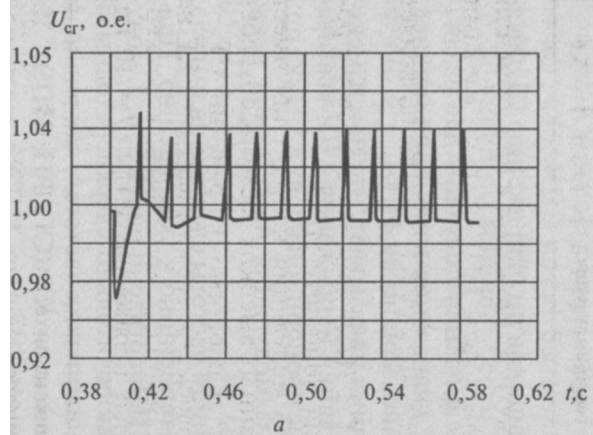


Таблица 8.1

$T_{\text{имп}}, \text{с}$	$T_n, \text{с}$	$\Delta S, \text{о.е.}$	Наличие пачек (+; -)	$f, \text{Гц}$	$U_{\text{мин}}, \text{о.е.}$	$U_{\text{мак}}, \text{о.е.}$	$\Delta U, \%$
0,0125	0,0025	0,2...1	-	50	0,984	1,0747	9,0
0,0125	0,0025	0,1...0,5	-	50	0,9933	1,04	4,0
0,0125	0,0025	0,2...0,5	-	50	0,9934	1,0285	3,5
0,05	0,05	0,2...1	-	10	0,9112	1,0945	18,3
0,05	0,05	0,1...0,5	-	10	0,9504	1,0438	9,3
0,05	0,05	0,2...0,5	-	10	0,9644	1,03	6,5
0,0125	0,0125	0,2...1	-	40	0,962	1,088	12,6
0,0125	0,0125	0,1...0,5	-	40	0,9735	1,0445	7,1
0,0125	0,0125	0,2...0,5	-	40	0,97127	1,0318	6,0
0,0025	0,0025	0,2...1	+	10(50)	0,9807	1,083	10,2
0,0025	0,0025	0,1...0,5	+	10(50)	0,993	1,042	4,9
0,0025	0,0025	0,2...0,5	+	10(50)	0,9936	1,0301	3,6

и низкочастотными импульсами. Это подтверждается при изучении процессов, когда низкочастотные импульсы ИПЭ следуют пачками высокочастотных импульсов.

Таким образом, предварительная оценка КГ с ИПЭ позволяет сделать следующие выводы.

1. Модуляция напряжения в КГ с ИПЭ изменяется почти пропорционально диапазону изменения мощности ИПЭ.

2. С увеличением частоты ИПЭ модуляция напряжения имеет тенденцию уменьшаться и при заданных высоких частотах обусловлена только сверхпереходными составляющими напряжения СГ.

3. Качество электроэнергии в рассматриваемом варианте КГ не удовлетворяет нормированным требованиям к качеству электроэнергии для питания СПЭ. При заданных параметрах ИПЭ ($f = 10 \text{ Гц}$,

Рис. 8.8. Процессы по напряжению на выходе СГ в КГ с ИПЭ.

Частота импульсов ИПЭ:

$a - 50 \text{ Гц}, T_{\text{имп}} = 0,0035 \text{ с}, T_n = 0,0025 \text{ с};$
 $b - f = 10 \text{ Гц}, T_{\text{имп}} = T_n;$
 $в - f = 40 \text{ Гц}, T_{\text{имп}} = T_n;$
 $г - \text{пачки импульсов } f = 10 (50) \text{ Гц}$

$T_{\text{имп}} = T_{\text{п}}; \Delta S = 0,1 \dots 0,5 \text{ о. е.}, \cos \varphi = 0,9$) модуляция составляет 9,3%. Поэтому следует разработать очередной вариант КГ.

КГ с ИПЭ, СПЭ и компенсирующим трансформатором. Для улучшения качества электроэнергии КГ с ИПЭ предлагается в рассмотренный выше КГ одновременно включить компенсирующий трансформатор (КТ) и СПЭ. Структурная схема КГ с ИПЭ, СПЭ, КТ приведена на рис. 8.9.

Принципиальная схема блока приемников электроэнергии с КТ приведена на рис. 8.10. Принцип действия КТ состоит в следующем: при коммутации импульсов резко изменяется ток в ИПЭ i_2 , что ведет к изменению напряжения на выходе СГ $U_{\text{сг}}$, и, следова-

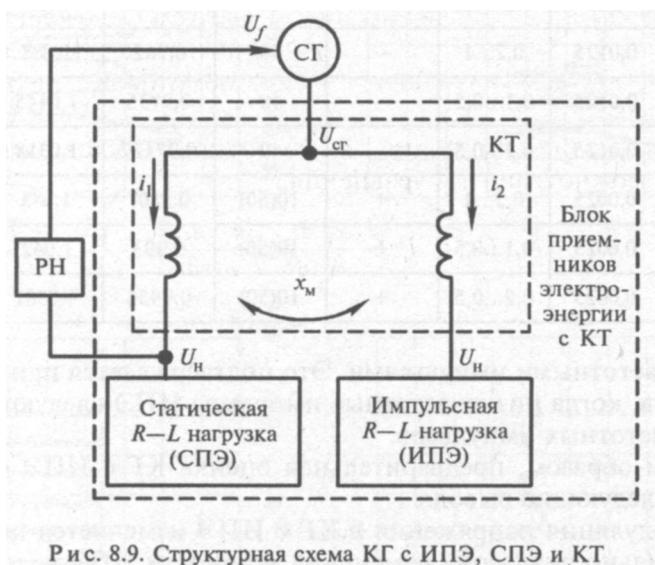


Рис. 8.9. Структурная схема КГ с ИПЭ, СПЭ и КТ

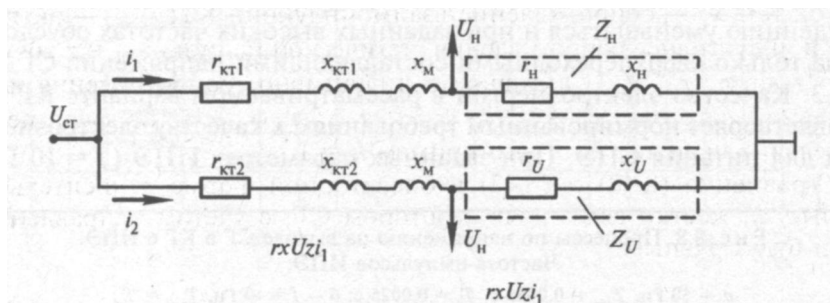


Рис. 8.10. Принципиальная схема блока приемников электроэнергии с КТ

тельно, падение напряжения на СПЭ U_n также подвергается изменению, которое в момент коммутации импульса компенсируется за счет магнитной связи x_m между включенными встречно обмотками КТ. Таким образом, КТ компенсирует изменение напряжения на СПЭ ΔU_n за счет ЭДС, наводимой током вторичной обмотки КТ (включенной последовательно с ИПЭ) в первичной обмотке, включенной между СГ и СПЭ.

Значения индуктивных сопротивлений и сопротивления взаимной индукции КТ выбираются такими, чтобы скомпенсировать сверхпереходные составляющие напряжения СГ. В этом случае сверхпереходная составляющая напряжения СГ, равная $\Delta U_{сг} \approx x''_d \Delta i_2$, на СПЭ компенсируется за счет ЭДС $\Delta U_n = -x_m \Delta i_2$.

Для упрощения моделирования КТ сделаем следующие допущения: магнитная цепь КТ не насыщена, вихревые токи и потери на гистерезис отсутствуют, сопротивление обмоток КТ не зависит от температуры.

С учетом этих допущений для блока приемников электроэнергии с КТ можно записать уравнения:

$$U_{сг} = i_1 r_1 + \frac{x_1}{\omega} \frac{di_1}{dt} - \frac{x_m}{\omega} \frac{di_2}{dt}; \quad (8.42)$$

$$U_{сг} = i_2 r_2 + \frac{x_2}{\omega} \frac{di_2}{dt} - \frac{x_m}{\omega} \frac{di_1}{dt}; \quad (8.43)$$

$$x_1 = x_{КТ1} + x_n; \quad r_1 = r_{КТ1} + r_n;$$

$$x_2 = x_{КТ2} + x_U; \quad r_2 = r_{КТ2} + r_U;$$

$$x_m = k \sqrt{x_{КТ1} x_{КТ2}},$$

где $r_{КТ1}$, $r_{КТ2}$, $x_{КТ1}$, $x_{КТ2}$ — активные и индуктивные сопротивления обмоток КТ; x_m — сопротивление взаимной индукции КТ; r_n , x_n — активное и индуктивное сопротивления статической нагрузки; $r_n = z_n \cos \varphi_1$; $x_n = z_n \sin \varphi_1$; r_U , x_U — активное и индуктивное сопротивления импульсной нагрузки; $r_U = z_U \cos \varphi_2$; $x_U = z_U \sin \varphi_2$; k — коэффициент передачи, значение которого примем $k = 1$.

Уравнения (8.42) и (8.43) в операторной форме относительно осей d , q , жестко связанных с ротором СГ, с учетом направления осей будут равны

$$U_{d1} = r_1 i_{d1} + \frac{x_1}{\omega} p i_{d1} - x_1 i_{q1} - \frac{x_m}{\omega} p i_{d2} + x_m i_{q2}; \quad (8.44)$$

$$U_{q1} = r_1 i_{q1} + \frac{x_1}{\omega} p i_{q1} + x_1 i_{q1} - \frac{x_m}{\omega} p i_{q2} - x_m i_{d2}; \quad (8.45)$$

$$U_{d2} = r_1 i_{d2} + \frac{x_2}{\omega} p i_{d2} - x_2 i_{q2} - \frac{x_m}{\omega} p i_{d1} + x_m i_{q1}; \quad (8.46)$$

$$U_{q2} = r_1 i_{q2} + \frac{x_2}{\omega} p i_{q2} + x_2 i_{q2} - \frac{x_m}{\omega} p i_{q1} - x_m i_{d1}. \quad (8.47)$$

Уравнения (8.44)–(8.47), выраженные относительно ВХОДОВ—ВЫХОДОВ для потребителей, приведем к виду:

$$i_{d1} = \frac{\frac{U_d}{r_1} - \frac{x_1}{r_1} i_{q1} - \frac{x_m}{r_1 \omega} p i_{d1} + \frac{x_m}{r_1} i_{q2}}{p \frac{x_1}{r_1 \omega} + 1}; \quad (8.48)$$

$$i_{q1} = \frac{\frac{U_q}{r_1} + \frac{x_1}{r_1} i_{d1} - \frac{x_m}{r_1 \omega} p i_{q2} - \frac{x_m}{r_1} i_{d2}}{p (x_1 / r_1 \omega) + 1}; \quad (8.49)$$

$$i_{d2} = \frac{\frac{U_d}{r_2} - \frac{x_2}{r_2} i_{q2} - \frac{x_m}{r_2 \omega} p i_{d1} + \frac{x_m}{r_2} i_{q1}}{p (x_2 / r_2 \omega) + 1}; \quad (8.50)$$

$$i_{q2} = \frac{\frac{U_q}{r_2} + \frac{x_2}{r_2} i_{d2} - \frac{x_m}{r_2 \omega} p i_{q1} - \frac{x_m}{r_2} i_{d1}}{\frac{x_2}{r_2 \omega} p + 1}. \quad (8.51)$$

Напряжение на СПЭ определим по уравнениям

$$U_{dH} = i_{d1} r_H + p i_{d1} \frac{x_H}{\omega} + i_{q1} x_H; \quad (8.52)$$

$$U_{qH} = i_{q1} r_H + p i_{q1} \frac{x_H}{\omega} + i_{d1} x_H; \quad (8.53)$$

$$U_H = \sqrt{U_{dH}^2 + U_{qH}^2}. \quad (8.54)$$

Аналогичные уравнения записываются для ИПЭ. Значения тока СГ по продольной и поперечной осям определим по уравнениям

$$i_d = i_{d1} + i_{d2}; \quad (8.55)$$

$$i_q = i_{q1} + i_{q2}; \quad (8.56)$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (8.57)$$

Эти уравнения описывают работу блока приемников электроэнергии с КТ.

Для оценки влияния КТ на качество электроэнергии следует исследовать и сравнивать квазиустановившиеся режимы работы ИПЭ (как для случаев прямоугольных импульсов, так и пачек импульсов) в структуре КГ с ИПЭ, СПЭ и КТ и аналогичные режимы в структуре без КТ. При этом мощность СПЭ выбирается таким образом, чтобы максимально использовать мощность КГ, т. е. при рассматриваемом диапазоне изменения мощности ИПЭ $\Delta S = 0,1 \dots 0,5$ о. е.; мощность СПЭ задается $S_H = 0,5$ о. е.

Для наиболее общего случая работы ИПЭ, когда импульсы следуют пачками, результаты моделирования приведены на рис. 8.11. Высокочастотные коммутации ИПЭ в пачке импульса практически полностью компенсируются КТ. Модуляция напряжения на СПЭ обусловлена частотой следования пачек импульсов. КТ вносит некоторое «запаздывание» процесса на низких частотах следования пачек (в данном случае $f = 10$ Гц). Это, в свою очередь, ведет к реакции РН на плавное изменение напряжения СПЭ, вследствие чего модуляция напряжения уменьшается с 7,6% для КГ без КТ до 4,7% для КГ с КТ. Таким образом, высокочастотные коммутации в пачках импульсов для структур КГ с КТ можно не учитывать и рассматривать ИПЭ как эквивалентные прямоугольные импульсы с низкой частотой 10...40 Гц.

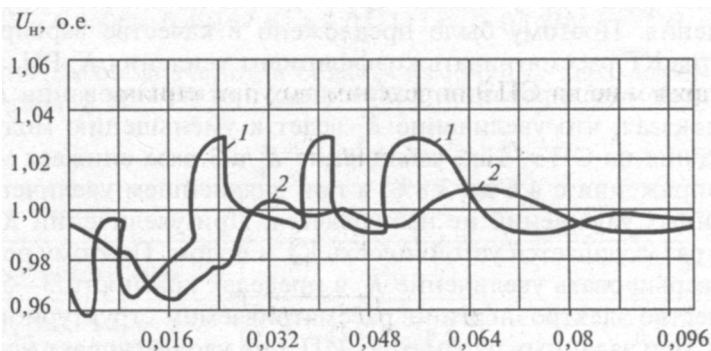


Рис. 8.11. Иллюстрация работы КГ с ИПЭ и ПЭ:

1 — без КТ; 2 — с КТ

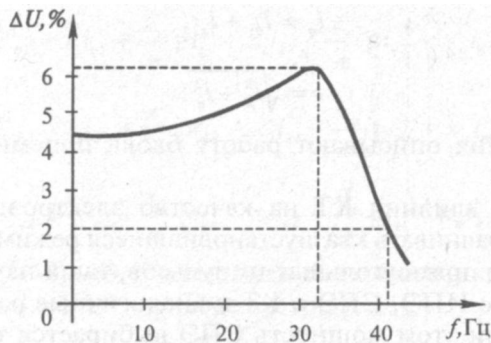


Рис. 8.12. Зависимость модуляции напряжения на СПЭ от частоты следования импульсов ИПЭ, $T_{\text{имп}} = T_{\text{п}}$; $\Delta S = 0,1 \dots 0,5$ о. е.

Анализ результатов моделирования, полученных при варьировании частоты следования импульсов (рис. 8.12), показал, что наибольшее значение модуляции напряжения на СПЭ, равное 6,15%, или 10,4 В, ожидается при частоте 32 Гц. При дальнейшем увеличении частоты модуляция напряжения уменьшается и при частоте 40 Гц составляет 3,8 В, а на частотах 45 Гц и выше удовлетворяет нормированному качеству электроэнергии. В соответствии с полученными результатами работа ИПЭ в диапазоне частот 12...35 Гц не рекомендуется. Таким образом, анализ результатов при варьировании частоты показывает, что дальнейшие исследования рекомендуется проводить для заданной частоты следования импульсов ИПЭ, равной 10 Гц.

Из рис. 8.11 видно, что за счет запаздывания процесса по напряжению на СПЭ РН «успевает» среагировать на плавное изменение напряжения. Поэтому было предложено в качестве варьируемого параметра КГ рассматривать коэффициент усиления K_p РН. Анализ результатов моделирования, полученных при варьировании K_p (рис. 8.13), показал, что увеличение K_p ведет к уменьшению модуляции напряжения на СПЭ. Так, увеличение K_p в 3 раза снижает модуляцию напряжения с 4,6 до 3,8%, а при дальнейшем увеличении существенных улучшений не наблюдается. При увеличении K_p более чем в 7 раз ухудшается устойчивость КГ в целом. Поэтому рекомендуется варьировать увеличение K_p в пределах кратности 3—5.

Качество электроэнергии в рассматриваемом структурном варианте КГ при заданных параметрах ИПЭ не удовлетворяет нормированному значению. Поэтому представляет интерес диапазон изменения мощности ИПЭ, при котором нормируемое качество удовлетворяется.

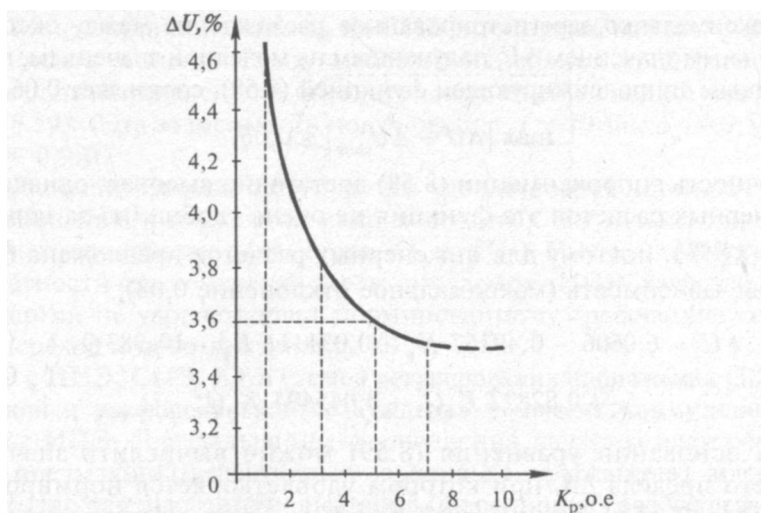


Рис. 8.13. Зависимость модуляции напряжения на СПЭ от кратности увеличения коэффициента усиления РН. Параметры ИПЭ: $S = 0,1 \dots 0,5$ о. е., $\cos \varphi = 0,9$; $T_{\text{имп}} = T_n$; $f = 10$ Гц

Для того чтобы каждый раз не пользоваться цифровой моделью КГ с ИПЭ, СПЭ и КТ, целесообразно получить аналитическую зависимость значения модуляции напряжения на СПЭ от кратности увеличения K_p и диапазона изменения мощности ИПЭ ΔS . С этой целью на модели был поставлен ряд экспериментов, в результате которых получена зависимость, аппроксимированная методом наименьших квадратов:

$$\Delta U = 6,0606 - 0,49167 K_p + 0,031111 K_p^2 + 0,14761 K_p^{10,092} Q_2, \quad (8.58)$$

где принятые обозначения и область изменения параметров приведены в табл. 8.2

Таблица 8.2

Параметр	Обозначение	Область изменения
Коэффициент усиления РН	K_p	1...7
Диапазон изменения мощности ИПЭ	$\Delta S = Q_2 \dots 0,5$	0,1...0,4
Модуляция напряжения на СПЭ	ΔU	—

Максимальное зарегистрированное расхождение между экспериментальным значением ΔU , полученным на модели, и значением, предсказанным аппроксимирующей функцией (8.58), составляет 0,06, т. е.

$$\max |\Delta U - \Delta U_{\text{анпр}}| \leq 0,06.$$

Точность аппроксимации (8.58) достаточно высокая, однако для инженерных расчетов эта функция не очень удобна (из-за наличия члена $K_p^{10,092}$), поэтому для инженерных расчетов предложена более простая зависимость (максимальное отклонение 0,08);

$$\Delta U = 6,0606 - 0,49167 K_p + 0,031111 K_p^2 - 10,983 Q_2 + 0,82822 K_p Q_2 + 0,045494 K_p Q_2^2. \quad (8.59)$$

На основании уравнения (8.59) можно вычислить значение нижнего предела ΔS , при котором удовлетворяется нормированное $\Delta U = 2\%$. Так, для $\Delta U = 2\%$ при $K_p = 3$ о. е. можно определить $\Delta S = 0,33...0,5$ о. е. Расчет режима на модели при диапазоне изменения мощности ИПЭ $\Delta S = 0,33...0,5$ о. е. и $K_p = 3$ о. е. подтверждает расчет с помощью уравнения (8.59). Таким образом, исследования КГ с ИПЭ, СПЭ и КТ позволяют сделать следующие выводы.

1. Эффективность использования КТ зависит от частоты ИПЭ. Работа ИПЭ в диапазоне частот 12...35 Гц не рекомендуется. При частоте 45 Гц и выше и изменении мощности ИПЭ в пределах $\Delta S = 0,1...0,5$ о. е. качество напряжения на СПЭ удовлетворяет нормированному требованию. При этом модуляция на ИПЭ составляет 8,6% и менее.

КТ полностью компенсирует высокочастотные импульсы в пачках. Вследствие этого вместо пачек импульсов можно рассматривать прямоугольные импульсы.

При заданных параметрах ИПЭ ($f = 10$ Гц; $T_{\text{имп}} = T_p$; $\Delta S = 0,1...0,5$ о. е.; $\cos \varphi = 0,9$) и параметрах СПЭ ($S_H = 0,5$ о. е.; $\cos \varphi = 0,9$) введение КТ в состав КГ снижает модуляцию напряжения на СПЭ от 7,7% для КГ без КТ до 4,7% для КГ с КТ. При этом модуляция напряжения на ИПЭ увеличивается с 7,7 до 11,3%.

2. Увеличение коэффициента усиления РН приводит к уменьшению модуляции напряжения на СПЭ. Коэффициент усиления РН рекомендуется увеличить в 3—5 раз. При увеличении коэффициента усиления РН в 3 раза и диапазоне изменения мощности ИПЭ $\Delta S = 0,35...0,5$ качество напряжения на СПЭ удовлетворяет нормированному требованию. При этом модуляция на ИПЭ составляет 4,9%.

3. Модуляция напряжения на СПЭ при заданных значениях коэффициента усиления РН и диапазона изменения мощности ИПЭ может быть определена по предлагаемому аналитическому выражению (8.59). (Эта зависимость получена для $f = 10$ Гц; $S_H = 0,5$ о. е.; $\cos \varphi = 0,9$.)

4. Рассматриваемая структура КГ удовлетворяет нормированному требованию к модуляции напряжения на СПЭ только при определенных сочетаниях параметров КГ и ИПЭ. В остальных случаях, и в частности для конкретно рассматриваемого ИПЭ, качество электроэнергии не удовлетворяет нормированному требованию, требуется переход к новому варианту КГ.

КГ с ИПЭ, СПЭ, КТ и схемой регулирования напряжения СГ форсировкой и расфорсировкой возбуждения в момент коммутации импульсов ИПЭ. Для дальнейшего улучшения качества электроэнергии в предыдущий структурный вариант КГ предлагается включить устройство для быстрого повышения (форсировки) возбуждения СГ в течение времени τ_1 при коммутации импульса и понижения (расфорсировки) возбуждения в течение времени τ_2 при его паузе. Структурная схема СГ с блоком управления (БУ) форсировкой и расфорсировкой возбуждения СГ приведена на рис. 8.14.

Суть предложенного варианта КГ заключается в следующем. РН регулирует возбуждение СГ как функцию напряжения в точке регулирования, которая находится на СПЭ. Введение КТ в состав КГ позволяет уменьшить модуляцию напряжения на СПЭ за счет того, что компенсируется резкое изменение напряжения и процессы сглаживаются. Таким образом, РН реагирует на сглаженное, плавно изменяющееся напряжение на СПЭ, и за счет этого происходит некоторое запаздывание в срабатывании РН. В рассматриваемом структурном

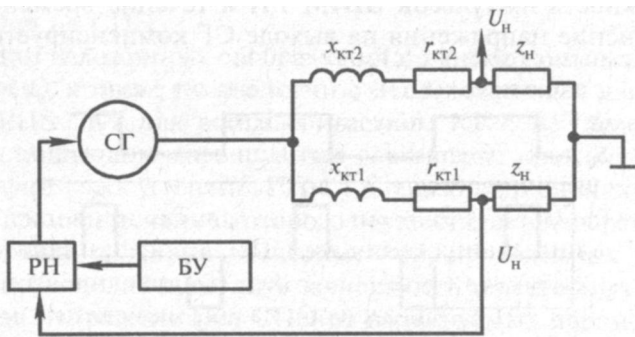


Рис. 8.14. Структурная схема КГ с блоком управления форсировкой и расфорсировкой возбуждения СГ в момент коммутации импульсов ИПЭ

варианте КГ предлагается с изменением мощности ИПЭ резко изменить возбуждение СГ и, таким образом, скомпенсировать нечувствительность РН в начальные моменты коммутации импульсов ИПЭ.

Отметим, что подобные системы с упреждающей импульсной форсировкой возбуждения использованы в судовых системах электроснабжения для автоматической стабилизации напряжения СГ при питании только импульсной нагрузки, равной номинальной мощности КГ. В данном же случае БУ форсировкой и расфорсировкой предполагается использовать в качестве устройства для совместного функционирования с КТ, с целью ликвидации нежелательных эффектов, вносимых КТ (имеется в виду запаздывание реакции РН на изменение напряжения СГ). При таком сочетании устройств для подавления модуляции напряжения КТ компенсирует высокочастотные импульсы, а БУ форсировкой и расфорсировкой СГ — низкочастотные.

Практическая реализация такого регулирования осуществима в том случае, если выполняются два основных требования:

- возможность получения информации об изменении мощности ИПЭ до момента коммутации импульса. Указанное требование для рассматриваемых ИПЭ выполнимо;
- конструктивная возможность управлять форсировкой и расфорсировкой напряжения. Эта возможность обеспечивается путем подачи внешнего сигнала управления скважностью импульсов ШИМ (γ) в РН.

Для реализации указанного закона возбуждения СГ предлагается использовать устройство формирования импульсов (БУ) (рис. 8.15), принцип действия которого заключается в следующем: при коммутации импульса ИПЭ подается сигнал, максимально увеличивающий скважность импульсов ШИМ РН в течение времени τ_1 . При этом изменение напряжения на выходе СГ компенсируется за счет

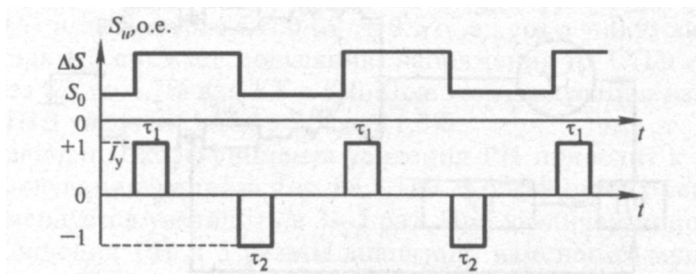


Рис. 8.15. График, иллюстрирующий работу блока управления:

- +1 — сигнал на форсировку возбуждения в течение τ_1 ;
- 1 — сигнал на расфорсировку возбуждения в течение τ_2

резкого увеличения тока возбуждения и соответственно напряжения возбуждения СГ. При паузе импульсов ИПЭ происходят обратные процессы в течение времени τ_2 . По окончании действия сигналов БУ, в промежутке между τ_1 и τ_2 , регулирование СГ осуществляется средствами РН. Для такой схемы регулирования можно записать уравнения:

$$j' = \begin{cases} 1, \text{ если } I_y = +1; \\ 0, \text{ если } I_y = -1; \\ j - \text{ в остальных случаях,} \end{cases} \quad (8.60)$$

где j — скважность импульсов.

Для оценки влияния форсировки и расфорсировки возбуждения СГ на качество электроэнергии в рассматриваемом варианте КГ следует смоделировать и сравнить несколько квазиустановившихся режимов работы ИПЭ при различных значениях параметров τ_1 и τ_2 . Результаты моделирования КГ с БУ приведены на рис. 8.16. Анализ результатов показывает, что за счет введения БУ с параметрами τ_1 и τ_2 в исследуемом процессе по напряжению возникает ряд характерных точек, обозначенных $U_1 - U_6$, которые определяют модуляцию напряжения на СПЭ. Предварительные исследования показали, что значения τ_1 и τ_2 следует выбрать в интервале 2...10 мс, так как при значениях, меньших 2 мс, влияние БУ на процессы неощутимо, а при значениях, больших 10 мс, БУ оказывает настолько сильное влияние, что наблюдается перекомпенсация напряжения и за счет этого — увеличение модуляции напряжения. Таким образом, задача исследования рассматриваемой структуры КГ сводится к подбору сочетания значений τ_1 и τ_2 , обеспечивающих минимум модуляции напряжения на СПЭ.

С учетом изложенных соображений по выбору оптимальных значений τ_1 и τ_2 , а также по аналогии с исследованиями для предыдущего варианта КГ для рассматриваемого КГ с БУ целесообразно выделить следующие варьируемые параметры: кратность увеличения коэффициента усиления РН K_p , диапазон изменения мощности ИПЭ ΔS , время, в течение которого осуществляется форсировка τ_1 и расфорсировка τ_2 . Серия экспериментов, проведенных на модели КГ с БУ, позволила определить зависимость характерных всплесков и провалов напряжения на СПЭ от варьируемых параметров, т. е. были получены следующие зависимости: $U_1 = f_1(\tau_1)$; $U_2 = f_2(\tau_1)$; $U_3 = f_3(\tau_1)$; $U_4 = f_4(\tau_1)$; $U_5 = f_5(\tau_1)$; $U_6 = f_6(\tau_1)$ для различных значений K_p ($K_p = 1; 3; 5$) и ΔS ($\Delta S = 0,1...0,5; 0,2...0,5; 0,25...0,5$).

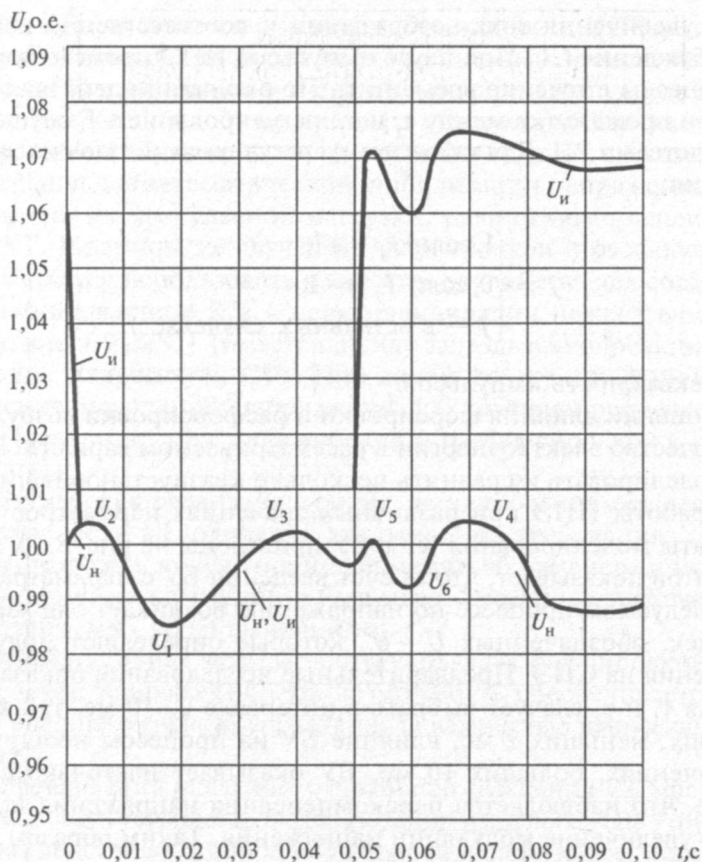


Рис. 8.16. Напряжения на импульсной нагрузке ($U_{и}$) и статической нагрузке ($U_{н}$) при регулировании возбуждения генератора форсировкой-расфорсировкой в течение времени τ_1 , τ_2 при параметрах: $K_p = 3$ о. е.; $S_n = 0,1 \dots 0,5$ о. е.; $\tau_1 = 3,5$ мс; $\tau_2 = 8$ мс

Для нахождения оптимальных сочетаний τ_1 и τ_2 воспользуемся наиболее простым методом — методом перебора τ_1 и τ_2 с заданным шагом. Алгоритм вычисления минимального значения модуляции напряжения на СПЭ и параметров τ_1 и τ_2 , при которых она обеспечивается, приведен на рис. 8.17, где τ_{01} , τ_{02} — начальные значения τ_1 и τ_2 (в данном случае 2 мс); $U_{опт}$ — предварительно заданное значение $U_{опт}$, заведомо превышающее ожидаемые значения $U_{опт}$ (например, 10); SH — шаг изменения параметров τ_1 и τ_2 . Шаг SH выбирается таким образом, чтобы при переходе от одного значения τ_1 или τ_2 к другому максимальное улучшение $U_{опт}$ не превышало 0,01, и зада-

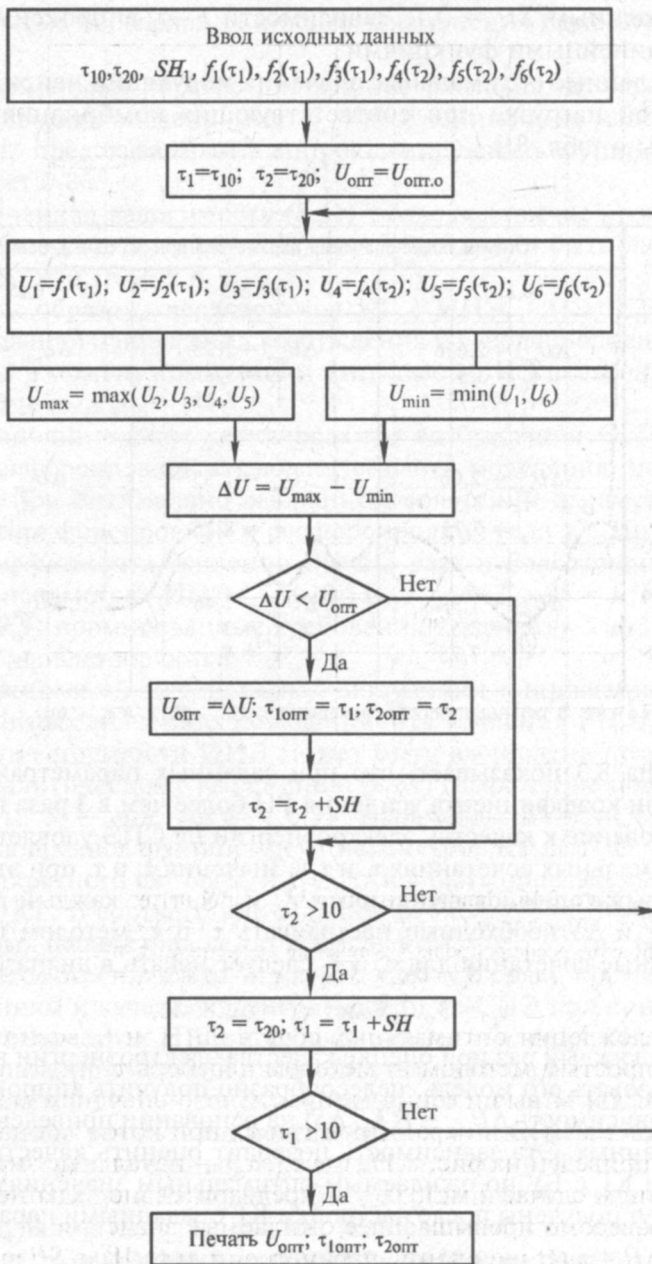


Рис. 8.17. Алгоритм вычисления минимального значения модуляции напряжения на СПЭ методом перебора τ_1 и τ_2

ется постоянным $SH = 0,1$. Зависимости f_1-f_6 аппроксимируются кусочно-линейными функциями.

Вычисленные оптимальные значения модуляции напряжения на статической нагрузке при соответствующих комбинациях τ_1 и τ_2 приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

K_p , о. е.	Оптимальные значения параметров при ΔS (о. е.), равном		
	0,1...0,5	0,2...0,5	0,25...0,5
1	$\Delta U_{\text{опт}} = 2,636$ $\tau_1 = 3,5$ $\tau_2 = 7,75$	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,93$ $\tau_1 = 3$ $\tau_2 = 7,25$	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,51$ $\tau_1 = 3,5$ $\tau_2 = 6$
3	$\Delta U_{\text{опт}} = 2,06$ $\tau_1 = 3,5$ $\tau_2 = 7,75$	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,55$ $\tau_1 = 3$ $\tau_2 = 8,25$	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,3$ $\tau_1 = 3$ $\tau_2 = 5,75$
5	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,99$ $\tau_1 = 3,5$ $\tau_2 = 7,75$	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,46$ $\tau_1 = 3$ $\tau_2 = 8$	$\Delta U_{\text{опт}} = 1,2$ $\tau_1 = 3$ $\tau_2 = 6$

Примечание. В таблице приняты размерности: ΔU — %; τ_1 и τ_2 — мс.

Таблица 8.3 показывает, что при заданных параметрах ИПЭ и увеличении коэффициента усиления РН более чем в 3 раза нормируемое требование к качеству электроэнергии на СПЭ удовлетворяется (при оптимальных сочетаниях τ_1 и τ_2). Значения τ_1 и τ_2 при этом являются прерывающимися функциями K_p и ΔS , т. е. каждый раз после выбора K_p и ΔS необходимо настраивать τ_1 и τ_2 методом перебора. Оптимальные сочетания для τ_1 и τ_2 следует искать в диапазонах:

$$\tau_1 = 3 \dots 3,5 \text{ мс}; \tau_2 = 6 \dots 8 \text{ мс.}$$

Чтобы каждый раз при оценке качества электроэнергии в КГ с БУ не использовать его модель, целесообразно получить аппроксимированную зависимость $\Delta U_{\text{опт}} = f(K_p, \Delta S)$ на основании приведенных табличных данных. Эта зависимость позволит оценить качество электроэнергии КГ с БУ по ожидаемым оптимальным значениям ΔU , которые будут получены после настройки КГ с заданными параметрами:

$$\Delta U_{\text{опт}} = 3,7192 - 7,5596 Q_2 - 0,44606 K_p + 0,5442 K_p Q_2 + 0,03798 K_p^2, \quad (8.61)$$

где принятые обозначения и область изменения параметров даны в табл. 8.2.

Максимальное зарегистрированное расхождение между экспериментальными значениями $\Delta U_{\text{онт}}$, полученными на модели, и значениями, предсказанными аппроксимирующей функцией (8.61), составляет 0,06.

Полученная зависимость (8.61) позволяет вычислить, что нормированное качество ($\Delta U = 2\%$) при $K_p = 1$ может быть удовлетворено при $\Delta S = 0,15 \dots 0,5$ о. е.

Таким образом, исследования КГ с ИПЭ, СПЭ, КТ и схемой регулирования напряжения возбуждения СГ форсировкой и расфорсировкой в момент коммутации импульсов ИПЭ позволяют сделать следующие выводы.

1. Дополнительное регулирование возбуждения СГ форсировкой и расфорсировкой позволяет снизить модуляцию напряжения на СПЭ при оптимально выбранном сочетании параметров блока управления форсировкой и расфорсировкой (τ_1 и τ_2). При увеличении коэффициента усиления РН в 3 раза и более, конкретно заданных параметрах ИПЭ ($f = 10$ Гц; $T_{\text{имп}} = \Gamma$; $\Delta S = 0,1 \dots 0,5$ о. е., $\cos \varphi = 0,9$) нормированные требования к качеству электроэнергии на СПЭ удовлетворяются.

2. Ожидаемая минимальная модуляция напряжения на СПЭ при заданных значениях коэффициента усиления РН и диапазоне изменения мощности ИПЭ может быть вычислена по предлагаемому аналитическому выражению (8.61) (выражение получено при $f = 10$ Гц; $S_{\text{н}} = 0,5$; $\cos \varphi = 0,9$). Параметры БУ τ_1 и τ_2 являются прерывающимися функциями от параметров КГ и ИПЭ, и для каждого конкретного случая τ_1 и τ_2 должны быть определены после настройки КГ. В соответствии с данными табл. 8.3 оптимальные значения этих параметров лежат в пределах: $\tau_1 = 3 \dots 3,5$ мс; $\tau_2 = 6 \dots 8$ мс.

3. Рассмотренная структура КГ удовлетворяет нормированным требованиям к качеству электроэнергии на СПЭ при конкретно заданных параметрах ИПЭ и коэффициенте усиления РН, увеличенном в 3 раза, при условии настройки параметров БУ. Такая структура КГ рекомендуется для одновременного питания ИПЭ и СПЭ.

Сравнение результатов моделирования с экспериментами. В табл. 8.4 дается сравнительный анализ исследований КГ с ИПЭ, полученных на макете и на модели. (Ниже сравниваются численные данные модуляции напряжения, преобразованные к действующим значениям, т. е. уменьшенные согласно требованиям стандартов в $\sqrt{2}$ раз. При этом **нормированное** значение модуляции напряжения на СПЭ составляет $3,5/\sqrt{2} \text{ В} \approx 2,5 \text{ В}$.)

Таблица 8.4

№	f , Гц	Скваж- ность	$\Delta U_{\text{СГ}}$, В		Δ , В	τ_{Δ} , %	$\tau_{U_{\text{баз}}}$, %
			макет	модель			
1	10	0,5	1,5	11,2	3,8	25	3,2
2	50	0,8	8	5,5	2,5	31	2,1

Здесь скважность определяется по выражению: $T_{\text{имп}} / (T_{\text{имп}} + T_{\text{н}})$,

$\tau_{\Delta} = \frac{\Delta}{\Delta U_{\text{СГ макет}}} 100\%$ — относительная ошибка модели, приведенная к Δ ($\Delta = |\Delta U_{\text{СГ макет}} - \Delta U_{\text{СГ модель}}|$) модуляции напряжения на СГ;

$\tau_{U_{\text{баз}}} = \frac{\Delta}{U_{\text{баз}}} 100\% = \frac{\Delta}{120}$ — относительная ошибка модели, приведенная к базовому напряжению СГ (120 В).

В табл. 8.5 дан сравнительный анализ результатов исследований КГ с ИПЭ и СПЭ.

Таблица 8.5

№	f , Гц	Наличие пачек (+)	Скваж- ность	Наличие (+)		$\Delta U_{\text{СГ}}$, В		Δ , В	σ_{Δ} , %	$\sigma_{U_{\text{баз}}}$, %
				КТ	БУ	макет	мо- дель			
1	10	—	0,5	—	—	11	9,5	1,5	14	1,25
2	10	—	0,5	+	—	8	5,6	2,4	30	2
3	50	—	0,8	—	—	7	5	2	29	1,7
4	50	—	0,8	+	—	1	0,8	0,2	20	0,2
5	10(50)	+	0,8	—	—	14	9,4	4,6	32	3,8
6	10(50)	+	0,8	+	—	8	5,3	2,7	34	2,25
7	10	—	0,5	+	+	2...3 (2,5)	3,1	0,6	24	0,5

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие заключения.

1. Экспериментально подтверждается, что модуляция напряжения в КГ с ИПЭ с увеличением частоты ИПЭ имеет тенденцию уменьшаться и при высоких частотах обусловлена только сверхпереходными **составляющими**. Так, при частоте ИПЭ $f = 10$ Гц, скваж-

ности 0,5 экспериментально получена модуляция напряжения на СГ 15 В; при частоте 50 Гц, скважности 0,8 модуляция снизилась до 8 В, т. е. уменьшилась на 7 В. Моделирование тех же режимов показало, что модуляция должна снизиться с **11,2** до 5,5 В, т. е. на 5,7 В.

2. Экспериментально подтверждается, что эффективность использования КТ в КГ с ИПЭ и СПЭ зависит от частоты импульсов ИПЭ. Так, при частоте ИПЭ $f = 10$, скважности **0,5** введение КТ позволяет снизить модуляцию напряжения на СПЭ с **11** до 8 В, т. е. на 3 В. При моделировании тех же режимов было получено уменьшение модуляции с 9,5 до 5,6 В, т. е. на 3,8 В. При частоте ИПЭ $f = 50$ Гц, скважности 0,8 введение КТ позволяет уменьшить модуляцию напряжения на СПЭ с 7 до 1 В, т. е. на 6 В. При моделировании было получено уменьшение модуляции с 5 до 0,8 В, т. е. на 4,2 В.

Таким образом, экспериментально подтверждается вывод, что при высоких частотах ИПЭ модуляция напряжения на СПЭ удовлетворяет нормированному значению (на модели — 0,8 В, на макете — 1 В).

3. Экспериментально подтверждается, что введение КТ в КГ с ИПЭ и СПЭ позволяет компенсировать высокочастотные коммутации импульсов в пачках (когда пачки импульсов следуют с частотой 10 Гц, скважностью 0,5; импульсы в пачке — с частотой 50 Гц, скважностью 0,8). Так, экспериментально установлено, что модуляция напряжения на СПЭ в случае пачек импульсов без КТ составляет 14 В, а при введении КТ снижается до 8 В, т. е. на 6 В, и совпадает с модуляцией напряжения на СПЭ, когда импульсы следуют без пачек с $f = 10$ Гц (в этом случае модуляция на СПЭ также равна 8 В). При моделировании получено, что модуляция в рассмотренных режимах уменьшается с 9,4 до 5,3 В, т. е. на **4,1** В, и тоже совпадает с модуляцией на СПЭ, когда импульсы следуют без пачек (в этом случае модуляция на СПЭ равна 5,6 В).

Сравнение результатов, полученных при исследовании структур КГ с ИПЭ, СПЭ и КТ для случаев пачек импульсов и прямоугольных импульсов без пачек, подтверждает вывод, что при структуре КГ с КТ вместо режимов коммутации пачек импульсов можно рассматривать эквивалентные режимы коммутации прямоугольных импульсов с низкой частотой 10 Гц. Высокочастотные коммутации пачек с частотой 50 Гц практически компенсируются за счет введения КТ (на макете — 8 В, на модели — 5,6 В).

4. Экспериментально подтверждается, что введение в структуру КГ с ИПЭ, СПЭ и КТ схемы форсировки и расфорсировки возбуждения в момент коммутации импульсов ИПЭ (при условии настройки параметров блока управления **форсировкой—расфорсировкой**) по-

зволяет снизить модуляцию напряжения на СПЭ при низких частотах ИПЭ. Так, при частоте ИПЭ $f = 10$ Гц, скважности 0,5 модуляция напряжения на СПЭ уменьшается с 8 до 2,5 В, т. е. на 5,5 В. При моделировании тех же режимов получено уменьшение модуляции с 5,6 до 3,1 В, т. е. на 2,5 В.

Таким образом, экспериментально доказана возможность использования структуры КГ с КТ и БУ форсировкой и расфорсировкой для одновременного питания ИПЭ и СПЭ при условии настройки параметров БУ.

Сравнение результатов моделирования и макетных испытаний показывает хорошее качественное и количественное совпадение.

Г Л А В А 9

Конструкторско-технологическое проектирование самолетных ЭЭС

§ 9.1. Задачи и методы

Многоэтапный процесс проектирования ЭЭС в целом можно разбить на две стадии. На начальной стадии принимаются принципиальные проектные решения по созданию и расчетно-теоретическому обоснованию системы. Эту стадию принято называть стадией *расчетно-теоретического проектирования*. На следующей, конечной, стадии, называемой стадией *конструкторско-технологического проектирования*, принимаются все решения, необходимые для технической реализации и эксплуатации проектируемой системы на борту самолета. На этой стадии осуществляются декомпозиция и детализация системы до уровня элементов, имеющих цельное конструктивное исполнение и представляющих отдельную конструктивную единицу. Следует отметить, что множество всех элементов бортовых ЭЭС можно разбить на две группы: *функциональные* и *конструкционные* элементы.

К первой группе элементов самолетных ЭЭС относятся источники, преобразователи и приемники электроэнергии, автоматические регуляторы и приборы, обеспечивающие необходимое качество и надежность функционирования системы. Вторую группу составляют элементы, необходимые с точки зрения сборки, крепежа и монтажа системы.

Разработка *функциональных элементов* ЭЭС, как правило, осуществляется не самолетостроительными конструкторскими бюро, а авиационными предприятиями, которые специализируются на изготовлении типового бортового электрооборудования. Поэтому авиационные конструкторы ограничиваются выбором типовых функциональных элементов ЭЭС, пользуясь номенклатурой уже готовых изделий, удовлетворяющих поставленным требованиям. И только в

тех случаях, когда удовлетворяющие их готовые изделия отсутствуют, они поручают специализированным предприятиям разработать по их заданиям новые. Конструкторные же элементы авиационные конструкторы и технологи разрабатывают сами, так как они являются не типовыми, а индивидуальными, прямо зависят от специфики борта, для которого их создают. Исходя из этих соображений в самолетостроительных конструкторских бюро разрабатываются также нетиповые функциональные элементы, как, например, электрические связи. С учетом этого ниже рассматриваются те задачи конструкторско-технологического проектирования ЭЭС, которые решаются в самолетостроительных конструкторских бюро.

В содержательном плане задачи *конструкторско-технологического проектирования* имеют следующие отличия. Конструирование оригинальных элементов системы сводится к выбору их форм, размеров и материала; расчетам прочности, жесткости и других требований; составлению чертежей и спецификаций. Процессы конструирования подобно расчетно-теоретическому проектированию могут выполняться на альтернативной основе. С помощью сравнительного анализа альтернативных вариантов выбирается окончательное решение так же, как это делается при оптимизации расчетных проектов. Для конечного варианта формируется конструкторская документация в соответствии с ЕСКД.

В процессе конструирования учитываются также условия агрегирования (сборки) элементов путем выбора технологических допусков, классов точности, чистоты обработки сопрягаемых поверхностей, способов сопряжения и т. п. Требования к технологичности конструкции не формализованы и не унифицированы, но во многих случаях достаточно ясны и понятны. Они призваны обеспечить простоту конструкции и ее форм, малый расход материалов, малые отходы и потери в процессе производства, высокую производительность и низкую стоимость производства.

Проектирование технологических процессов агрегирования и сборки конструкций также начинается с выявления возможных альтернатив, причем число вариантов здесь может быть даже больше, чем при конструировании. Это обусловлено тем, что процесс изготовления состоит из ряда технологических операций и переходов между ними. Все операции и переходы тоже могут выполняться в разных вариантах, зависящих от наличия технологического оборудования и оснастки. После выбора наилучшего варианта технологического процесса составляется его полное описание в соответствии с единой системой технологической документации (ЕСТД). Надо отметить, что конструкторские и технологические решения суще-

ственно влияют друг на друга и требуют взаимной корректировки посредством нескольких итераций.

В САПР работу конструкторов и технологов можно объединить на базе общей информационной базы данных проекта. Коллективный доступ к единой базе проектных данных позволяет конструкторско-технологическое проектирование выполнять всем вместе. Это предъявляет более высокие требования к организации диалоговых режимов работы САПР, но зато дает и определенные преимущества. Дело в том, что большинство этапов и процедур конструкторско-технологического проектирования не формализовано из-за отсутствия соответствующих логико-математических моделей. Поэтому эти задачи решаются в диалоговом режиме при поддержке быстродействующей информационно-поисковой подсистемы САПР. С одной стороны, это хорошо, так как преемственность с традиционным подходом к проектированию сохраняется. С другой стороны, сохраняются и многие ограничения, присущие традиционному подходу, что не позволяет существенно улучшить качество проектов. В то же время задачи конструкторско-технологического проектирования похожи на задачи расчетно-теоретического проектирования тем, что они тоже имеют многовариантные решения и могут претендовать на поиск оптимальных вариантов. С этой точки зрения целесообразно все или, по крайней мере, большинство проектных задач в САПР решать, как задачи оптимизации. Чтобы распространить такой подход на задачи конструкторско-технологического проектирования, необходимо изучить все имеющиеся возможности их формализации. Если какие-то задачи не удастся описать в математической форме, то для них возможно найдутся эвристические алгоритмы решения на основе обобщения накопленного опыта проектирования.

Интеграция всех стадий и этапов проектирования приводит к еще одному важному результату. Резко сокращается объем выпускаемой проектной документации. Если ранее большая часть документации выпускалась для внутреннего пользования (передачи от расчетных подразделений к конструкторским, от конструкторских к технологическим), то при наличии САПР это теряет смысл. Остается потребность только в тех проектных документах, которые необходимы для передачи в производство, а также обсуждения и принятия решений на вышестоящих уровнях, составления различных альбомов, каталогов, проспектов и инструкций.

Наибольший эффект от интеграции всех стадий проектирования достигается в ГПС (гибкие производственные системы), в которых осуществляется автоматизированный переход от проектиро-

вания к управлению производственными процессами. В ГПС объем проектной документации, выпускаемой в традиционной бумажной форме, сокращается до минимума. Документация, необходимая для управления производственными процессами, получает статус внутреннего пользования и формируется лишь на программно-машинных носителях (диски, дискеты и т. д.) либо передается в базу данных системы управления производством. Это позволяет резко уменьшить суммарные затраты времени и стоимость проектирования и производства в целом, повысить их точность и качество. Кроме того, информационные архивы преобразуются из бумажных в электронные, что делает их намного компактнее.

Преимущества ГПС оплачиваются за счет автоматизированного решения нового класса задач технологического **проектирования**, а именно задач проектирования полного цикла технологических процессов, который обеспечивает производственную реализацию проекта. Надо заметить, что этот класс задач является новым только по содержанию, а по методам решения он не отличается от других задач технологического проектирования. Задачи построения производственных схем такие же сложные и многовариантные, как и все остальные, упомянутые ранее. При этом под производственной схемой понимается вся система взаимосвязанных технологических процессов, с помощью которых реализуется производство проектируемого изделия. Сложность поиска лучших производственных схем обусловлена еще и тем, что кроме выбора технологической базы производства нужно решить и другие, связанные с ним побочные задачи, например такие, как выбор оборудования, оснастки, средств контроля, настройки, транспортировки и автоматизации.

При решении всего комплекса этих задач следует учитывать также их влияние на ряд технико-экономических показателей, таких, как планируемый характер производства, стоимость и т. п. Например, массовое производство отличается наибольшим объемом выпускаемой продукции. Следовательно, от его производственной системы требуются максимальное быстродействие и минимальная стоимость. Производственные системы такого типа строятся, как правило, на базе специализированного оборудования и поточных, конвейерных линий. Наоборот, единичное производство, выпускающее малый объем, но большой ассортимент продукции, нуждается в универсальном оборудовании, пусть даже дорогом. Промежуточное положение между этими видами производства занимает серийное производство со средним объемом выпуска продукции. Соответственно решения по выбору производственной системы в этом случае носят компромиссный характер. В целом задачи технологического проек-

тирования в ГПС более разнообразны по содержанию и формам постановки. Однако по методологии решения они наименее формализованы. Только небольшая часть этих задач решается автоматически с помощью логико-математического моделирования. Остальные решаются в режиме диалогового поиска, т.е. в автоматизированном режиме.

§ 9.2. Оптимизация сечения проводов

Каждый провод электрической сети определяется тремя конструктивными параметрами: маркой, которая определяет материал и изоляцию провода, длиной и сечением. К авиационным проводам предъявляются повышенные требования в отношении диэлектрической и механической прочности, теплостойкости, стойкости к воздействиям топлива, масла и т. п. Для авиационных электросетей используются многожильные медные и алюминиевые провода. Диапазон сечений медных проводов составляет $0,35...95 \text{ мм}^2$. Меньшие сечения не применяются из-за неудовлетворительной механической прочности, а большие — из-за сложности монтажа. Марки медных проводов отличаются в основном изоляцией и достаточно разнообразны: БПВЛ, ПТЛ, БПД, БИФ и т. п. Алюминиевые провода применяются больших сечений (35, 50, 70 и 95 мм^2) и менее разнообразны по маркам.

Выбор *марки провода* зависит от многих факторов: электрических нагрузок, технологии монтажа, условий эксплуатации и т. п. Эти факторы в большинстве своем не формализованы в настоящее время. Учитывая также накопленный опыт построения самолетных электросетей и сравнительно небольшое количество марок проводов, выбор последних можно поручить проектировщику сети в диалоге с ЭВМ.

Длина проводов получает начальную, ориентировочную оценку на стадии эскизного проектирования, когда решается задача выбора конфигурации и размещения электросети на борту с помощью наиболее простых геометрических моделей летательных аппаратов типа обводных чертежей, т. е. задача структурно-топологического синтеза (см. гл. 5). В последующем, на стадиях технического и рабочего проектирования, геометрические модели все более усложняются, приближаясь к реальной конфигурации летательного аппарата, и соответственно уточняются и корректируются длины электропроводных связей сети. При отсутствии достаточно точных геометрических моделей уточнение длин и размещения проводов **осуществляется** путем макетирования объекта проектирования.

Наличие информации о марках и длинах проводов уже на начальных стадиях проектирования, а также детализация принципиальных схем позволяют формализовать выбор *сечений проводов*. Выбор сечений, так же как выбор марок и длин проводов, зависит от многих факторов, нередко оказывающих противоположное влияние. Например, перегрев провода при больших токах или большое падение напряжения можно устранить, если выбрать сечение достаточно большим. Однако большие сечения, в свою очередь, резко ухудшают массогабаритные показатели сети, условия монтажа и т. п. Поэтому задачу выбора сечений целесообразно сформулировать как оптимизационную задачу, которую можно решать методами математического программирования.

В качестве *критерия оптимальности* самолетных электросетей рассматривается ряд показателей: конструктивная масса, стартовая масса, учитывающая дополнительно расход топлива на функционирование систем, стоимость, экономическая эффективность и т. д. Во всех критериях основная составляющая определяется массой или, точнее, расходом металла. Поэтому здесь за критерий оптимальности принят минимум суммарной массы проводов сети.

Основными *ограничениями* задачи выбора сечений являются: конфигурация и неоднородность электросети; электрические нагрузки проводов; падения напряжения в проводах; условия механической прочности и номенклатура стандартных проводов. Конфигурация электросети в целом задается принципиальной схемой. Однако последнюю можно рассматривать как множество схем, в которое укладываются все реальные конфигурации, имеющие переменный характер в зависимости от режима и времени полета. Дело в том, что большинство потребителей электроэнергии включаются и выключаются в различные моменты полета. Даже в одном и том же режиме полета, например в крейсерском, многие потребители типа кухни, освещения, противообледенительных систем, систем управления и т. п. могут функционировать одновременно в разные периоды режима. Переменный состав потребителей в процессе полета приводит к частым вариациям конфигурации сети в пределах принципиальной схемы. Наконец, конфигурация сети может резко измениться в ненормальных режимах функционирования (короткие замыкания, обрывы, отказы и аварии).

Изменчивость конфигурации сети в процессе полета требует выбора нескольких *базовых схем* для расчета токов и напряжений. Базовые схемы должны выбираться так, чтобы обеспечить нахождение максимальных токовых нагрузок в каждом проводе сети. Конечно, было бы проще взять в основу расчета полученную ранее

принципиальную схему. Это означало бы, что все потребители работают одновременно (наихудший случай), т. е. неоправданно завышены токовые нагрузки, особенно в магистральной сети. Чтобы получить достаточно точные результаты, следует построить имитационную модель системы на основе принципиальной схемы, математических моделей элементов и связей между ними, а также ключей, с помощью которых связи между элементами разрываются и восстанавливаются. Управляя ключами в зависимости от графиков времени работы каждого потребителя (группы потребителей) в процессе полета, можно смоделировать реальные токи и напряжения проводов как в установившемся, так и в переходных режимах работы сети. Однако из-за слишком большой размерности самолетных электроэнергетических систем подобные имитационные модели для ЭВМ пока не построены. Поэтому приходится выбирать базовые расчетные схемы в зависимости от того или иного режима полета, да еще вводить в расчет коэффициенты, учитывающие неодновременную работу потребителей.

Эту работу по выбору базовых схем и коэффициентов одновременности обычно выполняет проектировщик на основе опыта предыдущих разработок и имеющихся графиков полетных режимов и работы потребителей в этих режимах. Причем не обязательно, чтобы расчетные базовые схемы полностью совпадали с реальными схемами в какие-то периоды времени полета. Расчетные схемы могут быть условными, эквивалентными. Главное, чтобы с помощью небольшого количества схем найти максимальные токи в проводах. В связи с этим при постановке задачи оптимизации сечений проводов будем считать, что схемы расчета токов заданы.

Дополнительные трудности для расчета токов и напряжений создает неоднородность сети, связанная с наличием первичной, вторичной, а иногда и третичной сети, преобразователей типа трансформаторов, выпрямителей, инверторов, преобразователей частоты и т. п. Эти трудности обходятся с помощью построения схем замещения и эквивалентирования соответствующих элементов сети.

Ограничения на токи и напряжения проводов формируются следующим образом. Токовые нагрузки при заданных условиях прокладки и при заданных внешних воздействиях не должны превышать допустимых значений, которые определены длительным изучением действующих электросетей, а также экспериментальным и расчетным путем для каждой марки провода. Для длительных режимов предельно допустимые значения задаются в виде таблиц, а для кратковременных режимов — в виде перегрузочных характеристик (рис. 9.1).

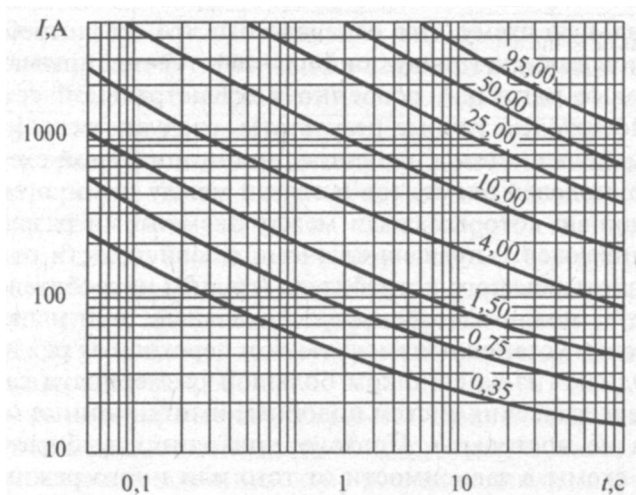


Рис. 9.1. Перегрузочные характеристики проводов БПВЛ при одиночной прокладке проводов (при 20°C)

Тогда ограничения на токовые нагрузки провода будут

$$I_p \leq I_d \text{ или } j_p \leq j_d, \quad (9.1)$$

где I_p, j_p — расчетные значения тока и плотности тока; I_d, j_d — соответственно допустимые значения.

Падение напряжения в сети за счет сопротивлений проводов и контактов ограничивается аналогичным образом:

$$\Delta U = U_{\text{ЦРУ}} - U_n \leq \Delta U_d, \quad (9.2)$$

где $U_{\text{ЦРУ}}$ — напряжение на шинах ЦРУ, поддерживаемое постоянными регуляторами напряжения; U_n — напряжение питания потребителей; ΔU_d — допустимое падение напряжения, задаваемое стандартами (обычно 10% в нормальных режимах).

Условия *механической прочности* имеют аналогичную форму

$$S \geq S_{\min}, \quad (9.3)$$

где S — сечение провода; S_{\min} — минимально допустимое сечение, задаваемое для каждого типа провода.

С учетом изложенного задачу выбора оптимальных сечений проводов можно сформулировать так:

- найти совокупность (множество) сечений всех проводов сети, доставляющую минимум суммарной массе (или объему металла) проводов при выполнении ограничений (9.1)—(9.3) и заданных исходных данных:

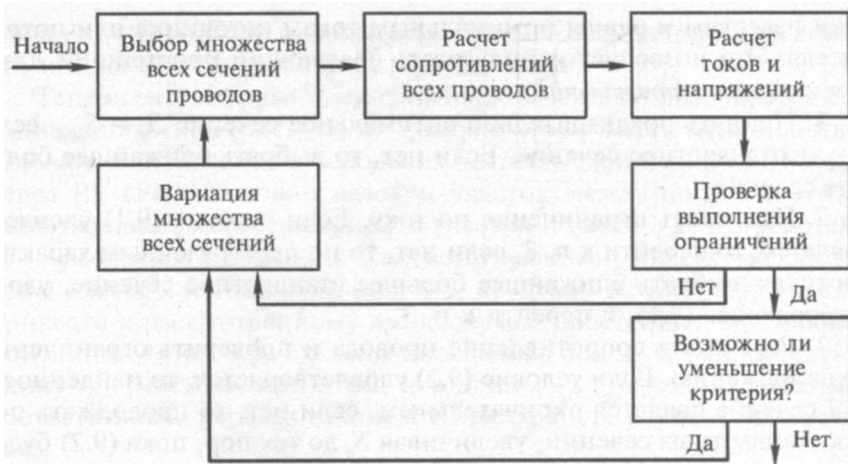


Рис. 9.2. Общая схема алгоритма поиска оптимальных сечений проводов

- марки и длины всех проводов;
- множество стандартных сечений, на котором ведется поиск оптимальных значений;
- принципиальная схема и базовые расчетные схемы;
- напряжения на шинах всех ЦРУ и напряжения питания всех потребителей;
- максимально допустимые токи (или плотности токов) и минимально допустимые сечения для всех проводов.

Учитывая дискретный характер исходных данных, для решения поставленной задачи на ЭВМ можно воспользоваться методами *дискретного программирования*. Общая схема поиска решений представлена на рис. 9.2. К сожалению, эта схема пока не реализуема за приемлемое машинное время из-за чрезмерно большой размерности задачи. Поэтому необходимо искать пути существенного уменьшения размерности, т. е. резкого упрощения расчетных схем.

С этой целью сначала рассмотрим простейшие возможные ситуации, а затем пути их использования при расчете сложных схем. На рис. 9.3 изображен простейший однопроводной участок сети, соединяющий шину с элементом системы Э. Реально эта картина соответствует подключению потребителя постоянного тока или однофазного переменного тока непосредственно к шинам ЦРУ или РУ, или подключению соответствующего источника к шинам ЦРУ. В общих случаях расчетные

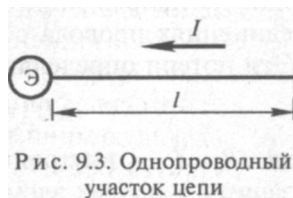


Рис. 9.3. Однопроводный участок цепи

токи известны и равны номинальным токам источника или потребителя. Это позволяет использовать следующий простейший алгоритм выбора оптимального сечения.

1. Принять предварительно оптимальное сечение $S_0 = S_{\min}$, если S_{\min} — стандартное сечение. Если нет, то выбрать ближайшее большее сечение.

2. Проверить ограничение по току. Если условие (9.1) удовлетворяется, то перейти к п. 3, если нет, то по перегрузочным характеристикам выбрать ближайшее большее стандартное сечение, удовлетворяющее (9.1), и перейти к п. 3.

3. Рассчитать сопротивление провода и проверить ограничение по напряжению. Если условие (9.2) удовлетворяется, то найденное в п. 2 сечение является окончательным, если нет, то продолжать поиск стандартных сечений, увеличивая S_0 до тех пор, пока (9.2) будет удовлетворяться. На этом поиск закончить.

Этот алгоритм быстро сходится к оптимуму, если S_0 принадлежит к множеству заданных сечений, на которых ведется поиск. В противном случае поиск останавливается, не достигнув удовлетворительного результата. Тогда необходимо расширить заданный диапазон сечений в направлении больших сечений.

Дополнительно отметим, что в случае однофазного переменного тока различают два понятия: потери напряжения и падения напряжения. Потеря напряжения — алгебраическая разность величин

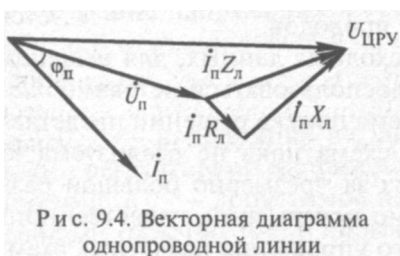


Рис. 9.4. Векторная диаграмма однопроводной линии

напряжения в начале и конце линии, а падение напряжения — векторная разность этих же величин (рис. 9.4). Для случая постоянного тока эти два понятия совпадают. Для потребителей переменного тока более важным является потеря напряжения, которая приближенно оценивается по формуле [49]

$$\Delta U \approx (r_d \cos \varphi_n + X_n \sin \varphi_n) I. \quad (9.4)$$

Кроме потерь напряжения в проводах, при проверке ограничений по напряжению учитываются также потери в контактных соединениях провода с клеммами контакторов и аппаратов защиты. Эти потери определяются по формуле

$$\Delta U_d = I(R_b \cos \varphi + X_b \sin \varphi) + \Delta U_{b0}, \quad (9.5)$$

где R_b, X_b — внутренние сопротивления контакторов и аппаратов защиты и других элементов, включенных в линию; ΔU_{b0} — не зави-

сящая от тока потеря напряжения в элементе (можно задать априори, исходя из экспериментальных данных).

Теперь рассмотрим более сложный, разветвленный участок сети радиального типа (рис. 9.5, *а*). Реально этот участок может соответствовать подключению нескольких потребителей к шинам ЦРУ (РУ) через РУ (РК). Условно назовем участок между шиной и точкой разветвления q магистральным, а участки и точки q до потребителей П — распределительными. Соответствующими индексами обозначены длины l и токи I на рис. 9.5, *а*. Схему на рис. 9.5, *а* можно привести к рассмотренному выше случаю простейшей однопроводной линии (рис. 9.5, *б*), если определить ток I_M и эквивалентную длину $l_{рз}$, учитывая при этом, что длины l_M , l_p и токи I_p заданы. В соответствии с первым законом Кирхгофа для случая постоянного тока

$$I_M = k_0 \sum I_p, \quad (9.6)$$

а для случая переменного тока

$$I_M = k_0 \sqrt{\sum I_{ap}^2 + \sum I_{rp}^2}, \quad (9.7)$$

где k_0 — коэффициент одновременности работы потребителей; I_{ap} , I_{rp} — активные и реактивные токи в распределительных проводах. С помощью (9.6) и (9.7) определяют токи в проводах для каждой расчетной схемы отдельно, а затем для каждого провода выбирают максимальный расчетный ток, который в дальнейшем используется при проверке ограничения (9.1).

Эквивалентную длину l_M можно выбрать из условия неизменности (инвариантности) оценки критерия оптимальности в процессе эквивалентирования [52]. Тогда, предполагая неизменной суммарную массу распределительных проводов, можно записать:

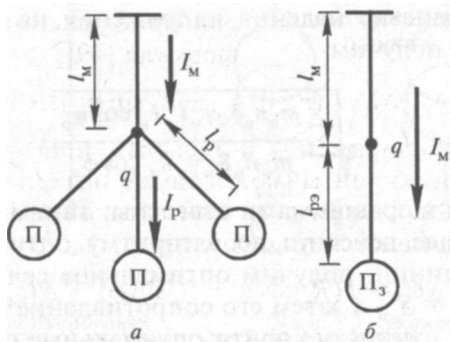


Рис. 9.5. Эквивалентирование радиального разветвленного участка цепи

$$\sum M_p = M_s, \quad (9.8)$$

где в общем случае суммарная масса распределительных проводов

$$\sum M_p = \sum m_p n_p \delta_p l_p S_p, \quad (9.9)$$

масса эквивалентного провода

$$M_s = m_s n_s \delta_s l_s S_s, \quad (9.10)$$

а коэффициенты m , n , δ с соответствующими индексами — число фаз, количество жил и коэффициент, учитывающий массу изоляции провода (при линейной аппроксимации массы погонного метра изолированного провода: $M = \lambda + \delta S$). Предполагая, что коэффициенты эквивалентного провода одинаковы с коэффициентами магистрального провода (оба провода — отрезки единой однопроводной линии) и считая эти

помощью (9.8)—(9.10) эк
$$l_s = \frac{\sum m_p n_p \delta_p l_p S_p}{m_m n_m \delta_m S_m}. \quad (9.11)$$

В (9.11) входят неизвестные сечения S_p и $S_s = S_m$. Чтобы исключить их из рассмотрения, воспользуемся выражением активного сопротивления провода через удельную проводимость и геометрические размеры $S = \frac{l}{\gamma} \cdot \frac{I_a}{\Delta U}$. Тогда (9.11) преобразуется в

$$l_s = \sqrt{\sum \frac{m_p n_p \delta_p \gamma_m l_p^2 I_p \cos \varphi_p (U_q - \Delta U_{qp} - U_n)}{m_m n_m \delta_m \gamma_p I_m \cos \varphi_m} (U_q - \Delta U_{qp} - U_n)}, \quad (9.12)$$

где неизвестными величинами являются U_q , ΔU_{qp} , ΔU_{qp} . Принимая U_n одинаковыми для всех потребителей, а следовательно, $\Delta U_{qp} \approx \Delta U_{qp}$, что означает равенство падения напряжения на всех распределительных линиях, получим

$$l_s = \sqrt{\sum \frac{m_p n_p \delta_p \gamma_m l_p^2 I_p \cos \varphi_p}{m_m n_m \delta_m \gamma_p I_m \cos \varphi_m}}, \quad (9.13)$$

где все величины в правой части известны. Таким образом, определив I_m и l_s и далее действуя по алгоритму оптимизации сечения однопроводной линии, получим оптимальное сечение магистрального провода $S_{mc} = S_{s0}$, а затем его сопротивление и напряжение U_q . Зная U_q , U_n и ΔU_{qp} , нетрудно найти оптимальные сечения распределительных проводов аналогичным образом.

Если эквивалентруется линия с трансформатором (рис. 9.6), то используется общепринятое приведение вторичной цепи к первичной с учетом условия инвариантности массы проводов на вторичной стороне. Тогда приведенные величины будут

$$\begin{aligned} I'_2 &= I_2 / k_U, \quad U'_n = U_n k_U, \quad \Delta U'_{q2} = \Delta U_{q2} k_U, \\ I'_{s2} &= I_2 k_U, \quad S'_{s2} = S_2 k_U, \end{aligned} \tag{9.14}$$

где k_U — коэффициент приведения. Представляя упрощенно трансформатор схемой замещения при коротком замыкании, т. е. как элемент с параметрами $R_B = R_k, X_B = X_k, \Delta U_B = 0$, из условия неизменности масс получим

$$\left. \begin{aligned} I_s &= I_2 k_U \sqrt{\frac{\delta_2 \gamma_1 n_2 \cos \varphi_2}{\delta_1 \gamma_2 n_1 \cos \varphi_1}}; \\ \Delta U_{q1} &= \Delta U_{q2} k_U + I_1 (r_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2). \end{aligned} \right\} \tag{9.15}$$

Если эквивалентруется трансформаторно-выпрямительное устройство (ТВУ) (рис. 9.7), то используется линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики (ВАХ):

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{вн}} &= \alpha U_1 - \beta - R_B I_{\text{вт}}, \\ I_1 &= \Psi I_{\text{вт}} + \xi, \end{aligned} \right\} \tag{9.16}$$

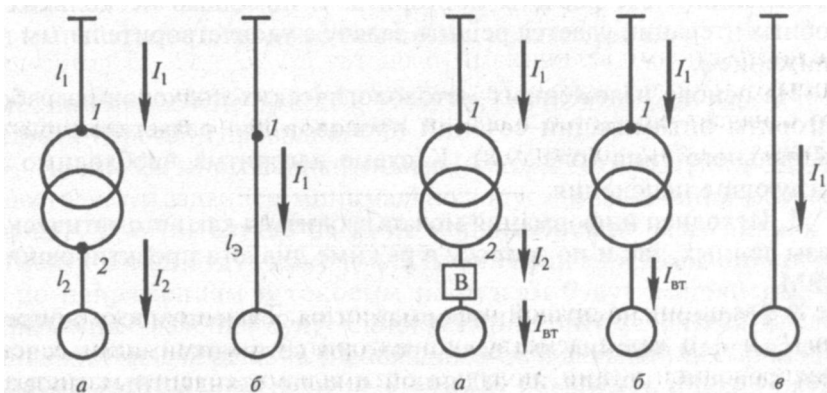


Рис. 9.6. Эквивалентирование линии с трансформатором

Рис. 9.7. Эквивалентирование трансформаторно-выпрямительного устройства

где $U_{вт}, I_{вт}$ — напряжение и ток после выпрямления; $\alpha, \beta, R_b, \Psi, \xi$ — параметры аппроксимации ВАХ. Если ТВУ представить последовательным соединением трансформатора с параметрами $R_b = X_b = 0$ и $k_U = 1/\alpha$ и выпрямителя (рис. 9.7, а) с параметрами $R_b, X_b = 0, \Delta U_b = \beta$, то, осуществляя последовательный переход от рис. 9.7, а к рис. 9.7, б и в, получим в конечном счете

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_b \sqrt{\frac{\delta_b \gamma_1 n_b}{\delta_1 \gamma_b n_1} \frac{I_{вт}}{I_1 \cos \phi_1}}, \\ \Delta U_{q1} &= \frac{1}{\alpha} (\Delta U_{qb} + R_b I_{вт} + \beta). \end{aligned} \right\} \quad (9.17)$$

Используя эквивалентные преобразования (9.15) и (9.17), можно любую неоднородную (по роду тока и напряжениям) разветвленную систему типа радиальной схемы на рис. 9.5, а привести к однородной системе того же типа. Следует также отметить, что расчетные базовые схемы, как правило, выбираются с радиальной структурой. В противном случае (замкнутые разветвленные структуры) расчет токов в проводах резко усложняется — требуется поиск расчетных токов методом последовательных приближений. Сначала задаются априори токораспределением в сети и затем решают задачу оптимизации сечений. Для полученных сечений проводов вновь определяют распределение токов и напряжений. Если полученные результаты близки к исходным, то задача считается решенной. Если нет, то необходимо скорректировать априорное задание токораспределения и все расчеты повторить. С помощью нескольких подобных итераций удастся решить задачу с удовлетворительным приближением.

На основе изложенных методологических подходов разработан алгоритм оптимизации сечений проводов для разветвленной сети радиального типа (рис. 9.8). К схеме алгоритма необходимо дать следующие пояснения.

1. Исходная информация может вводиться как автоматически из базы данных, так и по запросу в режиме диалога проектировщика с ЭВМ.

2. Проверка исходной информации на совместимость осуществляется путем задания для всех проводов сети максимальных значений сечений, исходя из заданной шкалы стандартных проводов. В этом случае падение напряжения на всех линиях и плотности токов будут минимальными. Если при этом ограничения по напряжениям на потребителях и токовым нагрузкам будут выполнены, то

НАЧАЛО

1. Ввод исходной информации по схеме и анализу токов в заданных режимах функционирования
2. Проверка исходной информации на совместимость:
 - ДА — переход к п.3
 - НЕТ — конец
3. Проверка многовариантности решения задач:
 - ДА — переход к п.4
 - НЕТ — конец
4. Задание (выбор) сечений для всех проводов
5. Последовательное замещение разветвленных участков схемы эквивалентными линиями (свертка) в направлении «снизу вверх» для всех заданных режимов функционирования (расчетная схема)
6. Последовательная оптимизация и дискретизация сечений проводов для всех участков (развертка) в направлении «сверху вниз» с учетом всех заданных режимов функционирования (расчетная схема)
7. Расчет суммарной массы проводов
8. Проверка критерия оптимальности на улучшение:
 - ДА — переход к п.9
 - НЕТ — конец
9. Расчет «запасов» по напряжению питания ПЭ:
 - ДА — переход к п.10
 - НЕТ — конец
10. Анализ и исключение ветвей схемы, не подлежащих дальнейшему варьированию

КОНЕЦ

Рис. 9.8. Алгоритм оптимизации сечений проводов

совместимость обеспечивается. Если нет, то необходимо расширить исходный перечень проводов.

3. Проверка многовариантности (множества) решений задачи осуществляется заданием минимально допустимых сечений для всех проводов. В этом случае падение напряжения на всех линиях и плотности токов будут максимальными. Если при этом ограничения по напряжениям и токовым нагрузкам будут выполнены, то минимальные сечения будут одновременно оптимальными и, следовательно, задача решена (необходимость в дальнейших процедурах отпадает). Если нет, то необходимо перейти к поиску оптимального решения.

4. Начальное распределение сечений по проводам осуществляется путем задания их максимально возможных значений. Одновре-

менно определяются сопротивления и начальное распределение токов и напряжений в принципиальной схеме.

5. Свертка схемы (приведение к однопроводной линии) осуществляется шаг за шагом для всех разветвленных участков и неоднородных линий до тех пор, пока вся схема не будет замещена одной однородной эквивалентной линией и одним эквивалентным приемником. В процессе свертки одновременно определяются токи во всех линиях на каждом шаге.

6. Оптимизация сечений проводов начинается с эквивалентной однопроводной линии, как указано выше. При оптимизации, кроме ограничений по падениям напряжений, токовым нагрузкам и механической прочности, учитывается также согласование с автоматами защиты в линиях. Полученное S_0 сравнивается с допустимыми значениями S_{\max} и S_{\min} . Если $S_0 > S_{\max}$, то принимается $S_0 = S_{\max}$. Если $S_0 < S_{\min}$, то принимается $S_0 = S_{\min}$. Если же $S_{\min} < S_0 < S_{\max}$, то принимается $S_0 = S_{0c}$, где S_{0c} — ближайшее верхнее стандартное сечение. Далее определяются сопротивление и падение напряжения эквивалентного провода до ближайшей нижней точки разветвления и т. д. аналогичным образом, пока вся схема не будет развернута и не будут найдены оптимальные сечения для всех проводов.

7. Суммарная масса проводов может определяться как с учетом изоляции, так и без него (суммарная масса металла). Можно использовать также критерий суммарного объема металла.

8. Начальное значение критерия оптимальности принимается очень большим, чтобы дать старт процессу поиска оптимума в направлении минимизации критерия.

9. Запасы по напряжению питания потребителей определяются как разности расчетных и допустимых напряжений питания.

10. Из процесса оптимизации (расчета) исключаются те линии, для которых сечения сравнялись с S_{\min} или S_{\max} при одновременном удовлетворении всех ограничений.

Предложенный алгоритм предназначен для реализации в САПР и апробирован на проектных расчетах самолетных электросетей.

§ 9.3. Оптимальный выбор электросоединителей

Производство и монтаж электрических систем на объектах обычно выполняются по частям: функциональные элементы, распределительные устройства и коробки, электрические связи и монтажно-установочное оборудование. Электрические связи, в свою очередь, могут делиться на части по конструктивным и технологическим соображениям (переход из одного отсека в другой, удобство монтажа,

эксплуатации и ремонта и т. д.). Объединение отдельных частей в единую систему осуществляется с помощью так называемых электросоединителей. Последние различаются как *зажимные* (силовые вводы, болтовые соединения, клеммные колодки и блоки переходных контактов), позволяющие подсоединять и отсоединять отдельные провода, и *штепсельные разъемы*, обеспечивающие присоединение или отсоединение группы проводов путем контакта соответствующих штырей и гнезд. Сетевые штепсельные разъемы служат для соединения отдельных участков сети и подключения функциональных элементов к системе. Они могут быть предназначены как для временного пользования на стоянке самолетов (подключение наземных источников питания при запуске авиадвигателей, выполнение наземного контроля) и в полете (катапультируемое оборудование и т. д.), так и для постоянного пользования в процессе полета.

Штепсельные разъемы (ШР) подразделяются на сетевые, агрегатные и специального назначения, а по степени герметичности — на герметичные и негерметичные. ШР обеспечивают надежный электрический контакт, необходимую механическую прочность и исключают необходимость предварительного контроля присоединяемых проводов и цепей.

Номенклатура серийно выпускаемых ШР достаточно разнообразна: серии ШР, СШР (специального назначения), Р (агрегатные), ШРН (низковольтные), ШРАП и ШРА (аэродромного питания постоянного и переменного тока), РМ и 2РМ (**малогабаритные**), 2РТ и 4РТ (тепло- и жаростойкие), СНЦ и др. Герметичное исполнение отличается добавлением буквы «Г» после основного обозначения серии, например ШРГ, РГ, РМГ и т. п. Каждая серия ШР, в свою очередь, содержит в себе ряд типоразмеров, отличающихся друг от друга количеством контактов и их диаметрами. Таким образом, множество ШР, из которого делается выбор для конкретных проектов, достаточно обширно.

Выбор электросоединителей осуществляется после того, как определены все части электросистемы, а также марки, сечения и токовые нагрузки проводов для каждой части. Процедура выбора соединителей зажимного типа для одиночных проводов достаточно проста, а именно, перебор заданной номенклатуры болтов, клемм и т. п. Однако задача резко усложняется, когда необходимо выбрать соединители для группы проводов, особенно с увеличением числа проводов в **группе** (выбор соединителей для распределительных коробок, сложных жгутов, многожильных кабелей и т. п.). Более того,

с учетом многообразия ШР и многочисленности факторов, влияющих на выбор соединения «провод—контакт», задача принимает оптимизационный характер.

Задача оптимального выбора обычно формируется, как задача минимизации соединителей, в частности ШР. В качестве ограничивающих факторов рассматриваются токи в длительном режиме и режиме кратковременной перегрузки. Величины этих токов для каждого провода известны из предыдущих расчетов при оптимизации сечений проводов. Для каждого контакта соединителей эти токи имеют максимально допустимое значение. Аналогичные ограничения имеют место и для каждого типоразмера ШР. Конструктивными ограничениями являются сечения проводов и диаметры контактов. Для каждого диаметра контакта задаются максимально допустимые сечения проводов. Если ограничения по токам и сечениям выполняются, но диаметры контактов ШР и провода не совпадают, то разрешается использовать муфты сращивания, изменяющие сечение соединения. При этом количество муфт сращивания для каждого типоразмера ШР также ограничено. Кроме того, с целью дальнейшего развития системы часть контактов ШР должна оставаться в резерве (обычно это 10%). В оптимизации одиночных проводов существуют ограничения на число совместно соединяемых проводов (не более двух для винта и не более трех для болта). Наконец, часть ограничений диктуется функциональными требованиями отдельных систем и трассировкой проводов. Например, провода, принадлежащие к разным трассам, должны быть присоединены к разным электросоединителям. Провода комплексов бортового радиоэлектронного оборудования не совместимы с проводами систем электроавтоматики и электроснабжения и не могут быть заведены в один и тот же электросоединитель. Цепи управления систем электроснабжения должны присоединяться к отдельным соединителям и т. д.

Анализ указанных ограничений позволяет сразу произвести сортировку заданной совокупности проводов и выделить одиночные провода, подлежащие болтовому или клеммному соединению, и совместимые в одних ШР группы проводов. Учитывая сравнительную простоту выбора соединений для одиночных проводов при заданной номенклатуре болтовых и клеммных колодок, в дальнейшем ограничимся рассмотрением задачи оптимального выбора ШР.

Исходная информация задачи может быть сведена в табл. 9.1 для проводов и в табл. 9.2—9.4 для ШР и контактов.

Таблица 9.1

Перечень проводов	Сечения	Установившийся ток	Ток кратковременной перегрузки
1	S_{n1}	I_{ny1}	I_{nn1}
...
i	S_{ni}	I_{nyi}	I_{nni}
...
N	S_{nN}	I_{nyN}	I_{nnN}

Таблица 9.2

Штепсельные разъемы	Число контактов типа					
	K_1	K_2	...	K_k	...	K_Q
ШР ₁	R_{11}	R_{12}	...	—	—	—
ШР ₂	R_{21}	R_{22}	...	R_{2k}	—	—
...
ШР _{j}	—	R_{j2}	...	R_{jk}	$R_{(k+1)}$	—
...
ШР _{p}	—	—	...	—	R_{k+1}	R

Таблица 9.3

Штепсельный разъем	Допустимый установившийся ток	Допустимый ток перегрузки
ШР ₁	$I_{шу1}^{\max}$	$I_{шп1}^{\max}$
...
ШР _{j}	$I_{шуj}^{\max}$	$I_{шпj}^{\max}$
...
ШР _{p}	$I_{шуп}^{\max}$	$I_{шпп}^{\max}$

Таблица 9.4

Контакты	Диаметр контактов	Допустимые сечения провода	Допустимые установившиеся токи	Допустимые токи перегрузки
K_1	d_1	$S_{п1}^{\max}$	$I_{ку1}^{\max}$	$I_{кп1}^{\max}$
...
K_k	d_k	$S_{пk}^{\max}$	$I_{куk}^{\max}$	$I_{кпk}^{\max}$
...
K_Q	d_Q	$S_{пQ}^{\max}$	$I_{куQ}^{\max}$	$I_{кпQ}^{\max}$

В табл. 9.1 даны сечения и токовые нагрузки группы проводов, совместимых для соединения в одних ШР. В табл. 9.2 приведено соответствие между заданными ШР и контактами (R_{jk} — количество контактов k -го типа в j -м ШР); в табл. 9.3 — максимально допустимые токовые нагрузки ШР, а в табл. 9.4 — характеристики контактов. Минимальный резерв числа контактов в каждом ШР примем одинаковым и равным 10%. Цель задачи — минимизировать количество ШР (см. табл. 9.2), обеспечивающих присоединение заданного перечня проводов (см. табл. 9.1) и удовлетворение всех ограничений.

Математическую формулировку задачи с использованием обозначений табл. 9.1—9.4 можно дать следующим образом. Пусть x_j — параметр, определяющий включение j -го ШР однократно или многократно в выборку, взятую из полной номенклатуры заданных ШР и обеспечивающую полное покрытие (присоединение) всех проводов, т. е.

$$x_j = \left. \begin{array}{l} 0 \text{ — ШР не включен в выборку,} \\ 1 \text{ — ШР включен однократно,} \\ 2, 3 \dots \text{ — ШР включен многократно,} \end{array} \right\} j = 1, \dots, P. \quad (9.18)$$

Тогда количество ШР, покрывающее заданную совокупность проводов, будет

$$F = \sum_{j=1}^P x_j. \quad (9.19)$$

Пусть y_{jk} — параметр, определяющий наличие контактов k -го типа в j -м ШР, т. е.

$$y_{jk} = \begin{cases} 0 - k\text{-й тип отсутствует,} \\ 1 - k\text{-й тип присутствует,} \end{cases} \begin{matrix} j = 1, \dots, P, \\ k = 1, \dots, Q. \end{matrix} \quad (9.20)$$

Тогда полное число контактов в ШР составит

$$R_j = \sum_{k=1}^Q y_{jk} R_{jk}, \quad j = 1, \dots, P, \quad (9.21)$$

где R_{jk} — число контактов k -го типа в j -м ШР (см. табл. 9.2).

Пусть z_{ijk} — параметр, определяющий соединение i -го провода с контактом k -го типа в j -м ШР, т. е.

$$z_{ijk} = \begin{cases} 0 - \text{провод не соединен,} \\ 1 - \text{провод соединен,} \end{cases} \begin{matrix} i = 1, \dots, N, \\ j = 1, \dots, P, \\ k = 1, \dots, Q. \end{matrix} \quad (9.22)$$

Тогда количество соединений между проводами и контактами

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^Q x_j y_{jk} z_{ijk} = N, \quad (9.23)$$

количество соединенных контактов одного ШР с учетом резерва

$$\sum_{k=1}^Q \sum_{i=1}^N y_{jk} z_{ijk} \leq 0,9 R_j, \quad j = 1, \dots, P, \quad (9.24)$$

а общее количество контактов всех ШР, входящих в выборку,

$$\sum_{j=1}^P R_j > N. \quad (9.25)$$

Условия совместимости проводов и контактов с помощью муфт сращивания можно представить неравенствами

$$S_{n(k-1)}^{\max} \leq S_{ni} \leq S_{nk}^{\max} \quad \text{для каждого } z_{ijk} = 1, \quad (9.26)$$

ограничения по току одного соединения — неравенствами

$$\left. \begin{matrix} I_{ny i} \leq I_{ку i}^{\max} \\ I_{mn i} \leq I_{нк k}^{\max} \end{matrix} \right\} \text{ для каждого } z_{ijk} = 1, \quad (9.27)$$

а ограничения по токам ШР в целом — неравенствами

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{ш}j} &= \sum_{k=1}^Q \sum_{i=1}^N y_{ik} z_{ijk} I_{\text{н}i} \leq I_{\text{ш}j}^{\max} \\ I_{\text{н}j} &= \sum_{k=1}^Q \sum_{i=1}^N y_{jk} z_{ijk} I_{\text{н}i} \leq I_{\text{н}j}^{\max} \end{aligned} \right\} \text{ для каждого } j > 0. \quad (9.28)$$

С учетом изложенного задача оптимального выбора ШР формулируется так: минимизировать функцию F (9.19) за счет выбора неизвестных параметров x_j (9.18), y_{jk} (9.20) и z_{ijk} (9.22), который одновременно удовлетворяет условиям (9.21), (9.23)—(9.28). Сформулированная задача относится к классическим задачам *дискретного программирования* в связи с дискретным характером изменения неизвестных параметров. Задачи этого класса трудноразрешимы из-за большой размерности неизвестных параметров и необходимости использования в той или иной степени перебора возможных вариантов решения.

С целью сокращения размерности задач и облегчения процессов решения воспользуемся принципом *динамического программирования*, т. е. представим процесс решения в виде многоэтапного процесса, на каждом этапе которого решаются задачи значительно меньшей размерности. Для этого произведем предварительно сортировку проводов с учетом условий стыковки с контактами (9.26). Тогда заданная совокупность проводов будет разделена на L подгрупп, а именно

$$N = \sum_{i=1}^L N_i,$$

где N_i — количество проводов в подгруппе. Исходя из полученных подгрупп образуем последовательность $N_1, N_2, \dots, N_p, \dots, N_L$ в порядке убывания количества проводов в подгруппе. Число этапов и последовательность процесса решения задачи примем такой же, что и последовательность N_1, \dots, N_L . Решение начнем с конца (конечного этапа) и будем искать $\min F$ (решение задачи) для подгруппы с минимальным числом проводов N_L . Отыскав каким-либо образом $\min F(N_L)$, перейдем к предпоследнему этапу, на котором число проводов, подлежащих вводу в ШР, равно N_{L-1} . Переход к предпоследнему этапу расширяет рассматриваемое множество проводов ($N_{L-1} + N_L$). Поэтому результаты решения задачи на предпоследнем этапе должны быть скорректированы с результатами последнего этапа. Найдя $\min F(N_{L-1} + N_L)$, перейдем к этапу $(L - 2)$ и т. д. до тех пор, пока не дойдем до первого этапа и получим решение $\min F(N_1 + \dots + N_L) = \min F(N)$, т. е. решение исходной задачи.

Такой процесс решения соответствует вычислительной схеме динамического программирования (рис. 9.9).

Начальные решения для каждого этапа можно получить, решая соответствующую задачу поиска $\min F$ автономно, без всякой связи и корректировки с результатами последующих этапов. В соответствии со схемой на рис. 9.9 взаимная увязка и корректировка решений осуществляются с помощью обратных связей, образующих вложенные друг в друга поисковые циклы решений для каждого этапа в отдельности. При этом многократность повторения поиска на последнем этапе наибольшая. Этим обусловлен выбор последовательности N_1, \dots, N_L в порядке

$$N_1 \geq N_2 \geq \dots \geq N_{L-1} \geq N_L.$$

Для организации целенаправленного поиска $\min F$ и исключения из рассмотрения заведомо ложных вариантов на каждом этапе составим следующие списки ШР. Число списков ШР равно числу Q различных диаметров контактов в заданной номенклатуре ШР в целом. Каждый k -й список ($k = 1, \dots, Q$) включает в себя только те ШР, которые имеют контакты k -го типа, и располагает эти ШР в порядке убывания количества контактов k -го типа. Таким образом, приоритет в k -м списке отдается наиболее «емким» по контактам

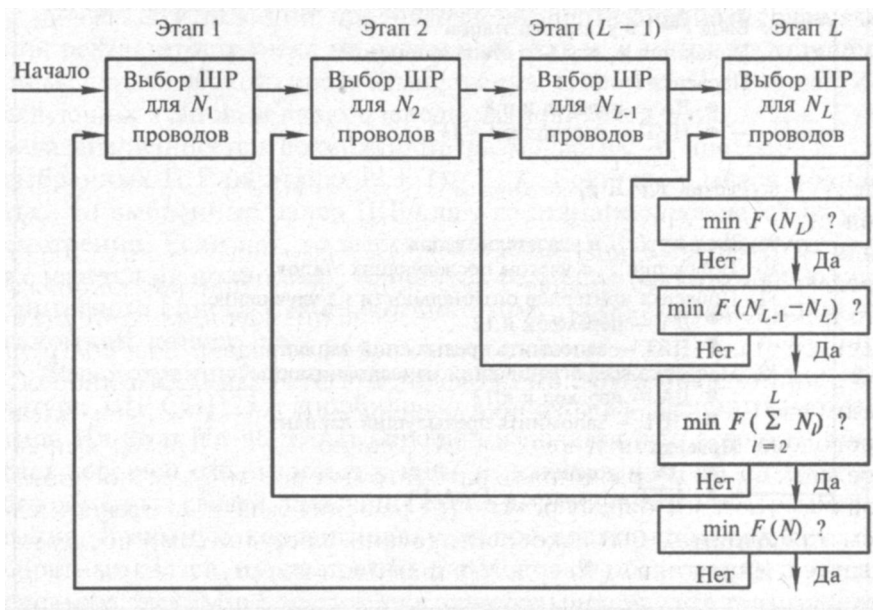


Рис. 9.9. Вычислительная схема оптимального выбора ШР

k -го типа ШР. Благодаря этому на каждом l -м этапе поиска $\min F$ вместо полной номенклатуры ШР достаточно рассматривать (перебирать) один или два списка, удовлетворяющих условиям совместности проводов l -й подгруппы с контактами (9.26).

С помощью разбиения заданной совокупности проводов на подгруппы и составления приоритетных списков ШР разработан многоэтапный алгоритм (см. рис. 9.8) поиска $\min F$, соответствующий вычислительной схеме динамического программирования (рис. 9.10). К позициям алгоритма прилагаются пояснения.

1. Исходная информация, заложенная в табл. 9.1—9.4, может быть введена заранее в базу данных ЭВМ для стандартных проводов и серийно выпускаемых ШР в отрасли. Кроме того, она может вводиться по запросу в режиме диалога.

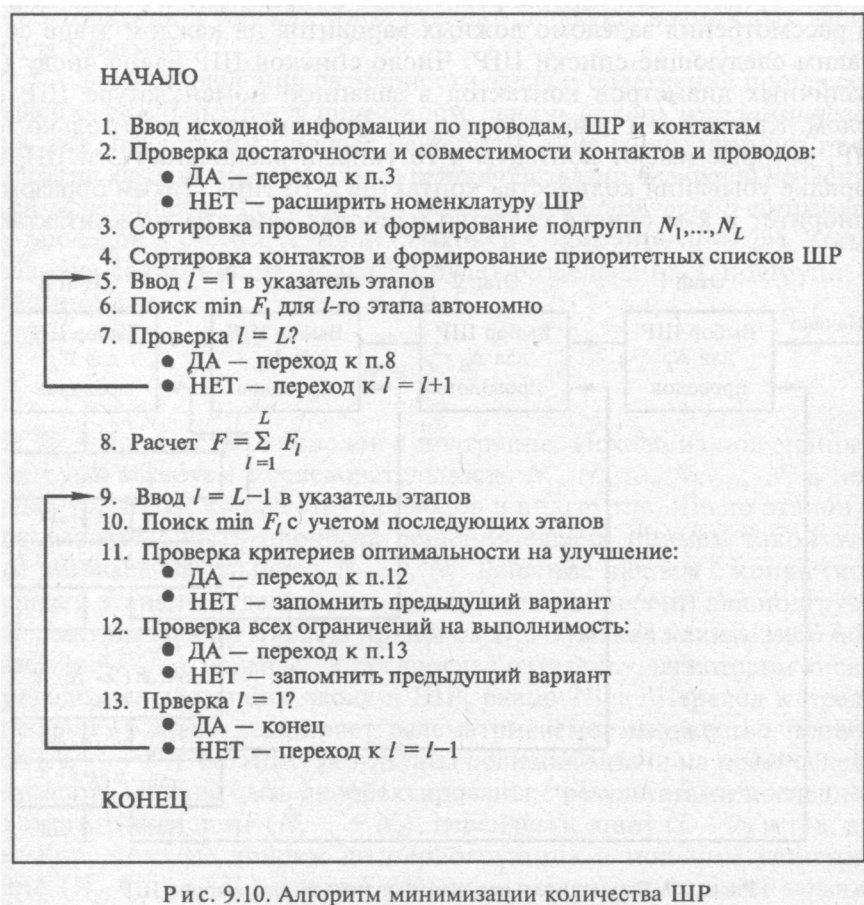


Рис. 9.10. Алгоритм минимизации количества ШР

2. Проверку достаточности и совместимости контактов для заданной совокупности проводов следует проводить как по общему количеству контактов выбранной совокупности ШР, так и для каждого типа контакта. При этом необходимо учесть требуемый резерв контактов как в целом, так и по отдельным типам.

3, 4. Сортировку проводов и контактов, а также формирование соответствующих перечней и приоритетных списков можно сделать заранее и заложить в базу данных. Тогда эти позиции могут быть выполнены в автоматическом режиме.

5—8. Эти позиции предназначены для получения начального решения задачи, причем заведомо плохого, так как не учитываются возможности использования контактов ШР, выбранных на соседних этапах. Завышенное значение F дает толчок развитию процесса минимизации F на последующих шагах алгоритма. Автономный поиск $\min F_l$ осуществляется путем выбора соответствующего приоритетного списка (списков) ШР и сканирования «сверху вниз». Такой перебор ШР позволяет быстро найти приемлемый вариант одного и нескольких ШР, полностью покрывающих l -ю подгруппу проводов с учетом требуемого резерва по развитию. Процедура поиска легко выполнима как в автоматическом, так и в диалоговых режимах работы проектировщика с ЭВМ.

9—13. Эти позиции предназначены для взаимного согласования результатов поиска на отдельных этапах и минимизации F по схеме динамического программирования. Поиск $\min F_l$ с учетом последующих этапов, в свою очередь, выполняется в два этапа. Сначала анализируется возможность размещения N_l проводов в уже выбранных ШР на этапах $(l+1), \dots, L$. Если это удается полностью, то выбранные ранее ШР для l -го этапа исключаются из рассмотрения. Если нет, то выбранные ранее ШР сохраняются. Если же удается не полностью, то остаток размещается с помощью приоритетного списка ШР аналогично тому, как это делается при автономном поиске $\min F_l$.

Рассмотренный алгоритм программно реализован для номенклатуры ШР СНЦ23 и апробирован в проектных расчетах самолетов типа Ил-86 и Ил-96. Опыт апробации показал, что алгоритм обладает хорошей сходимостью к $\min F_l$, как правило, может работать без обратных связей, присущих схеме динамического программирования. Взаимную корректировку этапов достаточно проводить без обратных связей, путем прямых переходов от последующего этапа к предыдущему. $\min F$ достигается за небольшое число итераций полного просмотра N_L, \dots, N_1 этапов.

Полученные результаты не уступают решениям, полученным опытными проектировщиками традиционным, «ручным» путем, а по времени поиска решений несравнимо превосходят традиционный **ПОДХОД**.

§ 9.4. Конструирование жгутов

Для удобства монтажа участков электросети, сокращения трудоемкости и времени монтажных работ подавляющее большинство проводов и кабелей на борту предварительно группируется в так называемые жгуты, которые прокладываются по допустимым трассам и составляют единое целое в технологическом плане. *Жгуты* представляют собой группы проводов, объединенных по определенному признаку: электромагнитная совместимость, принадлежность к одной трассе, схеме, системе, подсистеме, каналу управления и т. д. Многие признаки, допускающие группировку проводов в жгуты, совпадают с признаками совместного ввода проводов в ШР. Сборка проводов в жгуты используется как для внешнего монтажа (монтаж соединений между функциональными узлами и элементами системы, например между РК и потребителями), так и для внутреннего монтажа соединений, например между элементами, собранными в одну РК или в один конструктивный блок.

При *внешнем монтаже* жгуты обычно укладывают в специальные короба открытого или закрытого исполнения и закрепляют хомутами или иными крепежными изделиями к стенкам фюзеляжа, кабины и других отсеков самолета. При *внутреннем монтаже* допускается большая свобода в прокладке жгутов по внутренним стенкам коробки или блока. Разработчики электросистем, как правило, конструируют внешние жгуты, оставляя конструирование внутренних жгутов разработчикам функциональных узлов и блоков. Поэтому в дальнейшем будем иметь в виду только внешние жгуты. Технологическая целостность жгута достигается тем, что сгруппированные в жгут провода обвязываются защитными и изоляционными лентами и скрепками. Количество проводов в одном жгуте, кроме признаков, допускающих объединение, лимитируется также диаметром и весом жгута. Максимальный диаметр определяется геометрическими размерами места прокладки, например короба, а максимальный вес — удобством транспортировки и укладки в процессе монтажа.

Процесс конструирования жгутов тесно связан с оптимальным выбором электросоединителей и сводится к выполнению следующих работ:

- 1) привязка проводов сети к конечным геометрическим, электрическим адресам и пространственным трассам;
- 2) объединение проводов в жгуты с учетом ограничений по функциональной совместимости, диаметру и весу;
- 3) выпуск конструкторско-технологической документации для изготовления и монтажа жгута.

Привязка электрических проводов к электрическим и геометрическим адресам осуществляется с помощью принципиальной схемы и геометрической модели объекта, после выбора электросоединителей для РУ, РК и других функциональных узлов и блоков. Непосредственными *электрическим адресами* провода являются конечные контакты, клеммы и болты электросоединителей, к которым присоединяется провод. Так, если коробка реле имеет электросоединитель для связи с внешним (наружным) монтажом, то адресом будет электросоединитель и его контакт. Если же электросоединителей несколько, то все они являются разноименными адресами, так как коробка сама электрическим адресом быть не может. Даже в случае отсутствия электросоединителей и непосредственного подключения внешних проводов к клеммам реле адресом будут эти реле. Кроме непосредственных электрических адресов, необходимо указать также упорядоченный номер системы, подсистемы или функционального устройства, к которому относятся электросоединители. Обычно самолету, как объекту, интегрирующему все системы и все оборудование, присваивается номер «000», а бортовые системы нумеруются в последовательности, задаваемой разработчиками самолета, например:

- 021 — система кондиционирования воздуха;
- 022 — оборудование автоматического управления полетом;
- 024 — система электроснабжения;
- 027 — система управления самолетом;
- 028 — топливная система и т. д.

Дальнейшие детализация и упорядочение подсистем и функциональных узлов, блоков выполняют разработчики электрических систем. Вся эта информация, необходимая в последующем для анализа условий совместимости проводов в электросоединителях и жгутах, закладывается в буквенно-цифровое обозначение провода, регламентируемое стандартами или нормативами предприятия.

Геометрическими адресами провода являются геометрические координаты электросоединителей, к которым присоединен провод, записанные в системе координат геометрической модели самолета в целом или его отдельных областей. Кроме конечных геометрических адресов, необходимо указать также все отрезки трасс, по кото-

рым прокладывается провод, и отрезки прямых, выводящие провод на трассу. Если на пути провода встречаются технологические барьеры, то аналогично жгуту провод делится на два самостоятельных провода, стыкуемых на границе с помощью электросоединителя. Аналогичная картина имеет место при переходе с одной основной трассы на другую, если предполагается включить провод в состав жгута. Работа по привязке проводов к трассам начинается, как указано выше, на ранних стадиях проектирования (структурно-топологический синтез) и продолжается на последующих стадиях по мере уточнения геометрической модели самолета и длин проводов. Для обмена информацией между проектировщиками электросистем и проектировщиками компоновки самолета и монтажа оборудования на промежуточных этапах проектирования выпускаются трассовые схемы, отражающие текущее состояние геометрической модели самолета.

Трассовая схема представляет собой чертеж схемы привязки отрезков трасс и геометрических адресов узловых точек к геометрической модели объекта и содержит минимально необходимую информацию для установки оборудования и прокладки жгутов. Каждая трасса (отрезок трассы) может быть местом прокладки одного или нескольких жгутов. На начальных стадиях проектирования, когда неизвестны жгуты и конкретные адреса, так же как и достаточно точная модель объекта проектирования, выпускается предварительная или директивная трассовая схема, на которую нанесены основные функциональные элементы электросистем (генераторы, аккумуляторные батареи и т. п.) и технологические герморазъемы кабины и других областей. В дальнейшем директивная схема уточняется и развивается, однако с самого начала трассовая схема делится на области и отсеки, которые нумеруются в соответствии с принятыми нормативами. Например:

- 100 — носовая часть фюзеляжа;
- 200 — средняя часть фюзеляжа;
- 300 — оперение;
- 400 — силовые установки с панелями;
- 500 — левое полукрыло;
- 600 — правое полукрыло и т. д.

Индексация областей позволяет для каждой области упорядочить трассы и задать уникальные признаки, например температурный режим, что существенно облегчает принятие решений по электросистемам (выбор марки проводов). В качестве примера на рис. 9.11 показана трассовая схема для самолета Ил-114. Здесь же указана возможность объединения проводов в жгуты и ручки (объедине-

источников к потребителям) становится возможным окончательное объединение проводов в жгуты. Эта задача, вообще говоря, является оптимизационной по аналогии с оптимальным выбором электросоединителей. Действительно, чем меньше жгутов, тем легче и удобнее монтаж сети. С этой точки зрения было бы желательно всю заданную совокупность совместимых по электрическим признакам проводов объединить в один жгут. Однако этому могут препятствовать ограничения по диаметру и массе жгута. Поэтому необходимо рассматривать различные варианты объединения и выбрать вариант с минимальным числом жгутов.

Задачу минимизации числа жгутов можно формализовать так. Пусть N — число проводов заданной совокупности; $i = 1, \dots, N$ — произвольный номер провода; P — число жгутов, $j = 1, \dots, P$ — произвольный номер жгута. Включение провода в состав того или иного жгута определяется параметром

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если провод не включен в жгут,} \\ 1, & \text{если провод включен в жгут.} \end{cases} \quad (9.29)$$

Тогда

$$N = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P x_{ij}; \quad (9.30)$$

$$N_j = \sum_{i=1}^N x_{ij}, \quad j = 1, \dots, P, \quad (9.31)$$

где N_j — число проводов в j -м жгуте.

Необходимо так выбрать неизвестные P и x_{ij} , чтобы с учетом заданной исходной информации достичь $\min P$ при выполнении ограничений по диаметру и массе жгута:

$$d_j \leq d_{\max}; \quad j = 1, \dots, P; \quad (9.32)$$

$$M_j \leq M_{\max}; \quad j = 1, \dots, P, \quad (9.33)$$

где масса жгута определяется суммированием масс отдельных проводов, входящих в жгут, а диаметр жгута пропорционален коэффициенту заполнения и суммарному сечению проводов.

Сформулированная задача относится к классу задач дискретного программирования из-за дискретности изменения x_{ij} и имеет размерность такого же порядка, что и задача оптимального выбора электросоединителей. По аналогии с электросоединителями выбор оп-

тимального количества и состава жгутов целесообразно выполнять с помощью динамического программирования процесса поиска. В данном случае построение многоэтапной вычислительной схемы традиционным путем затрудняется тем, что неизвестными являются не только x_{ij} , но и число жгутов P , т. е. число этапов поиска. Поэтому сначала надо задавать P , а затем для каждого P вести поиск x_{ij} по традиционной схеме, аналогичной схеме на рис. 9.10. Поскольку цель задачи — минимизация P , сначала задается $P = 1$ и проверяются ограничения типа (9.32) и (9.33). Если они удовлетворяются, то задача решена. Если нет, то надо принять $P = 2$ и распределить оптимальным образом провода между жгутами. При фиксированном P критерий оптимальности не работает и следует руководствоваться новыми критериями, например минимизацией количества ответвлений жгутов (упрощением **конфигурации**), что упрощает их изготовление, равномерным распределением проводов между жгутами и т. д. После этого снова проверяются ограничения и, если они не удовлетворяются, принимается $P = 3$ и далее аналогичным образом до тех пор, пока не будет достигнут $\min P$, при котором ограничения удовлетворяются.

Следует отметить, что с помощью ограничений можно заранее оценить минимальное число жгутов. Например:

$$\min P \approx \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{M_{\max}}, \quad (9.34)$$

или

$$\min P \approx \frac{\sum_{i=1}^N K_{zi} S_i}{S_{\max}}, \quad (9.35)$$

где K_{zi} — коэффициент заполнения для проводов i -го типа;

$S_{\max} = \frac{\pi d_{\max}^2}{4}$. Значения P , полученные по (9.34) или (9.35), можно округлить до ближайшего целого числа и принять за начальные значения $\min P$, а дальше продолжить поиск x_{ij} как указано выше.

После выбора числа и состава жгутов каждому жгуту необходимо присвоить соответствующее *обозначение*. Обычно жгуты бортсети, куда входят провода и кабели из различных функциональных систем и подсистем, получают буквенно-цифровое обозначение, состоящее из двух частей: обозначения зоны (области, отсека) объекта

и порядкового номера жгута. Например, **100—12**, где 100 — обозначение носовой части фюзеляжа, а 12 — порядковый номер жгута. Жгут, проходящий через несколько зон и не разделенный на границах электросоединителем, имеет условное обозначение зоны с меньшим номером. Если жгут состоит из проводов и кабелей, принадлежащих одной функциональной системе или подсистеме, в начале обозначения жгута указывается обозначение системы (подсистемы). Например, **431.35—100—12**, где 431.35 — обозначение подсистемы, а **100—12** — обозначение жгута.

Завершающим этапом конструирования жгутов является составление чертежей и материальной спецификации. *Чертеж жгута* содержит следующую информацию:

- графическое изображение жгута в виде древовидной структуры, у которой узлы и терминальные точки соединяются отрезками прямых;
- мнемонические изображения адресов проводов, т. е. терминальных точек (контактов электросоединителей, клемм колодок, муфт и т. д.), и маркировку адресов и соответствии с электросхемами;
- расчетные длины участков жгута между узловыми точками (точками разветвлений) и от терминальных (адресных) вершин до первого узла;
- диаметры участков жгута без учета общих экранов, бандажа, чехлов и других элементов защиты;
- в случае сложного жгута маркировка простых жгутов, входящих в ответвления;
- позиции элементов спецификации;
- текстовые надписи на схеме по вязке, защите, заделке концов и т. п.;
- технические требования к изготовлению;
- наименование (обозначение) жгута.

Спецификация жгута содержит информацию об используемых материалах.

С учетом изложенного алгоритм конструирования жгутов может быть представлен пошаговым процессом, показанным на рис. 9.12. К алгоритму прилагаются следующие пояснения.

1. Ввод исходных данных по проводам (марки, сечения, длины) осуществляется из базы данных по проводам, а условия совместимости вводятся либо из справочно-нормативной базы данных (если условия стандартные), либо проектировщиком.

2. Для привязки проводов к геометрическим и электрическим адресам вводится следующая информация: наиболее точные геометрическая модель объекта и трассовые схемы по областям и зонам,

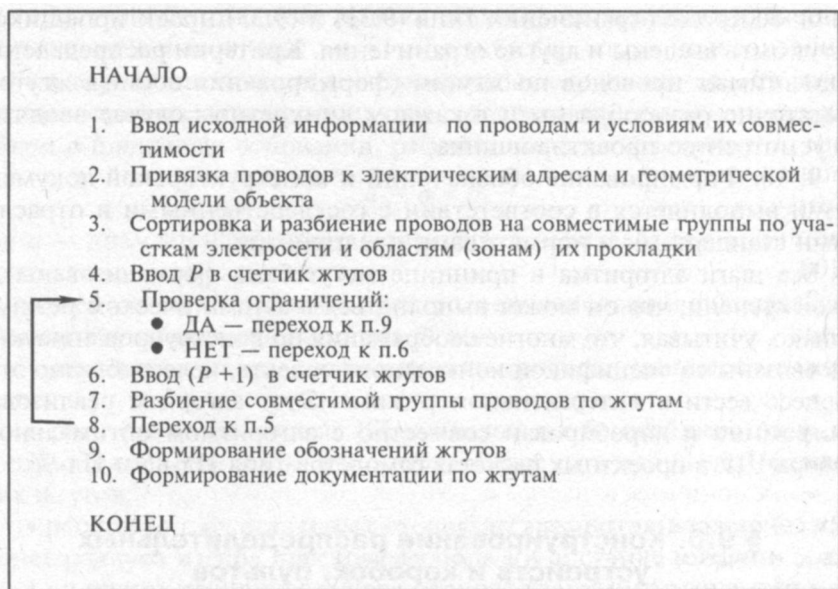


Рис. 9.12. Алгоритм конструирования жгутов

принципиальные схемы электросистем и данные по единичным и групповым электросоединителям. Для упорядочения процесса привязки сканирование на полном множестве проводов можно вести либо в соответствии со структурной схемой электросети «сверху вниз», либо последовательно по геометрическим зонам и областям, например, от меньшего порядкового номера к большему. Конкретная последовательность просмотра провода указывается проектировщиком.

3. Сортировка проводов и выделение групп «совместимых» проводов выполняются в той же очередности, что и просмотр зон и областей. Для каждой зоны (области) поочередно рассматриваются все трассы, выделяются множества проводов, прокладываемых по данной трассе, и из этого множества выделяются подмножества на основе условий совместимости.

4. Величина P для начального ввода в счетчик жгутов задается проектировщиком: здесь возможны следующие варианты:

- P выбирается из условий (9.34) или (9.35);
- $P = 1$;
- P — произвольное число, выбираемое на основе опыта и интуиции.

5—8. Кроме ограничений типа (9.32) и (9.33) проектировщиком могут быть введены и другие ограничения. Критерии распределения совместимых проводов по жгутам (формирования состава жгутов) достаточно разнообразны и в каждом конкретном случае вводятся по усмотрению проектировщика;

9, 10. Формирование обозначений и конструкторской документации выполняется в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами и нормативами предприятия.

Все шаги алгоритма в принципе могут быть формализованы до такой степени, что он может выполняться в автоматическом режиме. Однако, учитывая, что многие соображения по конструированию жгутов связаны со спецификой конкретного проекта, целесообразно этот процесс вести в интерактивном режиме. Этот алгоритм реализован программно и апробирован совместно с алгоритмом оптимального выбора ШР в проектных расчетах самолетов типа Ил-86 и Ил-96.

§ 9.5. Конструирование распределительных устройств и коробок, пультов управления и приборных досок

Конструирование указанного оборудования выполняется после окончательного уточнения геометрических моделей объекта, элементного состава и размещения оборудования. Сначала рассмотрим задачи проектирования наиболее простых по конструкции РК. Напомним, что в состав РК входят автоматы защиты и предохранители, коммутационная аппаратура, электрические соединители и элементы радиоэлектроники (резисторы, конденсаторы, транзисторы, интегральные схемы и т. п.). Исходная информация по элементному составу РК и габаритным размерам элементов определяется с помощью принципиальной схемы, перечня электросоединителей и справочно-нормативных данных. Исходной информацией для компоновки РК являются геометрические модели и пространственные координаты в уточненном варианте, которые могут ограничивать габаритные размеры РК и специальные условия компоновки, которые достаточно разнообразны. Например:

- автоматы защиты и предохранители, ШР и выключатели крепятся на одной стенке РК;
- контакторы и реле, за исключением тех типов реле, которые устанавливаются на платах, крепятся на полу РК;
- расстояние между соседними элементами должно быть не менее 1 мм, чтобы исключить возможность электрических и механических контактов;

- расстояние от самого высокого элемента до крышки РК должно быть не менее 40 мм;
- в случае нескольких электросоединителей в составе РК необходимо предусмотреть перед электросоединителями монтажный объем с площадью основания, рассчитанной по формуле

$$q = a \times b,$$

где a — диаметр наибольшего электросоединителя; b — количество контактов в этом соединителе;

- расстояние от стенки с электросоединителями до ближайшего элемента должно быть не менее 60 мм;
- расстояние между соседними электросоединителями не менее 5 мм;
- расстояние от стенки РК с платой до ближайшего элемента должно быть не менее 45 мм, чтобы обеспечить прокладку внутренних жгутов;
- расстояние от остальных стенок до элементов должно быть не менее радиуса изгиба перехода от пола РК к стенке (обычно 5 мм);
- на платах размещаются все радиоэлементы и микрореле типов РЭС-10, РЭС-34, РЭС-49, РЭС-60 и т. п.;
- высота верхней части элемента над платой должна быть 3 мм;
- над монтажной зоной элемента необходимо предусмотреть свободную зону высотой 30 мм;
- расстояние от нижней части элемента на плате до стенки или пола РК должно быть не менее 2 мм;
- количество реле на платах не должно превышать 30;
- толщина плат составляет 3 мм;
- платы могут располагаться на полу или стенках РК;
- расстояние от платы до стенки или пола РК колеблется в пределах 12—20 мм в зависимости от высоты наибольшего элемента на плате;
- для крепления радиодеталей с помощью гаек применяются платы шириной 28 мм;
- для пайки радиодеталей применяются платы шириной 45 мм.

Условия компоновки могут меняться не только от самолета к самолету, но и от одного РК к другому РК на одном и том же самолете.

Ввиду объемности исходной информации и многообразия условий компоновки конструирование РК выполняется в виде последовательного процесса, состоящего из следующих этапов:

- определение общей (суммарной) площади плат, необходимой для размещения всех радиодеталей и микрореле, конкретизация ко-

личества плат и их размеров, размещение деталей на платах и прокладка электросвязей между ними на платах;

- определение суммарной площади пола и стенок РК, необходимой для размещения всех элементов и плат РК, выбор габаритных размеров РК, размещение элементов и плат на полу и стенках РК, прокладка электропроводных связей между элементами, платами и электросоединителями внутри РК и объединение внутренних проводов в **ЖГУТЫ**;

- выпуск конструкторской документации.

Ориентировочная суммарная площадь плат и их количество могут быть определены достаточно просто. Суммируя площади, занимаемые отдельными деталями и задаваемые справочно-нормативными данными, и разделив полученную величину на приближенный коэффициент заполнения платы (меньше единицы), известный из опыта проектирования, находим первоначальное значение общей площади всех плат. Разделив эту величину на известные значения площадей стандартных или типовых для предприятия плат, получим первоначальное число плат. Однако следующие задачи этого этапа, а именно выбор геометрических размеров плат (если они не заданы стандартами или нормативами), размещение элементов и связей между ними на платах, не решаются так просто и однозначно и являются по сути оптимизационными задачами. Действительно, от того, как размещены элементы на плате, зависят и габаритные размеры платы и длины электросоединений между элементами платы. Учитывая большое количество возможных вариантов размещения, при выборе окончательного варианта следует стремиться, с одной стороны, к минимизации рабочей площади платы (если она не задается), а с другой стороны, к минимизации суммарной длины всех электросоединений на плате. Сложность решения резко возрастает, если не удастся все детали разместить на одной плате и необходимо исходное множество деталей разместить на двух платах или более. В целом задачи конструирования плат РК относятся к многокритериальным задачам дискретного программирования и относительно хорошо изучены применительно к печатным и иным платам для ЭВМ и радиоэлектронной техники. В нашем случае для решения в САПР можно предложить достаточно общего плана алгоритм, основанный на принципе динамического программирования (рис. 9.13). Пояснения к алгоритму следующие.

1. Исходная информация включает:

- множество элементов РК, подлежащих размещению на платах;
- электрические контакты, клеммы и болты этих элементов;

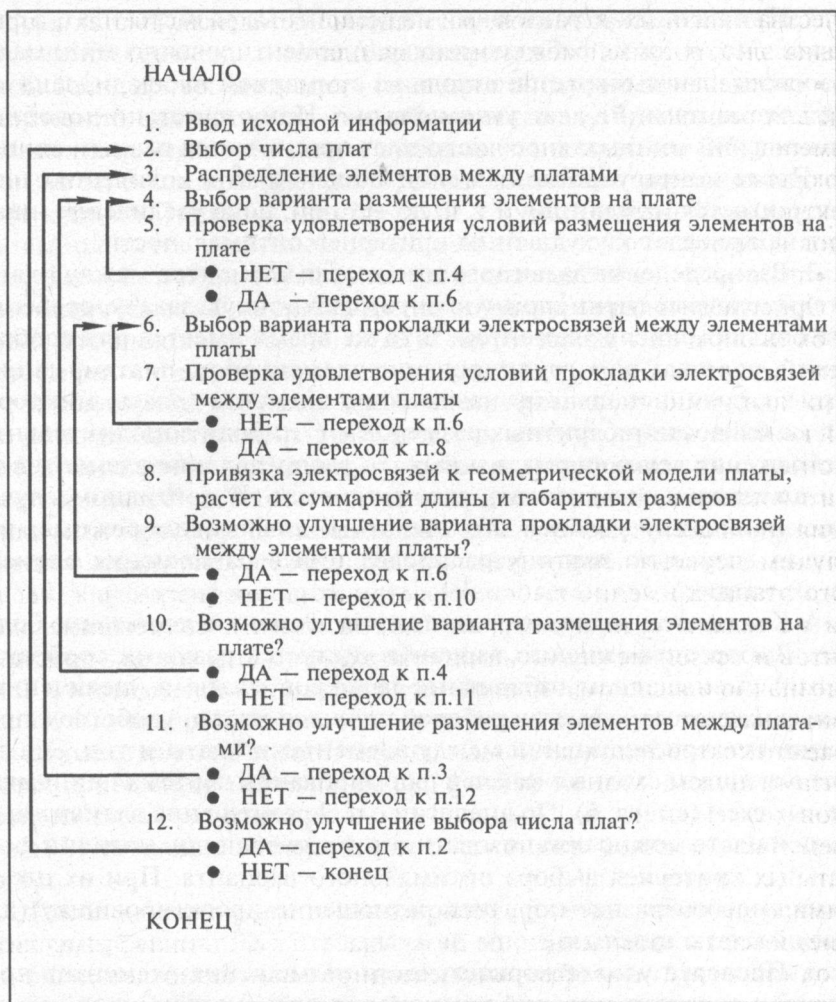


Рис. 9.13. Схема алгоритма конструирования плат ПК

- принципиальные схемы, определяющие электросвязи между этими элементами и токовые нагрузки **В** проводах;
- габаритные размеры этих элементов;
- условия размещения и компоновки этих элементов на платах;
- геометрическую модель платы.

Ввод исходной информации осуществляется большей частью из уже имеющейся базы данных проекта. Недостающая информация вводится по запросу проектировщиком в диалоговом режиме.

2. При наличии ограничений на габаритные размеры плат, а следовательно, и на их рабочую площадь ориентировочно минимальное число плат выбирается исходя из суммарной площади, занимаемой элементами РК, как указано выше. При отсутствии подобных ограничений минимальное число плат принимается равным единице. После конструирования одной общей платы количество плат увеличивается на единицу и т. д. до тех пор, пока увеличение числа плат не приведет к ухудшению критериев оптимальности.

3. Распределение заданного множества элементов между платами представляет очень сложную оптимизационную задачу, особенно при большом числе элементов. В то же время имеется ряд соображений, упрощающих группирование элементов по платам, например, по функциональному назначению элемента (платы микроре-ле), по близости габаритных размеров и т. п. Если дополнительные соображения легко формализовать, то распределение элементов по платам можно организовать автоматически. В противном случае проектировщику удобнее это сделать в диалоговом режиме, наблюдая визуальную картину распределения и размещения элементов на платах.

4. Количество вариантов размещения элементов достаточно большое. Выбор оптимального варианта диктуется разными соображениями: уменьшением габаритных размеров платы и увеличением коэффициента заполнения рабочей площади платы, удобством прокладки электросоединений между элементами платы и т. д. Эта задача во многом сходна с задачей формирования чертежа принципиальных схем (см. гл. 6). По аналогии с п. 3 размещение элементов на каждой плате можно организовать автоматически при наличии формальных критериев выбора оптимального варианта. При их отсутствии целесообразнее поручить размещение проектировщику (для каждой платы отдельно).

5. Проверка удовлетворительности размещения элементов производится с учетом условий компоновки плат и ограничений на габаритные размеры платы (для каждой платы отдельно).

6. Задача прокладки электросвязей между элементами платы во многом похожа на задачу структурно-топологического синтеза и синтеза принципиальных схем. Поэтому как выбор начального варианта прокладки, так и последовательное улучшение вариантов могут осуществляться по соответствующим сходным алгоритмам. Критериями отбора варианта являются минимум пересечений и минимум длин электросвязей.

7. К условиям прокладки относятся как стандартные или типовые условия, так и специфические условия компоновки плат. Про-

цедуры п. 5—7, как и предыдущие, возможно выполнить двояко: в автоматическом или интерактивном режиме.

8. Геометрическая модель плат проста (прямоугольные стороны и прямолинейные грани). Поэтому трассы для прокладки электросвязей на поверхности платы выбираются в виде ломаной, состоящей из отрезков прямых линий, расположенных под прямым углом друг к другу. Привязка электросвязи к геометрической модели платы выполняется указанием координат точек излома ломаной и координат граничных точек (электрических адресов). Это позволяет автоматически рассчитывать длины (суммарную длину) электросвязей и минимальные габаритные размеры платы с учетом заданных условий компоновки плат.

9. Улучшение варианта прокладки электросвязей осуществляется по двум критериям: минимуму суммарной длины и минимуму точек пересечения. Выбор наилучшего варианта осуществляется построением Паретто-множества вариантов в автоматическом режиме или простым сравнительным анализом с предыдущим вариантом в диалоговом режиме (для каждой платы отдельно).

10. Улучшение варианта размещения элементов на платы осуществляется аналогично п. 9, но по трем критериям (для каждой платы отдельно): минимуму суммарной длины, минимуму точек пересечений и минимуму габаритной площади платы.

11. Улучшение варианта распределения элементов между платами осуществляется аналогично п. 10, но с распространением действия критериев на все платы, т. е. суммированием критериев оптимальности по всем платам.

12. Улучшение выбора числа плат осуществляется аналогично п. 11.

После конструирования плат можно перейти к основной задаче — конструированию РК. Эта задача во многом сходна с предыдущей, но более сложная из-за объемного характера геометрической модели РК. Предполагаемая схема алгоритма конструирования РК дана на рис. 9.14, а пояснения приводятся ниже.

1. Исходная информация по РК включает:

- множество элементов, размещаемых в РК, за исключением элементов, уже размещенных на платах;
- множество сконструированных плат, рассматриваемых как новые интегральные элементы наравне с остальными;
- электрические адреса всех заданных элементов, включая интегральные (контакты, клеммы, разъемы и т. п.);
- электропроводные связи между элементами и их токовые нагрузки в соответствии с принципиальными схемами;

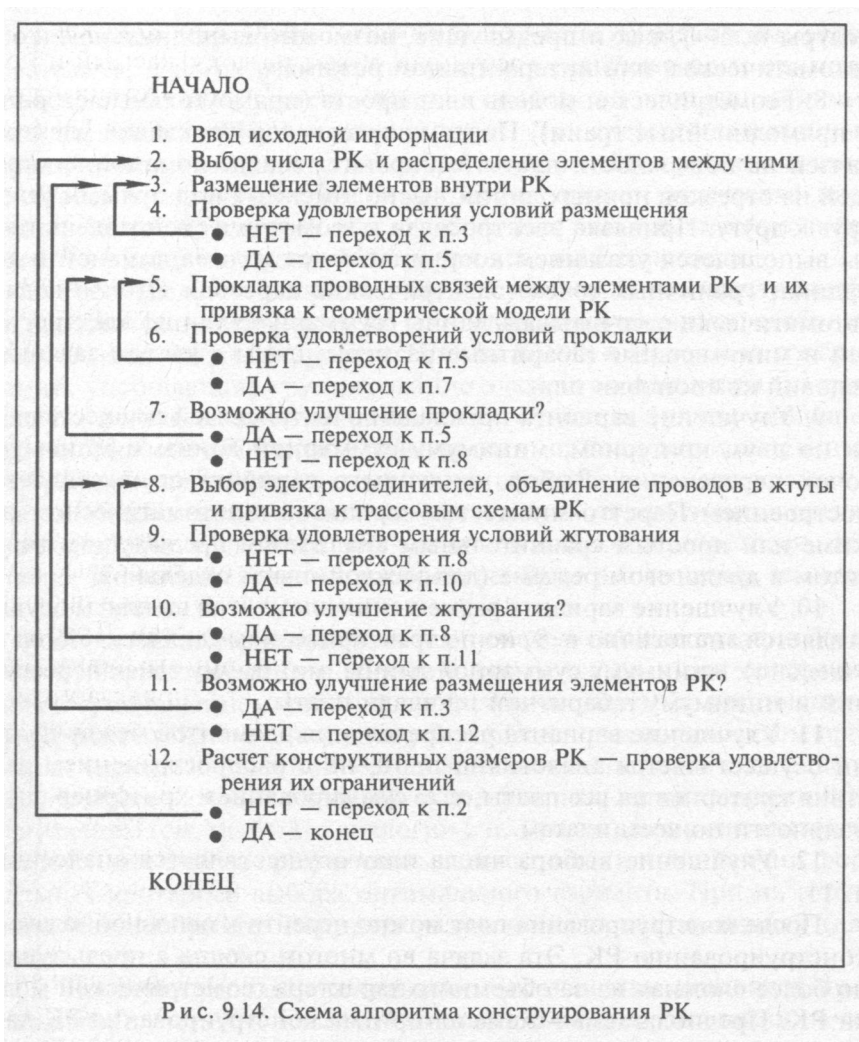


Рис. 9.14. Схема алгоритма конструирования РК

- габаритные размеры всех элементов и плат;
- условия размещения и компоновки элементов и плат в РК;
- геометрические модели РК и зоны ее установки на объекте, ограничения на габаритные размеры РК.

2. При наличии ограничений на габаритный объем РК минимальное число РК, необходимое для размещения заданного перечня элементов и плат, можно оценить следующим образом. Суммируя габаритные объемы элементов и плат и деля на объемный коэффициент заполнения РК (меньше **единицы**), получим ориентировочно

требуемый объем РК. Если он превышает предельно допустимый объем, то надо разделить требуемый объем на допустимый и получить начальное значение количества РК. При отсутствии ограничений на объем РК начальное число РК принимается равным единице.

3, 4. Размещение элементов и плат внутри РК (на полу и стенках) выполняется в соответствии с заданными требованиями к размещению и компоновке. При этом следует осуществить привязку габаритных размеров элементов и плат к поверхности пола и стенок так, чтобы взаимное расположение элементов и плат сохранить неизменным. Если имеются ограничения на габаритные размеры РК, то их следует учесть.

5—7. Задача прокладки электропроводных связей между элементами и платами РК аналогична задаче структурно-топологического синтеза электросети, но имеет сравнительно меньшую размерность и сложность из-за меньшего числа узловых точек и простоты геометрической модели РК. Тем не менее для решения задачи используется аналогичный подход. Сначала определяются трассовые схемы на геометрической модели РК, а затем прокладываются провода по маршрутам, привязанным к фиксированным трассам. Трассы и маршруты имеют вид ломаных с прямолинейными отрезками, параллельными прямоугольным координатным осям, привязанным к ребрам РК. Выбор наилучшего варианта прокладки осуществляется путем минимизации длин электросоединений.

8—10. Задачи выбора электросоединителей и конструирования внутренних жгутов РК аналогичны соответствующим задачам внешнего монтажа сети (см. § 7.3, 7.4) и решаются аналогичными методами. Критериями выбора наилучшего варианта решения являются по-прежнему минимальные количества электросоединителей, жгутов или их ответвлений.

11. Основным критерием для выбора оптимального варианта размещения элементов и плат в РК является минимум объема РК. Последний определяется с помощью габаритных размеров пола и стенок РК, которые, в свою очередь, определяются через габаритные размеры элементов и плат, а также трасс для прокладки жгутов и проводов, с учетом ограничений на компоновку, прокладку и жгутование. При наличии **ограничений** на габаритные размеры РК побочными критериями могут выступать минимальные площади пола и стенок.

12. В случае если конструктивные размеры РК не удовлетворяют заданным ограничениям в том смысле, что предельно допустимый объем недостаточен для размещения заданного множества элемен-

тов и плат, необходимо увеличить число РК на единицу. Если количество РК равно двум или более, возникает задача распределения элементов и плат между несколькими РК, которая подобна задаче распределения элементов между платами и решается аналогичным образом. В этом случае п. 3—12 алгоритма выполняются для каждого РК в отдельности.

После конструирования плат и РК составляется соответствующая документация, которая должна удовлетворять требованиям действующих стандартов и норм. В состав конструкторской документации входят:

- эскизы плат, на которых обозначены отверстия для закрепления элементов и указаны габаритные размеры плат, размеры отверстий для крепления и расстояние между элементами, а также между элементами и краями плат;
- эскизы РК с отверстиями для элементов и плат, на которых указаны габаритные размеры РК, размеры отверстий для крепления, расстояния между элементами и расстояния между элементами и краями поля и список РК;
- эскизы сборочных чертежей плат с элементами в двух проекциях, на которых указаны позиционные обозначения и типы элементов, габаритные размеры плат (для справки) и размеры наибольшего по высоте элемента;
- эскизы сборочных чертежей РК в трех проекциях с изображением взаимного расположения элементов и плат и указанием позиционных обозначений и типов элементов и плат (позиционные обозначения и типы элементов на платах не указываются), позиционных обозначений и типов электросоединителей, габаритных размеров РК и расстояний между элементами.

Информация по содержанию конструкторской документации получена полностью на этапах конструирования плат и РК. Поэтому с учетом стандартов и нормативов, а также простоты графического изображения проекций плат и РК эта документация в САПР может быть составлена в автоматическом режиме.

Проектирование более сложных в конструктивном отношении распределительных устройств (щитов, этажерок, шкафов с полками и т. п.) отличается от проектирования РК в основном использованием более сложных геометрических моделей и трассовых схем. Большей спецификой отличается проектирование пультов и приборных досок, которое выполняется совместно конструкторами электросистем и специалистами по компоновке кабины самолета. Процесс проектирования пультов можно представить последовательно выполнения следующих основных этапов:

- ввод исходной информации;
- определение зоны затемнения пультов и приборных досок и зоны **размещения** элементов;
- размещение элементов на плоскости пульта или доски;
- выбор электросоединителей для пульта (доски);
- прокладка проводов и жгутование на пульте (доске);
- оформление проектной документации.

Исходная информация включает:

- элементный состав пульта (приборы, индикаторы, сигнализаторы, надписи-трафареты, тумблеры и т. п.);
- геометрическую модель кабины пилотов, определяющую компоновку пульта (доски) и сидений пилотов со спинками, а также условные точки зрения пилотов («циклопический» глаз);
- геометрическую модель пульта (доски) и габаритные размеры размещаемых элементов;
- справочно-нормативные данные для элементов, включая электросоединители и жгуты;
- эргономические, конструктивные и технологические ограничения.

Элементный состав и габаритные размеры задаются в виде таблиц.

Геометрическая модель кабины дает схематичное представление в виде плоских контуров и ломаных линий с прямолинейными отрезками о взаимном расположении пульта (доски), сиденья и спинки пилотских кресел и органах ручного управления полетом. Точки «циклопического» глаза располагаются на пересечении вертикальной плоскости симметрии кресла с плоскостями сиденья и спинки. Геометрическая модель пульта (доски) представляется плоскостью с произвольными контурами, которые задаются дискретным множеством точек, выбираемых таким образом, чтобы представить контур замкнутой ломаной с прямолинейными отрезками. В целом из-за разнообразия геометрических схем компоновки кабины и большого числа **ограничений** на компоновку, что зависит от типа проектируемого самолета, значительная часть исходной информации вводится в САПР проектировщиком, а остальная информация содержится в проектной базе данных.

Зоны затемнения пультов и приборных досок определяются следующим образом. Аналогично пультам заданием множества дискретных точек моделируются внешние контуры органов ручного управления. Через каждую такую точку проводятся лучи из точки глаза до пересечения с плоскостью пульта. Множество полученных точек пересечений лучей с плоскостью пульта дают картину зоны затемнения и зоны удобного для пилотов размещения элементов.

Задачи размещения элементов на плоскости пульта (доски), выбора электросоединителей, прокладки проводов и их объединения в жгуты аналогичны соответствующим задачам конструирования РК и решаются аналогичным образом. Проектная документация также оформляется в виде эскизов компоновки пульта (доски).

§ 9.6. Монтажно-технологическое проектирование

Проектирование монтажа электрической системы решает задачи выбора способов и средств сборки, установки и закрепления на борту системы по частям и соединения отдельных частей в единое целое. Выбор способов и средств монтажа не представляет особых затруднений и, как правило, выполняется исходя из готового меню (ассортимента), имеющегося на предприятии. Основная сложность состоит в огромной трудоемкости из-за большой размерности системы и выпуска соответствующей документации для монтажа. Меню составляется на базе справочно-нормативной базы данных САПР и редко нуждается в дополнительном проектировании специальных монтажных изделий, например крепежных. Монтажная документация более многообразна в своем исполнении. Несмотря на необходимость удовлетворения стандартных и отраслевых требований, на многих предприятиях наблюдается своя специфика в выпуске монтажной документации как по форме, так и по перечню. В связи с этим здесь основное внимание уделяется содержанию типовых монтажных документов и возможностям их формирования в САПР на заключительной стадии проектирования.

Схемы электрических соединений составляются для всех сложных элементов системы, состоящих из нескольких составных частей, а также многочисленных систем и подсистем автоматики, радиоэлектроники, систем электроснабжения и т. п. Схемы соединений должны учитывать следующее:

- логику работы схемы, связи с другими схемами;
- прототипы, т. е. имеющиеся, выпущенные ранее схемы соединений на аналогичную систему (подсистему), на другой объект или в другой базе;
- данные о взаимном расположении элементов, технологических соединителей и т. д.;
- данные от поставщиков (разработчиков) оборудования;
- нормативно-справочные данные об элементах, устройствах, их связях и взаимодействиях, электромагнитной совместимости и т. п.

При выполнении схем соединений руководствуются рядом общих правил:

- на схеме соединений должны быть изображены все устройства, их соединители и элементы, входящие в состав изделия, а также соединения между этими устройствами и элементами;
- устройства на схеме изображаются в виде прямоугольников;
- элементы на схеме изображаются в виде условных графических изображений или прямоугольников;
- при изображении устройств в виде прямоугольников допускается помещать внутри их условные графические обозначения составляющих элементов;
- соединители и элементы изображают в виде условных графических обозначений;
- элементы, используемые в изделии частично, допускается изображать на схеме не полностью, ограничиваясь изображением используемой части;
- в схемах все устройства и элементы имеют позиционное обозначение, присвоенное им на принципиальной схеме;
- около графического обозначения устройства допускается указывать его наименование, тип и обозначение документа, на основании которого устройство применено;
- на схеме следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов или устройств, нанесенные на изделие или установленные в их документации;
- при подходе к контактам каждый провод или жилу кабеля изображают отдельной линией;
- номера проводов и жил кабелей на схеме проставляют около обоих концов изображения;
- каждый физический отрезок провода должен иметь свою оригинальную маркировку (бирку).

На схеме должны быть указаны:

- для одножильных проводов — марка, сечение и при необходимости расцветка;
- для кабелей — марка, количество и сечение жил и при необходимости количество занятых жил указывают в прямоугольнике справа от обозначения данного кабеля.

На схеме соединений около обоих концов линий, изображающих отдельные провода, указывается адрес соединений.

Схема электрических соединений выполняется адресным способом, при котором соединители, как правило, изображаются в виде таблиц, в графах которых указываются данные провода (кабеля): номер контакта (наименование клеммы), бирка, наименование сиг-

нала, сечение, длина, адрес, куда поступает провод, зона, в которой расположен блок.

При этом провода и кабели изображаются в виде отрезков линий для указания типа экранировки и свивки.

В схеме соединений расположение блоков и элементов должно примерно соответствовать их действительному расположению по компоновке, используя заведенную информацию о месте установки и номер шпангоута.

Форматы штампов, форматное разбиение листа, заполнение граф перечня элементов аналогичны принципиальной схеме.

Схемы соединений в основном используют информацию, уже полученную в САПР, на предыдущих стадиях проектирования. Сравнительно небольшой объем недостающей информации может быть введен по запросу проектировщиком. Поэтому эти схемы с учетом правил их выполнения могут быть составлены в САПР автоматическим путем.

Схемы общие определяют составные части систем (подсистем) и соединения их между собой на месте эксплуатации. Схематическими пользуются при ознакомлении с комплексами, а также при их контроле и эксплуатации. На схеме общей изображают устройства и элементы, входящие в комплекс, а также провода, жгуты и кабели (многожильные провода, электрические шнуры), соединяющие эти устройства и элементы. Устройства и элементы на схеме изображают в виде прямоугольников. Допускается изображать элементы в виде условных графических обозначений или упрощенных внешних очертаний, а устройства — в виде упрощенных внешних очертаний. Расположение графических обозначений устройств и элементов на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению элементов и устройств в изделии. Допускается на схеме не отражать расположение устройств и элементов в изделии, если размещение их на месте эксплуатации неизвестно.

На схеме должны быть указаны:

- для всех устройств или элементов, изображенных в виде прямоугольника или упрощенного внешнего очертания, — их наименование и тип и (или) обозначение документа, на основании которого они применены;
- для каждого элемента, изображенного в виде условного графического обозначения, — его тип и (или) обозначение документа;
- обозначения входных, выходных и вводных элементов, нанесенные на изделие.

Если обозначения входных, выходных и вводных элементов в конструкции изделия не указаны, то допускается этим элементам

условно присваивать обозначения на схеме, повторяя их в соответствующей конструкторской документации. При этом на поле схемы помещают необходимые пояснения. На схеме допускается указывать обозначения документов соединителей на полках линий-выносок, а внутри изображений соединителей — число их контактов. Допускается на схеме с помощью буквенного (буквенно-цифрового) обозначения определять принадлежность провода, жгута или кабеля (многожильного провода, электрического жгута) к определенным функциональным цепям по правилам, установленным соответствующим ГОСТом. Перечень проводов, жгутов и кабелей (многожильных проводов, электрических шнуров) помещают на первом листе схемы, как правило, над основной надписью или выполняют в виде последующих листов. Общую схему по возможности следует выполнять на одном листе. Условные графические обозначения можно поворачивать на угол, кратный 90°.

Надписи на схемах не допускают сокращений, текстовые надписи на схемах могут располагаться: рядом с графическим обозначением, внутри графического обозначения, над линиями связи, в разрыве линий связи, рядом с концами линий связи, на свободном поле схемы.

С помощью этих правил схемы общие по аналогии со схемами соединений могут формироваться в автоматическом режиме.

Схемы объединенные составляются для блоков типа распределительных устройств, коробок, щитов, пультов и т. п. Эти схемы отражают полный состав элементов блока и внутриблочных электрических связей. Выполняются на основе принципиальной схемы по аналогии с предыдущими схемами.

Таблицы соединений формируются автоматически по данным соответствующих схем соединений. Они выполняются в виде самостоятельного документа в соответствии со стандартными требованиями. Вначале указываются технические требования, которые вносятся конструктором и состоят в следующем: особенности проводов, марки припоя, вязки, свивки, уточнения длин проводников, заделки концов и т. п. В графах и подграфах таблицы содержится следующая информация:

- обозначение и бирка проводника;
- данные проводника (марка провода, цвет, сечение, длина);
- конечные адреса проводника (номер контакта и номер электро-соединителя элемента «откуда идет» и элемента «куда поступает»);
- тип соединения (заделка) проводника с контактом: наконечник, пайка, обжим, изоляция для резервных проводов (при заделке провода в наконечник для контактов типа «клемма» указывается

тип наконечника исходя из диаметра болта, сечения проводов, количества проводов, подключенных на контакт, и температуры в месте соединения);

- наименование жгута, куда входит провод (группа проводов, проложенных совместно);
- масса провода или группы проводов, идущих от одного адреса к другому;
- примечания об особенностях монтажа отдельных проводников (или их групп), заземления, свивки и принадлежности к рабочим или резервным проводам.

В таблицу соединений провода и кабели заносятся в порядке возрастания позиционных номеров блоков. Минусовые провода располагаются в конце таблицы. Резервные провода в соединителях указываются последними.

Монтажные схемы жгутов являются **документом**, оформленным в соответствии с требованиями к сборочным чертежам, которые необходимы в производстве для выполнения электромонтажных работ. Содержание монтажных схем включает необходимые проекции и сечения пространственной геометрической модели объекта или его отдельных зон (областей) с привязкой адресов и трасс прокладки жгутов; места и элементы крепления жгутов с указанием их позиционных обозначений и размеров (при **необходимости**); крупномасштабные проекции адресов, элементов и способов крепежа.

Для закрепления жгутов и силовых проводов на месте установки применяют хомуты из различных материалов, различной формы и различного назначения, а также кронштейны и другие элементы крепежа (нормированные или специальной конструкции). В связи с большим разнообразием способов и средств крепежа конструкторам следует предоставить возможность самостоятельного составления каталога крепежных изделий и библиотеки графических шаблонов отдельных видов крепежа и включения каталога и библиотеки в базу данных САПР. Места крепления жгутов на монтажной схеме следует привязывать к осям шпангоутов, стрингеров, нервюр и т. д. на геометрической модели самолета.

В целом необходимость взаимной увязки данных по жгутам и геометрической модели объекта с решением задачи выбора способов и средств крепежа требует организации развитого диалога. Поэтому формирование монтажных схем в настоящее время целесообразно делать полуавтоматическим способом в интерактивном режиме.

Технологические карты распайки разъемов жгута содержат следующую информацию:

- наименование и обозначение жгута;

- перечень электросхем, провода которых входят в данный жгут (отдельные провода или все вместе);

- перечень электросоединителей, к которым идут провода данного жгута, с указанием данных каждого соединителя (тип, позиция, цветовая метка, номер таблицы распайки);

- общие технические требования ко всем соединителям;

- специальные технические требования к конкретному соединителю (точки подключения экранов проводов, кабелей, минусовых проводов, витых пар и т. д.);

- таблицы распайки каждого электросоединителя с указанием обозначения цепи (кода), номера клеммы, бирки провода, сечения провода, заделки провода, диаметра бирки, диаметра клеммы;

- распаечные листы на разъемы и муфты сращивания с указанием схемы, типа и позиционного обозначения разъема, номера и диаметра контакта, бирки и диаметра бирки провода, марки, сечения и заделки провода.

К составлению технологических карт распайки предъявляется ряд требований, которые систематизируют порядок последовательного рассмотрения электросоединителей и их контактов, например:

- в таблицу распайки заносятся все клеммы разъемов, включая пустые клеммы;

- клеммы следуют в порядке убывания номеров;

- при наличии перемычки между клеммами они должны быть указаны там же, где бирка;

- диаметр бирки определяется диаметром трубки, из которой она сделана, что, в свою очередь, определяется маркой и сечением провода.

Большая часть информации для составления карт распайки получена на предыдущих этапах проектирования. Поэтому эти карты в САПР могут быть сформированы автоматически с учетом требований к их оформлению. Недостающая информация вводится конструктором по запросу.

Технологическая карта наводки жгута определяет состав и последовательность раскладки проводов в жгуте. Эта карта составляется для каждого жгута и состоит из следующих частей:

- 1) перечня покупных, стандартных и нестандартных изделий (разъемы, муфты сращивания, наконечники и т. д.);

- 2) перечня схем, сопрягаемых с жгутом;

- 3) технических требований к жгуту;

- 4) таблицы проводов.

В перечне разъемов указываются тип, позиция и цветовая метка разъема, а также индекс и обозначение системы, к которой принад-

лежит разъем. В перечень разъемов входят и разъемы «чужих» схем, к которым адресуются провода рассматриваемого жгута. Если «чужим» является технологический разъем, то в перечень включается только одна его часть, к которой подсоединяются провода данного жгута. Перечень разъемов упорядочен в такой последовательности: технологические соединители; соединители к блокам и элементам в порядке возрастания номеров; муфты сращивания и наконечники. Технические требования к жгуту достаточно разнообразны и зависят от многих факторов: зона (область) укладки жгута и его ответвления; температура окружающей среды, требуемая защита, способы и средства крепежа и т. п. Поэтому технические требования предъявляются конструктором в каждом конкретном случае самостоятельно.

Основной раздел карт наводки — таблицы проводов — содержит информацию о всех проводах жгута (марка, сечение, длина) и их особенностях (витые, скрученные, экранированные и т. д.), а также о конечных адресах проводов (электросоединители и их контакты). Провода в таблице располагаются в такой последовательности:

- провода с замером сопротивления;
- провода в общей плетенке (смешанный жгут);
- витые пары;
- специально экранированные провода;
- кабели и провода, требующие защиты чехлом;
- экранированные простые провода;
- простые провода.

Подавляющий объем информации по всем разделам техкарт наводки уже получен и хранится в базе данных проекта. Поэтому эти карты в САПР могут быть сформированы автоматически с небольшой доработкой вручную конструктором.

Чертежи и схемы РК, РУ, пультов и приборных досок. Сборочные чертежи, необходимые для производства и монтажа, можно получить на базе уже имеющихся конструкторских эскизов (см. § 9.5). Эти эскизы следует дополнить элементами крепления, ребрами жесткости и соответствующими техническими требованиями. Например, на платах надо указать диаметры отверстий крепления (если длина платы до 100 мм, то необходимо четыре отверстия по углам, если больше, то на каждые дополнительные 100 мм длины — одно отверстие в середине), минимальные расстояния от краев платы до центра отверстий и т. п. Аналогичным образом надо указать отверстия под крепеж, способы и средства крепежа, ребра жесткости и т. д. для РК, РУ, пультов и приборных досок. Технические требования к технологии производства и монтажа указываются прямо на поле

чертежа. Вся эта дополнительная информация достаточно разнообразна и вводится конструктором в САПР в диалоговом режиме работы с использованием каталогов и библиотек по типовым решениям сборки и монтажа.

Схемы электросвязей (объединенные схемы) и монтажные схемы жгутов и проводов для внутренних соединений РК, РУ, пультов и приборных досок такие же, как описанные выше, и формируются аналогичным образом.

Материальные спецификации необходимы для комплектации элементов, блоков и узлов электросистемы и составляются отдельно для каждой сборочной единицы. В общем случае материальные спецификации состоят из следующих разделов: документация, сборочные единицы и детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы. В зависимости от специфики конкретной сборочной единицы те или иные разделы могут отсутствовать.

В разделе «документация» указывается перечень конструкторских документов (чертежей, схем, таблиц и т. п.), составленных для рассматриваемого изделия, включая обозначения и номера, а также общая масса изделия. В разделе «сборочные единицы» указываются все составляющие компоненты изделия собственной разработки в последовательности, определяемой возрастанием номера конструкторских документов, количество компонентов, масса одного компонента и масса всех компонентов одного типа. В разделе «детали» дается перечень всех деталей собственной разработки, например наконечников, переходников и т. п., с указанием наименования, количества, материала и массы. Перечень деталей также упорядочен в порядке возрастания номера чертежа.

В раздел «стандартные изделия» вносятся изделия, соответствующие государственным и отраслевым стандартам, заводским номерам и специальным техническим требованиям и условиям, например наконечники проводов, муфты сращивания, переходники, минусовые панели, бирки, клеммные колодки, пломбы и т. п. Стандартные изделия объединяются в группы по их функциональному назначению. Для каждого изделия указываются наименование, количество и масса.

В разделе «прочие изделия» имеются подразделы по покупным блокам, ответным частям электросоединителей, заглушкам к электросоединителям и дополнительным элементам к сборочным блокам. Для каждого изделия указываются наименование, количество и масса. В разделе «материалы» дается перечень проводов, кабелей, защитных пленок, плетенок и других материалов, которые следует заказывать. Для каждого материала указываются наименование, ко-

личество и масса. Учитывая имеющиеся проектные данные и справочно-нормативную базу, материальные спецификации можно получить в САПР автоматическим путем.

Кроме указанных типовых документов, на каждом предприятии выпускается ряд вспомогательных документов, не **оговоренных стандартами** и нормами, например список всех схем, связанных с данной схемой, список всех клемм-панелей по схеме и по объекту в целом, список всех типов разъемов и количество разъемов по типам как по данной схеме, так и по объекту в целом и т. д. Таким образом, объем сборочно-монтажной документации достаточно велик. А если еще приплюсовать конструкторско-технологическую документацию, то объем проектной документации в целом весьма внушительный. Составление этой документации является наиболее трудоемкой частью и занимает основное время процесса проектирования бортовых электросистем. Чем выше уровень автоматизации получения проектных документов в САПР, тем больше эффект от внедрения САПР в конструкторское бюро. Поэтому при разработке и внедрении алгоритмов и программ автоматизированного проектирования в ведущих авиационных конструкторских бюро им. Ильюшина, им. Туполева, им. Микояна, им. Сухого и других первоочередное внимание уделялось выпуску проектной документации для опытного и серийного производства. В настоящее время основной объем документации в этих бюро выпускается с помощью САПР.

§ 9.7. Автоматизация сборочных технологий

Элементами бортовых электросистем, которые производятся непосредственно на самолетостроительных предприятиях, являются элементы собственной разработки: жгуты, платы, пульта, приборные доски, распределительные устройства и т. п. Остальные элементы приобретаются готовыми у других специализированных предприятий. Для производства элементов собственной разработки определяющими являются сборочные технологии (сборка жгутов из готовых проводов и кабелей, сборка плат из готовых электро- и радиодеталей и т. д.). Автоматизация сборочных процессов указанного типа дает большой эффект как с точки зрения сокращения сроков производства и численности работников ручного труда, так и с позиций повышения качества выпускаемой продукции и снижения количества брака (исключаются ошибки трудоемкой ручной сборки).

Анализ тенденций развития в области автоматизации технологических процессов показывает, что наибольший эффект достигается при интеграции автоматизированных систем проектирования

и производства, когда отдельные автоматы для выполнения тех или иных технологических операций заменяются автоматизированными комплексами для выполнения гибко перепроектируемых и переналаживаемых сложных технологических процессов. Значительный шаг в этом направлении сделан межведомственным научно-производственным коллективом «Время» на базе широкого применения многокоординатных шаговых электродвигателей в гибких производственных системах. Многокоординатные шаговые электродвигатели (МКШД) в отличие от вращающихся электродвигателей реализуют поступательное движение по взаимно перпендикулярным осям, подобно тому как это делают линейные электродвигатели вдоль одной оси. В частности, двухкоординатные шаговые двигатели (ШД), программно управляемые по каждой координате отдельно, могут двигаться по произвольной плоской траектории в рамках рабочего поля, которое ограничено плоской неподвижной частью двигателя (аналог стального статора без обмоток с выпрямленной поверхностью). Подвижная часть (аналог подвижной части линейного двигателя) отделена от неподвижной части воздушным зазором и имеет две управляющие обмотки с взаимно перпендикулярными магнитными осями. Воздушный зазор между обеими частями ШД создается за счет многочисленных воздушных струй, с давлением порядка 5 атм, выходящих из тонких отверстий в подвижной части ШД. Применение МКШД для автоматизации многих технологических процессов, особенно сборочных, имеет ряд преимуществ. В частности, исключается необходимость в преобразовании вращательного движения в поступательное и связанных с этим кинематических схем, исключаются механическое трение при движении по произвольной плоской траектории, обеспечивается программное управление плоской траекторией практически любой сложности и, самое главное, создается возможность совмещения транспортных и рабочих движений в технологическом процессе, например при позиционировании деталей в процессе сборки.

Применение МКШД в производственных процессах представляет интерес для различных отраслей промышленности, например точного электронного машиностроения, электротехнической, радиоэлектронной, приборостроительной и т. п. Здесь ограничимся рассмотрением примеров автоматизации сборочных процессов, связанных с производством жгутов, плат и микрореле.

Технологический процесс сборки жгута выполняется на так называемых монтажных плазах (крупногабаритные жгуты) или планшетах (малогабаритные жгуты) с плоской рабочей поверхностью, на которой с помощью специальных средств, например шпилек, обо-

значаются все адресные и узловые точки жгута в соответствии с чертежом жгута. По этим шпилькам производится раскладка всех проводов жгута в соответствии с картами наводки жгута. Раскладка проводов даже одной марки и одного сечения представляет собой трудную технологическую задачу. Если предварительно нарезать отрезки провода с длинами, соответствующими проводам жгута, то, пользуясь чертежом жгута, можно однозначно разложить все провода, привязывая их к адресным и узловым шпилькам. При наличии в жгуте проводов различных марок и сечений раскладка осуществляется аналогичным образом. Однако такой «индивидуальный» метод нарезания и раскладки каждого провода неприменим к сложным жгутам, состоящим из многих проводов, из-за очень большой трудоемкости. Обычно применяется метод непрерывной раскладки, когда провода сортируются по маркам и сечениям и раскладка всех проводов жгута одного и того же сорта осуществляется непрерывно (без нарезки на отдельные провода жгута). Непрерывная раскладка может быть выполнена во многих вариантах, а выбор наилучшего варианта представляет собой оптимизационную задачу.

При традиционном способе непрерывной раскладки проводов предварительно технологами составляется графическая схема раскладки (рис. 9.15). Раскладка начинается и заканчивается в точках конечных адресов (7 и 9), которые могут быть выбраны произвольно из множества конечных точек для провода данного сорта. Направления раскладки от одной точки к другой указаны стрелками. Если число проводов одного сорта на отрезке между двумя соседними точками является четным, то раскладка на этом отрезке производится по замкнутому контуру с возвратом в исходную точку. Если число проводов нечетное, то раскладка на этом отрезке заканчивается в соседней точке. В данном примере (рис. 9.15) непрерывная раскладка возможна по маршруту $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 2$. Чтобы продолжить дальнейшую

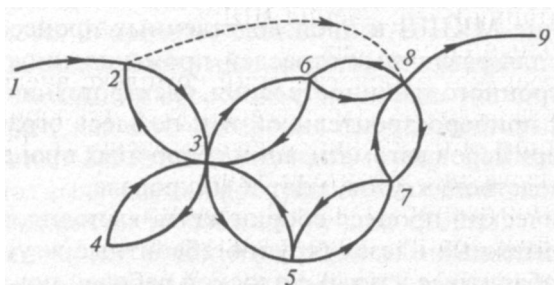


Рис. 9.15. Графическая схема раскладки жгута

раскладку непрерывным способом, необходимо пройти маршрут $2 \rightarrow 8 \rightarrow 9$, где провод на отрезке $2-8$ не нужен жгуту (излишен), но нужен для сохранения непрерывности раскладки. Провод на отрезке $2-8$ называется технологической переемычкой.

Графическая схема раскладки естественным образом описывается графом типа «дерево», где точки конечных адресов являются вершинами, отрезки между вершинами и промежуточными узлами — ребрами, а количество проводов в каждом ребре — массами ребер графа. Для каждой фиксированной пары вершин оптимальным является такой маршрут раскладки, который обеспечивает необходимую массу ребер графа и минимизирует при этом суммарную длину всех технологических переемычек. В теории графов эта задача решается специальными методами перебора. Таким образом, алгоритм поиска оптимального маршрута раскладки провода сводится к перечислению всех пар вершин, являющихся конечными адресами для провода данного сорта, определению оптимального маршрута раскладки для каждой фиксированной пары вершин и выбору наилучшего маршрута из множества найденных оптимальных маршрутов. Определив маршруты раскладки для каждого сорта провода в отдельности, получим решение задачи раскладки жгута в целом. Такой алгоритм разработан и программно реализован применительно к персональным ЭВМ [53]. Исходной информацией для проектирования раскладки жгута являются чертеж и карта наводки жгута, а также технологические параметры шпилек на плазу (планшете) и требования к обходу шпилек, вязки проводов и т. п.

Для автоматического перехода от оптимального проекта раскладки к реальной раскладке жгута без промежуточной документации коллективом «Время» создан специальный автоматизированный проектно-технологический комплекс, в состав которого входят:

- робот-манипулятор серии «Марс», разработанный авиационной промышленностью на базе двухкоординатных управляемых ШД;
- блоки питания и управления ШД;
- персональный компьютер.

Данный проектно-технологический комплекс внедрен в серийное производство сложных малогабаритных приборных жгутов в производственном объединении «Авиакомплекс» (г. Ереван). Комплекс имеет следующие характеристики:

- размеры монтажного поля 300 x 550 мм;
- число разных сортов провода в жгуте до 6;
- линейная скорость раскладки до 9,6 м/с;
- средняя производительность раскладки жгута 10 м/мин.

Внедрение комплекса в производство дало большой эффект не только из-за повышения производительности труда и сокращения сроков изготовления жгутов, но, что еще более важно, за счет резкого повышения качества сборки. При традиционной схеме сборки малогабаритных сложных жгутов многие операции выполняются вручную, что приводит к значительному браку (до 50%) выпускаемой продукции. При автоматической сборке ошибки ручных операций исключаются и брак определяется только низким качеством проводов, инструмента и технологическими погрешностями комплекса. В данном случае брак снизился до 5...10%.

В случае крупногабаритных жгутов «Марс» неприменим из-за недостаточности рабочего поля. Однако схема автоматической линии сборки может остаться неизменной, если вместо двухкоординатного ШД использовать линейные (однокоординатные) ШД. Тогда над монтажным плазом можно сконструировать систему из ЛШД, похожую по структуре на цеховые краны. ЛШД1 и ЛШД2 работают синхронно и совершают возвратно-поступательное движение по оси x , ЛШД3 движется по оси y .

Аналогичные проектно-технологические комплексы разработаны коллективом «Время» для сборки плат с электро- и радиодетальями, печатных плат и малогабаритных конструкций. Отличие комплекса для сборки плат заключается в том, что вместо планшета устанавливается плата с заданными габаритными размерами и отверстиями для крепежа элементов на плате и самой платы, а вместо катушек с приводами устанавливаются кассеты с элементами платы. На компьютере проектируются последовательность и маршруты транспортировки элементов от кассет к позициям размещения элементов на плате. Исходя из этого блок управления организует с помощью раскладчика раскладку элементов на плате. Последующие операции также нуждаются в смене инструмента и компьютерных программ.

Более существенные отличия имеют автоматизированные комплексы для сборки малогабаритных конструкций, например микро-реле (рис. 9.16, *a*, *б*). Здесь технологическая часть комплекса кроме робота-манипулятора серии «Марс» включает многопозиционный поворотный стол, жестко фиксированный относительно «Марса». Двухкоординатный программно-управляемый ШД 9 перемещает захватный механизм 5 с набором из трех захватных пневматических головок 6—8. Под подвижной частью ШД в зоне функционирования захватного механизма расположен накопитель 10 с вибробункером 11 и кассетами 12—15, где находятся детали магнитной систе-

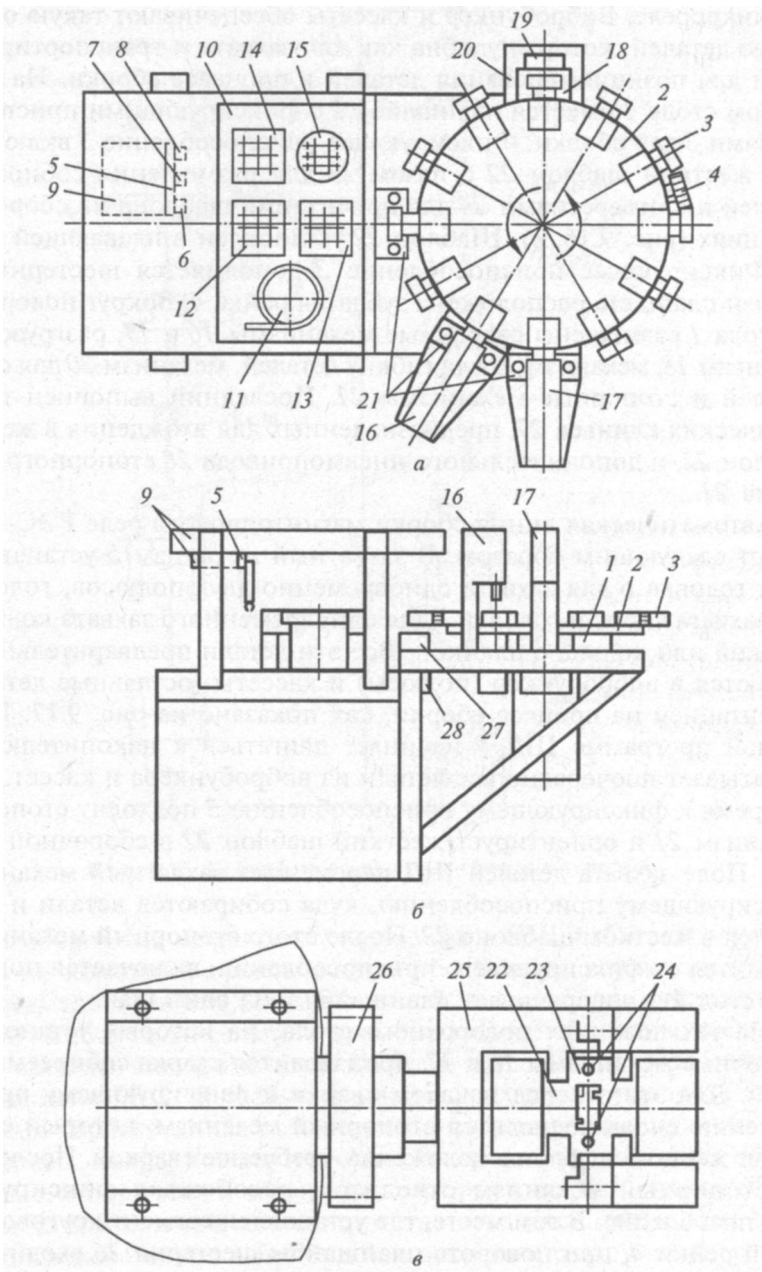
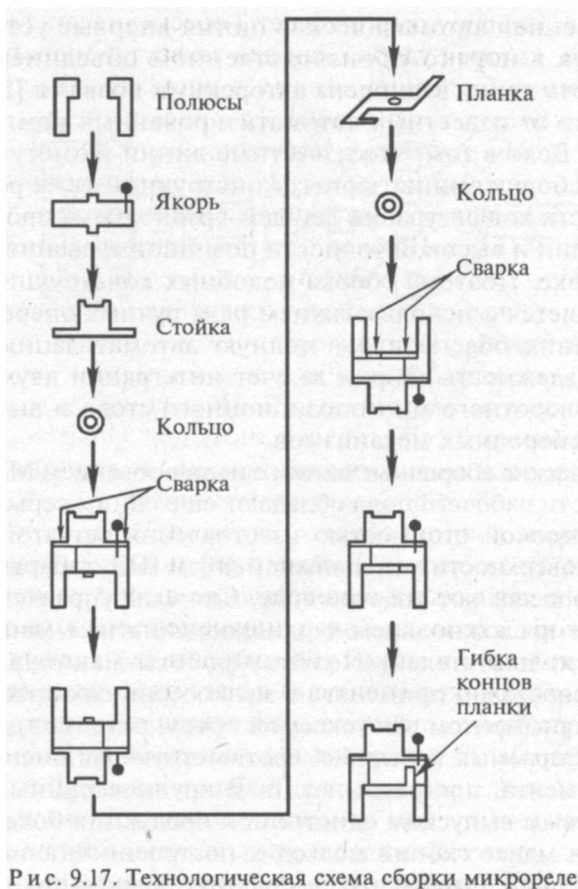


Рис. 9.16. Схема автоматизированного технологического комплекта для сборки микрореле

мы микрореле. Вибробункер и кассеты обеспечивают такую ориентацию деталей, которая удобна как для захвата и транспортировки, так и для позиционирования деталей в процессе сборки. На поворотном столе 1 имеется планшайба 2 с фиксирующими приспособлениями 3 для сборки. Фиксирующее приспособление 3 включает в себя жесткий шаблон 22 с пазом 23 для размещения собираемых деталей и с отверстиями 24 для ориентации шаблона на сборочных позициях (рис. 9.16, в). Шаблон 22 установлен в плавающей опоре 25. Фиксирующее приспособление 3 дополняется шестерней 26. Вблизи планшета расположена зубчатая рейка 4. Вокруг поворотного стола / размещены сварочные механизмы 16 и 77, разгрузочный механизм 18, механизм 19 для гибких деталей, механизм 20 для сброса деталей и стопорные механизмы 21. Последний выполнен в виде конических клиньев 27, предназначенных для вхождения в жесткий шаблон 22, и дополнительного пневмопривода 28 стопорного механизма 21.

Автоматическая линия сборки магнитопровода реле РЭС-49 работает следующим образом. В захватный механизм 5 устанавливаются головка 6 для захвата одновременно двух полюсов, головка 7 для захвата якоря и головка 8 для одновременного захвата кольца со стойкой или кольца с планкой. Все эти детали предварительно загружаются в вибробункер (полюсы) и кассеты (остальные детали) с ориентацией на процесс сборки, как показано на рис. 9.17. По заданной программе ШД 9 начинает двигаться к накопителю 10 и захватывает поочередно все детали из вибробункера и кассет. В это же время к фиксирующему приспособлению 3 подходит стопорный механизм 21 и ориентирует жесткий шаблон 22 в сборочной позиции. Поле захвата деталей ШД перемещает захватный механизм к фиксирующему приспособлению, куда собираются детали и зажимаются в жестком шаблоне 22. После этого стопорный механизм 21 отводится от фиксирующего приспособления, включается поворотный стол 1 и поворачивает планшайбу 2 на один шаг.

На тех позициях поворотного стола, на которых установлены сварочные механизмы 16 и 17, производится сварка собираемых деталей. Для этого перед началом сварки к фиксирующему приспособлению снова подводится стопорный механизм, который ориентирует жесткий шаблон в положение, требуемое сваркой. После сварки стопорный механизм отводится, освобождая фиксирующее приспособление. В том месте, где установлен сегмент круговой зубчатой рейки 4, при повороте планшайбы шестерня 26 входит в зацепление с рейкой 4, обкатывается по ней и поворачивает шаблон на 180°.



Все сборочные механизмы, так же как и ШД, работают одновременно по командам программируемой системы управления. Длительность такта работы автоматической линии сборки определяется суммой наиболее длительного времени работы сборочных механизмов и времени поворота стола на один шаг. Для сборки магнитопровода реле РЭС-49 требуется два полных цикла поворота стола. Во время первого цикла собираются и свариваются в нужных местах полюсы, якорь, кольцо и стойка. Во время второго цикла дополнительно собираются и свариваются второе кольцо и планка. После сборки на одной и той же позиции, где находятся механизмы 18, 19 и 20, последовательно выполняются операции разгрузки собранного магнитопровода, гибких концов планки и сброса магнитопровода в тару. На этом сборка заканчивается.

Рассмотренная автоматическая линия впервые установлена и апробирована в научно-производственном объединении «Реле» (г. Ереван). Эта линия защищена авторскими правами [54] и выгодно отличается от известных автоматизированных комплексов для сборки реле. Дело в том, что известные линии не могут быть применены для сборки миниатюрных конструкций типа реле РЭС-49 из-за сложности конфигурации деталей, трудности их пространственной ориентации и высокой точности позиционирования, необходимой при сборке. Поэтому сборка подобных конструкций традиционно выполняется с использованием ряда ручных операций. Предложенная линия обеспечивает полную автоматизацию, высокую точность и надежность сборки за счет интеграции двухкоординатного ШД, поворотного многопозиционного стола и **ВЫСОКОТОЧНЫХ** захватных и сборочных механизмов.

Автоматические сборочные линии с использованием МКШД кроме ограниченности рабочего поля обладают еще одним серьезным недостатком — высокой стоимостью изготовления сетчатой структуры полюсов на поверхности неподвижной части ШД, габаритные размеры которой определяют рабочее поле. Системы управления МКШД также дороже и сложнее, чем у однокоординатных (линейных или вращающихся) двигателей. Поэтому роботы-манипуляторы типа «Марс» целесообразно применять в мелкосерийных производствах с большим ассортиментом выпускаемой продукции, где требуется частая смена собираемых изделий и соответствующая смена и переналадка инструмента, программ и т. п. В крупносерийных производствах с массовым выпуском однотипной продукции более оправданным является менее гибкий подход к построенной автоматической линии. Последний сводится к разбиению сборочного процесса на множество последовательных, элементарных операций и выполнению каждой операции специализированными, но дешевыми и простыми средствами. Примером такой поточной линии может служить комплекс для автоматического выполнения сборочных операций реле РЭС-49, следующих за сборкой магнитопровода (рис. 9.18).

Центром поточной линии является восьмипозиционный программно-управляемый поворотный стол *1*, организующий конвейерное движение от одной операции сборки к другой. На поворотном столе смонтированы спутники *2*, в которых осуществляются сборочные операции. Вокруг поворотного стола установлены транспортный манипулятор *7* для подачи магнитопровода реле в спутник, рабочий механизм *8*, **контролирующий** наличие магнитопровода в спутнике, транспортный манипулятор *10* для подачи катушки с сердечником в спутник, сварочные механизмы *13* и *14*, механизм *15*

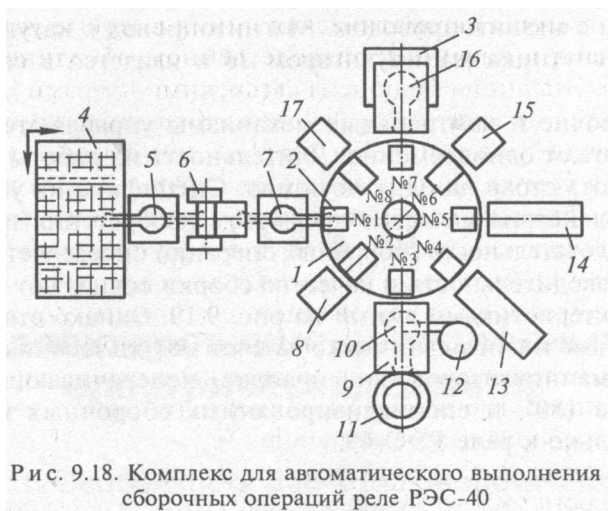


Рис. 9.18. Комплекс для автоматического выполнения сборочных операций реле РЭС-40

для контроля качества сварки, транспортный манипулятор **16** для разгрузки спутников и механизм **77**, контролирующей отсутствие сборки или ее деталей в спутнике. Магнитопроводы, собранные, например, с помощью линии на рис. **9.18**, размещаются в горизонтальной кассете — накопителе **4**. При этом линия сборки магнитопровода существенно упрощена за счет исключения операции гибки лапок. Эта операция выполняется в специальном механизме (**5**), куда магнитопровод подается из **кассеты-накопителя** с помощью транспортного манипулятора **5**. После гибки лапок магнитопровод забирается манипулятором **7** и устанавливается в спутник **2**. Катушка с сердечником собирается в механизме **9**, куда сердечник поступает из питателя **77**, а катушка — из питателя **12**. Затем с помощью манипулятора **10** катушка с сердечником подается в спутник. Сварка сердечника с магнитопроводом осуществляется в спутнике, причем каждый сварочный механизм сваривает только одну соответствующую крайнюю точку

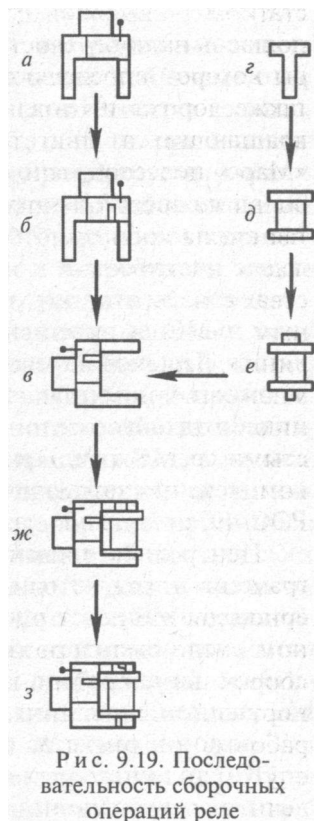


Рис. 9.19. Последовательность сборочных операций реле

сердечника с магнитопроводом. Магнитопровод с катушкой вынимается из спутника манипулятором 16 и кладется в специальную тару 3.

Все рабочие и контрольные механизмы управляются программно и работают одновременно. Длительность их работы определяет такт поворота стола на одну позицию. Специфика их устройства и принципа действия является предметом изобретения и описана в [55]. Последовательность сборочных операций определяется рис. 9.19. Такт, производительность и качество сборки совпадают с аналогичными характеристиками линии на рис. 9.19. Однако стоимость поточной линии значительно ниже за счет использования однокоординатных манипуляторов, как правило, поворачивающихся в обе стороны на 180° , и специализированных сборочных механизмов применительно к реле РЭС-49.

Г Л А В А 1 0

Проектирование авиационных электрических машин

§ 10.1. Особенности расчетно-теоретического проектирования

В предыдущих главах были рассмотрены все основные задачи автоматизированного проектирования ЭЭС и тех его элементов, которые непосредственно разрабатываются в самолетостроительных конструкторских бюро. Те же элементы ЭЭС, область применения которых значительно шире, чем конкретно проектируемый класс самолетов, создаются в организациях, специализирующихся по соответствующему профилю, например ЭМ, которые широко применяются в ЭЭС (генераторы, преобразователи и потребители электроэнергии) и системах автоматики (датчики, усилители, исполнительные органы и следящие приборы). Авиационные ЭМ в силу предъявляемых к ним особо жестких требований большей частью разрабатываются и производятся в рамках авиационной промышленности. Однако в основном нужды народного хозяйства обеспечиваются широким ассортиментом больших и малых ЭМ, выпускаемых такой отраслью электротехнической промышленности, как электромашиностроение. Несмотря на многообразие принципов действия, конструкций и параметров, ЭМ имеют общие для всех специфические особенности, которые проявляются как в части их проектирования, так и производства. Кроме того, все ЭМ независимо от функционального назначения и прочих признаков относятся к классу сложных ЭТС. С учетом указанных соображений особенности задач, методов и примеры проектирования авиационных ЭМ в САПР рассматриваются в этой главе более детально и полно.

Главное, что отличает ЭМ как объект проектирования от ЭЭС, — это *конструкция*. Части (элементы) ЭМ объединены друг с другом с

помощью механических соединений. Они жестко скомпонованы в одну цельную конструкцию. Элементы же ЭЭС имеют между собой электрические соединения, которые придают системе гибкость, мягкость в плане ее сборки. Поэтому конфигурация ЭЭС является не сосредоточенной в одном месте, а распределенной в пространстве, пластичной и при необходимости изменяемой. Это конструктивное отличие **оказывает существенное** влияние на структуризацию процесса проектирования ЭМ. Дело в том, что в конструкции ЭМ различаются две основные части: активная и вспомогательная (обслуживающая). Процесс проектирования начинается с анализа технического задания и выбора *принципиального варианта* активной части ЭМ (начальный этап расчетно-теоретического проектирования). Множество таких принципиальных вариантов ЭМ представлено на рис. 10.1. В нем выделено три уровня:

1) тип, разделяющий ЭМ на машины постоянного и переменного тока, которые, в свою очередь, делятся на синхронные и асинхронные;

2) конструктивная форма исполнения активной части, которая различается по геометрии магнитопровода (явнополюсная и неявнополюсная), схемам обмоток (однофазная и трехфазная) и способам сопряжения неподвижной (статор) и движущейся (ротор) активных частей (контактная и **бесконтактная**);

3) выходные и входные параметры ЭМ, как элемента системы (частота вращения, напряжение, ток, мощность, электрическая частота, коэффициент мощности). Изображенный на рис. 10.1 граф называют деревом вариантов. Он позволяет формально оценивать число вариантов на любом уровне и в любой вершине.

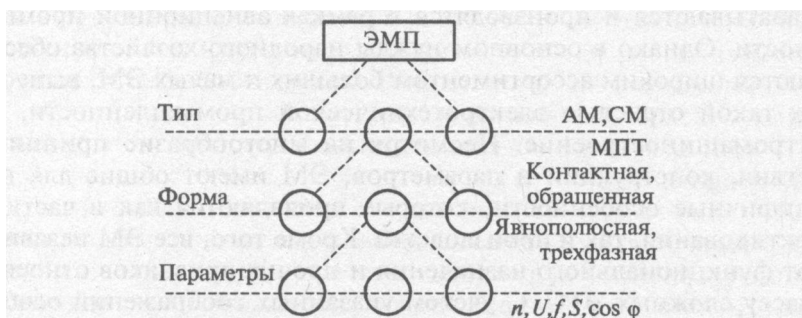


Рис. 10.1. Схема дерева структурно-параметрических вариантов ЭМП:

АМ — асинхронная машин; СМ — синхронная машина;
 МПТ — машина постоянного тока; n — частота вращения; U — напряжение;
 f — электрическая частота; S — полная мощность; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности

Каждый принципиальный вариант из этого множества оценивается по критериям, согласованным между разработчиками ЭЭС и ЭМ. Оценка всех допустимых по условиям технического задания вариантов завершается выбором одного или нескольких конкурентоспособных вариантов с помощью методов многокритериальной оптимизации, причем для сравнительного анализа и выбора конечных вариантов нет смысла пользоваться достаточно точными критериальными оценками. Имеющаяся на этом этапе информация о проектируемой ЭМ пока слишком неполна и неточна. Поэтому можно ограничиться вероятностными или пограничными (гарантированный наихудший случай) оценками оптимальных вариантов с помощью простых критериальных соотношений, полученных, например, статистическими методами. Дерево вариантов и приближенные вычисления критериев позволяют автоматизировать процесс начального выбора принципиального варианта ЭМ. Однако в САПР все равно надо на этом этапе предусмотреть участие проектировщика (диалоговый режим). Это необходимо для коррекции набора критериев и вычислительных моделей, а также при принятии конечных решений.

После выбора принципиального варианта переходят к расчетно-теоретическому определению всех *проектных данных* активной части ЭМ, что требует предварительного выбора базовой расчетной модели и соответствующих методов поиска оптимальных решений. В настоящее время уровень развития математической теории ЭМ столь высок, что дает возможность составления высокоточных моделей для анализа всех рабочих и аварийных физических процессов ЭМ в зависимости от времени (см. гл. 7). Однако на начальных этапах проектирования такая точность, как уже указывалось, не нужна, тем более что в процессе поиска оптимума все расчеты повторяются многократно и точные модели потребуют неоправданно много машиносчетного времени. Поэтому в САПР множество расчетных моделей ЭМ делится на две группы:

- 1) приближенные модели (неточные, грубые), но зато **быстродействующие**;
- 2) высокоточные модели, но зато медленного действия.

Самыми точными являются модели в виде систем дифференциальных уравнений, полученных методами теории цепей и теории поля. Но они больше применимы для одноразовых вычислений, например при анализе переходных процессов, когда известны предварительно требуемые проектные данные (см. гл. 7, 8). В процессе же проектирования теоретические модели используются обычно для расчетов установившихся режимов. При этом условии дифферен-

циальные уравнения вырождаются в алгебраические, что намного повышает быстродействие теоретических моделей без значительной потери точности. В таких случаях многократные просчеты теоретических моделей приемлемы, а влияние переходных процессов на выбор проектных данных учитывается косвенным образом с помощью расчетов переходных и сверхпереходных параметров. Такие приближенные оценки качества переходных процессов обычно использовались ранее в традиционном процессе ручного проектирования ЭМ. Однако погрешности определения переходных и сверхпереходных индуктивных сопротивлений ЭМ могут быть значительными из-за технологических погрешностей **производства**. Поэтому для использования в САПР более предпочтительными являются приближенные оценки качества переходных процессов, полученные с помощью обработки экспериментальных данных статистическими или кибернетическими методами (см. гл. 3).

Разделение расчетных моделей ЭМ на «быстрые» и «медленные» позволяет ставить задачу поиска оптимальных решений в форме *многокритериальной задачи оптимизации* функции многих переменных (см. § 2.4). В соответствии с этой формулировкой «быстрые» модели в виде систем алгебраических уравнений можно представить функциональными преобразователями, на вход которых подаются независимые переменные z_1, \dots, z_p , а на выходе формируются функции этих переменных (рис. 10.2). **Выходные** функции связаны с входными переменными с помощью расчетной модели и различаются как функции цели и ограничений. Для каждой совокупности входных величин расчетная модель вычисляет и ставит в соответствие выходные величины функционального преобразователя.

Целевые функции (критерии оптимальности), применяемые при проектировании ЭМ, достаточно разнообразны. Оптимальность ЭМ общепромышленного назначения часто оценивается с помощью *критерия стоимости*, который суммирует все затраты, связанные с производством и эксплуатацией данного изделия. От ЭМ, предназначенных для подвижных объектов типа летательных аппаратов и других, во многих случаях требуются *минимальные массогабаритные показатели*. Критериями оптимальности ЭМ в системах автоматического управления и контроля могут высту-

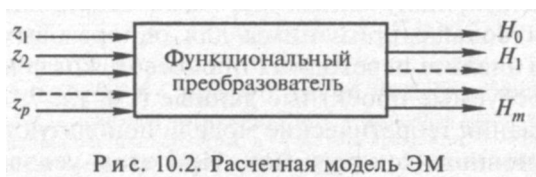


Рис. 10.2. Расчетная модель ЭМ

пать *быстродействие, точность обработки сигналов* и другие показатели рабочих режимов.

Выбор того или иного критерия нередко не вызывает особых затруднений и обуславливается конкретным содержанием задачи проектирования. Однако возможны случаи, когда несколько критериев являются одинаково важными для проектируемой машины. Тогда задача проектирования становится многокритериальной, а процесс решения значительно усложняется и требует применения специальных приемов. Одним из широко распространенных приемов является замена нескольких критериев одним обобщенным, в котором исходные критерии суммируются по заранее принятой степени важности. Например, суммарная стоимость производства и эксплуатации может рассматриваться как обобщенный критерий, в котором суммирование производится с единичными коэффициентами важности. Однако такой подход допустим, если составляющие обобщенного критерия имеют одинаковую размерность. В противном случае многокритериальность трудно обойти и приходится искать оптимальные решения по каждому исходному критерию в отдельности, а затем находить компромиссное решение.

Применяемые до настоящего времени критерии не являются достаточно универсальными. Даже такой обобщенный критерий, как полная стоимость, обладает недостатками, связанными со сравнительно быстрым изменением расценок, зависимостью их от географии и условий производства, эксплуатации и т. п. Эти недостатки особенно заметны при проектировании изделий длительного срока службы. Поэтому важная проблема определения совокупности стандартных критериев в электромашиностроении до сих пор является нерешенной. В каждом конкретном случае этот вопрос решается отдельно.

Выбор *функций ограничений* представляет не меньше затруднений, чем выбор критерия оптимальности. Число ограничений, определяемое техническим заданием на проектирование, стандартами, нормами, конструктивными и технологическими особенностями, достаточно велико. В то же время очевидно, что чем больше ограничений, тем сложнее расчетный алгоритм. Поэтому в расчетную модель целесообразно включать только существенные ограничения, т. е. такие, которые оказывают решающее влияние на формирование множества D_z .

Анализ и разделение ограничений на существенные и несущественные можно провести двумя путями: теоретическим и экспериментальным. *Теоретический подход* к анализу ограничений сводится к исследованию поверхностей равного уровня ограничений с по-

мощью их функциональных выражений. Однако последние не всегда удается получить в явном виде. Кроме того, при числе входных величин больше трех теряются геометрические представления о поверхностях равного уровня. Поэтому возможности теоретического подхода достаточно ограничены в решении этого вопроса.

Экспериментальный подход использует статистические методы численного анализа ограничений при различных фиксированных входных величинах. Так, например, можно осуществить упорядоченный или случайный перебор точек в допустимом множестве D_z . Если считать, что N — полное число перебираемых точек, а N_j число точек, в которых нарушается ограничение H_j , то отношение N_j/N будет характеризовать вероятность нарушения данного ограничения. При малой вероятности нарушения ограничение можно считать несущественным. Несмотря на логическую простоту, возможности экспериментального подхода также сильно ограничены из-за большой размерности задачи. Поэтому разработку достаточно универсальных, формализованных методов выделения существенных ограничений можно также отнести к числу нерешенных проблем расчетного моделирования ЭМ.

Выбор *входных параметров* осуществляется обычно произвольно из числа варьируемых проектных данных. Однако опыт автоматизированного проектирования показывает, что входные величины желательно выбирать однородными по физическому смыслу и размерности. Например, в качестве компонентов вектора z целесообразно выбрать конструктивные размеры. Тогда набор компонентов будет однозначно определять конструктивное исполнение машины и создаст предпосылки для получения их оптимальных значений в виде номиналов, необходимых для конструктивной проработки чертежей.

Входные параметры расчетной модели различаются как зависимые и независимые. *Зависимыми* являются те переменные, которые связаны **функциями** ограничений в виде равенств или неравенств. За вычетом этих переменных оставшиеся на входе переменные являются *независимыми* и могут быть выбраны оптимальным образом. Если полагать, что в качестве независимых переменных активной части ЭМ приняты конструктивные размеры (геометрические размеры магнитопровода и данные обмоток), то процесс поиска их оптимальных значений можно изобразить итерационной схемой с обратной связью, где шаг и вектор итераций определяются алгоритмом оптимизации (рис. 10.3, *a*). По такой же схеме далее можно оптимизировать конструктивную часть ЭМ. Обычно эта часть ЭМ имеет многоцелевое назначение. Она предназначена не только для сборки и компоновки, но и для выполнения таких важных функ-

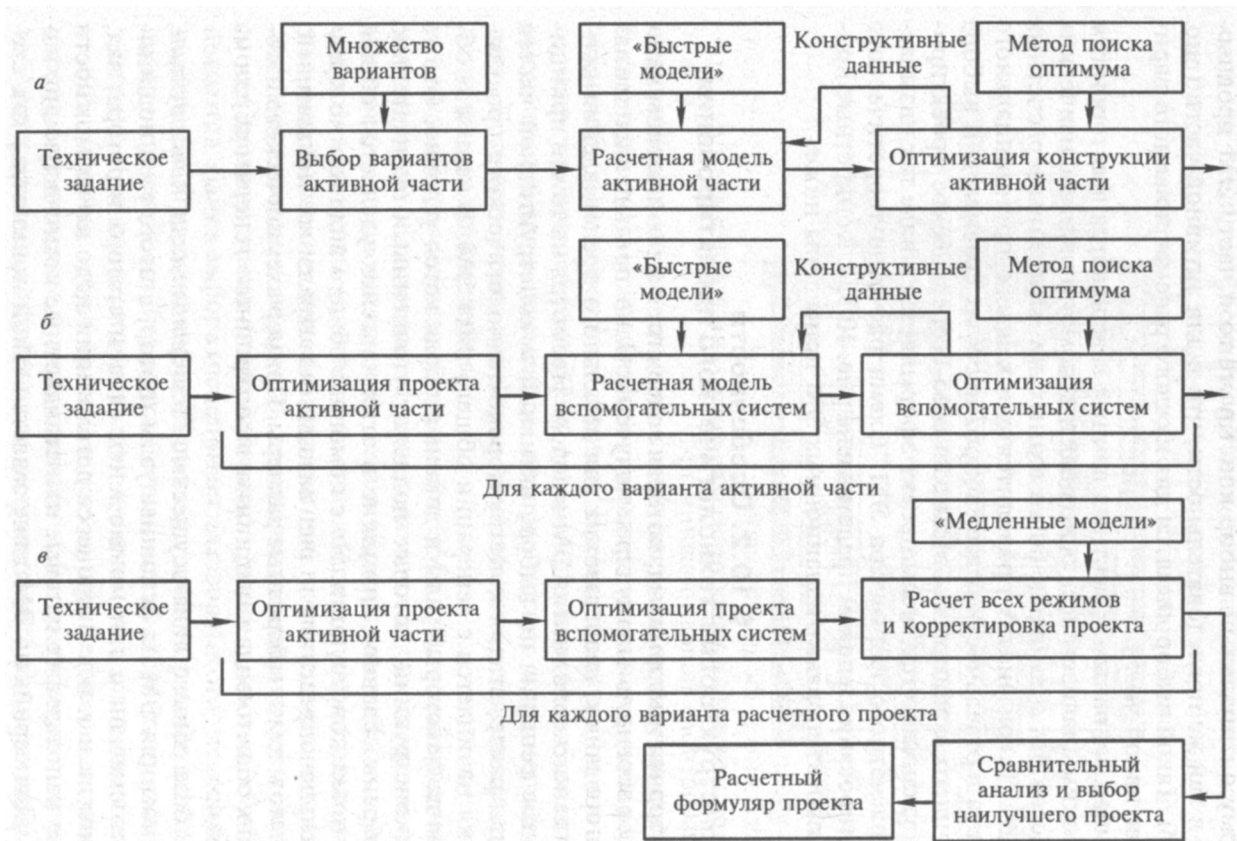


Рис. 10.3. Схемы расчетно-теоретического проектирования ЭМ

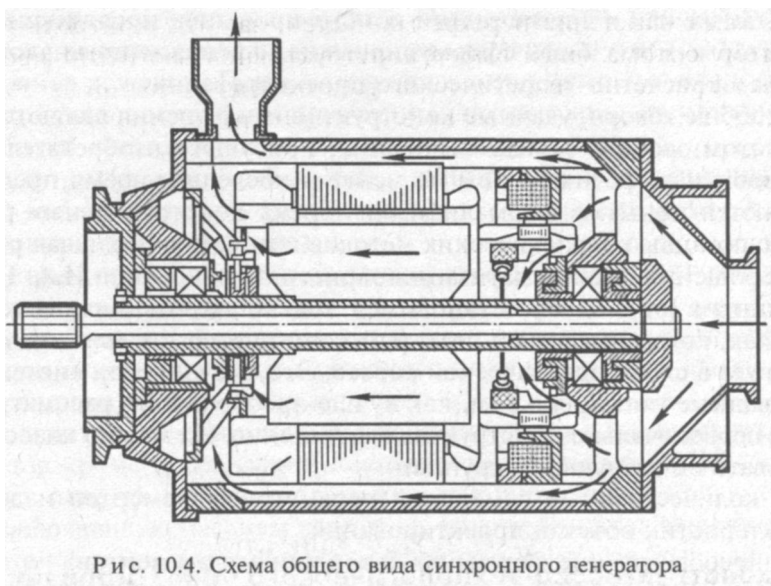
ций, как охлаждение перегретых частей, защита, контроль и т. д. Поэтому оптимальный выбор конструктивной части ЭМ производится в той же последовательности, что и для активной части (рис. 10.3, б). Такой выбор делается для каждого рассматриваемого варианта активной части.

Выбор основных проектных данных завершается всесторонним и глубоким анализом всех основных и вспомогательных физических процессов ЭМ с помощью более точных, но «медленных» расчетных моделей. Такой анализ проводится для каждого принципиального варианта в отдельности и дает возможность их сравнения и выбора наилучшего варианта. На этом расчетно-теоретическое проектирование заканчивается, а сам проект оформляется в виде так называемого расчетного формуляра ЭМ. Схема расчетно-теоретического проектирования в целом представлена рис. 10.3, в. Конкретные примеры проектирования авиационных ЭМ приведены ниже.

§ 10.2. Особенности конструкторско-технологического проектирования

Исходная информация, которая содержится в техническом задании и расчетном формуляре, полученном на предыдущих этапах проектирования, недостаточна для детального представления конструктивного исполнения ЭМ в целом. Несмотря на то что принципиальные решения по выбору активной и конструктивной частей приняты ранее, стадия конструкторско-технологического проектирования начинается с генерации общего вида ЭМ. В чертежах общего вида некоторые узлы и детали изображаются условно. Это те части конструкции, которые подлежат уточнению и окончательно не выбраны. Главное внимание в этих чертежах уделяется общей компоновке конструкции. Но с помощью общего вида можно предварительно определить и ряд важных интегральных показателей, например массу и габаритные размеры. Пример схематического изображения общего вида авиационного синхронного генератора дан на рис. 10.4.

На базе общего вида осуществляется *детализация конструкции*, декомпозиция ЭМ на основные узлы (ротор, статор, узел подшипника со смазкой и т. д.) и элементы (листы статора и ротора, вал, подшипник и т. п.). В процессе детализации надо по возможности больше использовать готовые или стандартные комплектующие изделия. Для серийных ЭМ даже задается такой показатель, как степень унификации, достигающий 80% и более. При традиционных способах проектирования на поиск готовых элементов в каталогах,



справочниках и архивах **проектной** документации уходило много времени, а в САПР это делается просто с помощью хорошо организованной базы проектных данных. Время, потраченное на поиск, окупается сокращением объема дальнейших проектных работ за счет уменьшения числа элементов, которые нужно вновь спроектировать. Перечень таких оригинальных элементов завершает процесс детализации конструкции.

Конструирование новых элементов ЭМ требует выбора геометрических форм и размеров, а также материала, из которого должна изготавливаться проектируемая деталь. Кроме того, необходимо рассчитать параметры (прочности, жесткости и др.), которые ограничены по условиям функционирования, провести анализ качества, технологичности и оформить необходимую проектную документацию. Специфичными для процесса конструирования элементов ЭМ являются задачи выбора геометрических форм, которые могут иметь различные формулировки. Например, выбор формы может быть сделан произвольно, без всяких ограничений. Или же форма задана частично и ее надо достроить при наличии или отсутствии ограничений. Наконец, могут быть заданы некоторые опорные точки или участки, по которым должна быть построена конфигурация элемента. Альтернативные варианты геометрических форм и материал проектируемого элемента обычно выбираются в режиме диалога между проектировщиком и ЭМ. Задачи же выбора геометрических разме-

ров, так же как и другие задачи конструирования, носят расчетный характер и могут быть сформулированы и решены по аналогии с задачами расчетно-теоретического проектирования.

Вообще говоря, удачные конструктивные решения являются результатом особого склада мышления, присущего изобретателям, а не строгим теоретикам. Тем не менее в последнее время предпринимаются попытки формализации поиска конструктивных решений с помощью эвристических методов и приемов. Большая работа по обобщению и систематизации эвристики выполнена И.А. Половинкиным [56]. Здесь остановимся только на тех эвристических методах, которые каждый опытный конструктор так или иначе использует в своей практической работе. Это, в сущности, систематизированные указания о том, как лучше преобразовать рассматриваемое первоначально конструктивное решение. Их можно классифицировать по следующим группам:

- количественные изменения параметров, элементов и других характеристик объекта проектирования;
- преобразование формы объектов или его элементов;
- преобразование в пространстве ориентации объекта или его элементов;
- преобразование во времени функционирования объекта или его элементов, а также управляющих воздействий;
- преобразование движения объекта или его элементов;
- преобразование материала объекта или его элементов;
- преобразование путем исключения отдельных элементов, функций **И Т. П.**;
- преобразование путем добавления отдельных элементов, функций и т. д.;
- преобразование путем замены отдельных элементов, функций и т. п.;
- дифференциация объекта и его элементов, функций, управляющих воздействий и т. п.;
- интеграция конструкции, функций, управлений и т. п.;
- использование профилактических мер защиты, предохранения, повышения надежности и т. п.;
- использование резервов конструкции и ее элементов;
- преобразования по аналогии объекта и его элементов;
- комбинирование конструктивных решений.

Конкретное содержание эвристических приемов углубляется и расширяется благодаря изучению конструктивного развития объектов проектирования, заимствования конструктивных решений из ведущих отраслей техники, анализа изобретательского фонда для

рассматриваемого класса изделий. Эвристические приемы применяются для преобразования аналогов-прототипов в искомое конструктивное решение. При конструировании с **ПОМОЩЬЮ** эвристических приемов последовательно выполняются такие этапы поиска и обработки информации:

- 1) формулировка требований к конструктивному решению;
- 2) выбор прототипа (прототипов), в наибольшей мере удовлетворяющих этим требованиям;
- 3) выявление недостатков прототипов и постановки задач преобразования прототипов;
- 4) применение эвристических приемов для преобразований прототипов в конструктивное решение, полностью удовлетворяющее требованиям технического задания.

Для автоматизации конструирования с помощью эвристических методов кроме организации диалоговых режимов в САПР необходимо в первую очередь создать информационно-поисковую систему, включающую массивы известных конструктивных решений, требований к ним и моделей оценки решений. Учитывая большой объем информационных массивов, особенно на нижних уровнях процесса конструирования (детализация объекта), информацию целесообразно формировать по модульному принципу в соответствии с иерархической структурой декомпозиции ЭМ (рис. 10.5). Эту же структуру в направлении сверху вниз целесообразно использовать для принятия конструкторских решений.

При конструировании сверху вниз, или от общего к частному, в первую очередь учитываются требования, предъявляемые к конструкции ЭМ извне — со стороны привода (для генераторов), меха-



Рис. 10.5. Схема декомпозиции ЭМП на узлы и элементы

низмов (для двигателей), систем регулирования, защиты и охлаждения, условий функционирования и т. п. В последующем, по мере детализации, на первый план выступают «внутренние» требования по компоновке узлов, взаимной стыковке элементов и т. п. Требования по унификации и стандартизации играют важную роль на всех этапах конструирования и используются для минимизации количества оригинальных элементов, подлежащих дальнейшему конструированию, минимизации числа комплектующих изделий и полуфабрикатов (марки и сортамент стали, марки проводов, крепежных изделий и т. п.), минимизации стоимости производства.

Сравнение вариантов общего вида и выбор конечного варианта в соответствии со схемой процесса производства осуществляются по совокупности критериев, характеризующих как качество, так и технологичность конструкции ЭМ. Задача сравнительного анализа вариантов полностью формализуема при наличии математических моделей для оценки критериев качества и технологичности. Эти модели целесообразно строить по типу медленных (точных) моделей, так как, с одной стороны, при эвристическом конструировании мало число рассматриваемых вариантов, а с другой — полностью детализованы конструкция и процесс производства ЭМ. Построению таких моделей следует уделять особое внимание при создании САПР ЭМ, потому что эти модели помогут глубже анализировать технико-экономические показатели на стадии проектирования и сократить объем экспериментального исследования и внедрения.

Таким образом, из рассмотренных задач и методов конструирования ЭМ в настоящее время на математической основе формализуемы процессы конструирования элементов ЭМ при заданных конструктивных формах и процессы сравнительного анализа и принятия решений. Для формализации этих процессов можно успешно использовать методы и алгоритмы расчетного проектирования ЭМ, включая оптимальное проектирование. Многие из этих процессов можно реализовать в САПР в пакетном режиме. Остальные процессы конструирования, в основном конструирование общего вида и выбор узлов и деталей конструкций, можно формализовать лишь на эвристической основе. Учитывая сложность этих задач, а также многообразие эвристических методов и приемов, эти задачи целесообразно решать в САПР в диалоговых режимах. Поэтому основные усилия при автоматизации конструкторского проектирования ЭМ направлены на организацию и обеспечение диалогового конструирования.

Конструкторские решения оказывают значительное влияние на последующие этапы технологического проектирования. Например, чем проще формы деталей и узлов, тем легче их изготовление и

сборка. Чем пластичнее применяемые материалы, тем проще их обработка и т. д. Соображения такого рода учитываются при выборе так называемых технологических параметров конструкций, который знаменует переход к технологическому проектированию. Требования к технологическим параметрам, с одной стороны, учитывают качество работы ЭМ, а с другой стороны — производственные возможности и технологичность конструкции. Поэтому выбор ЭТИХ параметров обычно осуществляется конструкторами и технологами совместно.

Технологические параметры (допуски на размеры, точность и чистота обработки поверхностей, марки материалов и т. п.) служат ограничениями при построении технологического процесса и выбора соответствующего оборудования. Например, средняя точность механической обработки на станках зависит от вида обработки (резание, сверление, шлифование, фрезерование и т. п.) и приводится в справочниках. Следовательно, заданная точность ограничивает возможности выбора тех или иных станков, причем с повышением точности себестоимость возрастает по гиперболическому закону. А если также учесть, что механической обработке подвергаются почти все детали и узлы ЭМ для получения требуемой геометрической конфигурации и обеспечения заданных технологических параметров, то нетрудно представить, к каким отрицательным последствиям приводит завышение требований к качеству механической обработки. Аналогичным образом можно показать, что во всех случаях неоправданно завышенные технологические параметры резко снижают экономическую эффективность производства ЭМ, а иногда делают его вообще невозможным.

Занижение уровней технологических параметров также недопустимо, как и завышение. Это приводит к резкому снижению надежности изделий и ухудшению рабочих характеристик. Так, большой эксцентриситет вала может привести к задеванию ротора о статор, грубая обработка замков — к ненадежному закреплению щитов на корпусе ЭМ и нарушению соосности статора и ротора. Все это приводит к искажениям формы кривой напряжения, снижению перегрузочной способности и другим нежелательным последствиям.

Отметим, что влияние технологических параметров взаимно коррелировано. Например, эксцентриситет и соосность зависят не только от технологических параметров вала, но и параметров индуктора, подшипникового узла, щита и корпуса. Таким образом, технологические параметры деталей и узлов ЭМ надо выбирать совместно (с учетом взаимных связей) на основе компромисса между показателями качества и технологичности изделий.

Задачу совместного выбора технологических параметров ЭМ в общем случае можно сформулировать как *многокритериальную задачу оптимизации*. Пренебрегая явлениями старения и влиянием окружающей среды, можно полагать технологические параметры не зависящими от времени. Это упрощает постановку задачи и процесс решения по аналогии с задачами и методами оптимального проектирования ЭМ, рассмотренными выше. Тогда основная трудность в оптимальном выборе технологических параметров ЭМ расчетным путем сводится к проблеме математического моделирования, т. е. установления вычислительных связей между показателями качества и технологичности ЭМ, с одной стороны, и технологическими параметрами — с другой. Эта проблема осложняется тем, что на этапе выбора технологических параметров технологические процессы производства ЭМ пока еще не уточнены и не детализированы.

Поэтому требуемые математические модели можно построить лишь на основе общих рассуждений или статистического анализа и обобщения накопленного опыта. Примеры количественных оценок показателей технологичности ЭМ общего характера даны в [57]. Пример моделирования показателя качества и оптимизации выбора технологических параметров ЭМ приводится ниже. Несмотря на указанные примеры, формализация выбора технологических параметров ЭМ находится в начальной стадии. На практике этот выбор осуществляется, как правило, на основе эвристики, интуиции и опыта.

Наиболее сложными задачами технологического проектирования ЭМ являются *задачи разработки технологического процесса*, а точнее — сложной системы технологических процессов, которые при последовательно-параллельных сочетаниях обеспечивают производство ЭМ. Наглядное представление о технологической сложности ЭМ дает схема производства, приведенная на рис. 10.6 для синхронных генераторов с бесконтактной системой возбуждения и принудительным воздушным охлаждением.

Для производства ЭМ используются все виды технологических процессов, применяемые в машиностроении, и новые виды, используемые только в электромашиностроении [57]. К числу технологических процессов, характерных для общего машиностроения, относятся различные виды литья,ковки, прессы, раскрой, резки и гибки листового металла, сварки, механической обработки, защитно-декоративных покрытий и т. п.

Специфичными для электромашиностроения технологическими процессами являются штамповка листов и сборка магнитных сер-

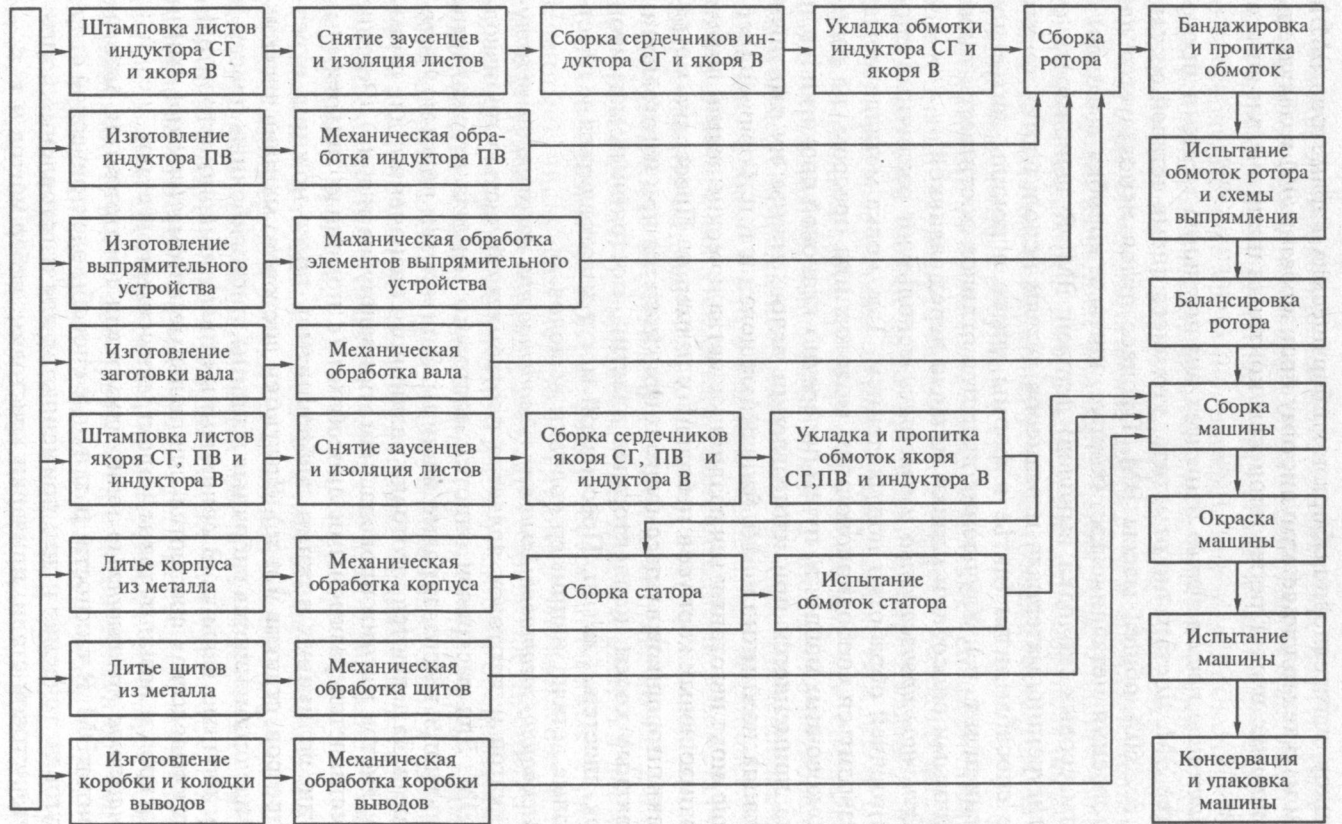


Рис. 10.6. Схема технологии производства синхронного генератора

дечников, изготовление обмоток и сборка узлов и конструкции ЭМ в целом. В технологическую систему производства ЭМ в обязательном порядке входят также процессы контроля практически на всех этапах.

Литейное производство занимает значительное место в производстве ЭМ. Достаточно отметить, что масса литых деталей составляет **35...60%** общей массы ЭМ. Процесс литья используется для изготовления металлических (корпус, щиты и коробка выводов) и пластмассовых (колодка выводов) деталей ЭМ. В зависимости от конфигурации, материала и размеров детали используются те или иные способы литья (литье в формы, литье в кокиль, литье под давлением и т. п.). Улучшение качества отливок достигается также различными способами плавки металла перед заливкой.

Кузнечное производство и прессовка используют различные способы горячей обработки под давлением. Так, ковка металла может производиться **свободно ковочным** молотом или прессом, на радиально-ковочных машинах, путем поперечно-клановой прокатки и т. п. Ковка применяется при изготовлении валов, точнее их заготовок (поковок), нажимных шайб, бандажных колец и т. п. Горячей прессовкой могут изготавливаться различные металлические детали вплоть до алюминиевых корпусов небольших размеров. Прессовка металлических порошков в пресс-формах применяется при изготовлении контактных колец, коллекторных пластин, постоянных магнитов, втулок, шестерен и т. п. Прессовкой могут изготавливаться и пластмассовые детали, например колодки выводов.

Раскройно-заготовительное производство **ДЛЯ** изготовления полуфабрикатов и заготовок является неотъемлемой частью производства ЭМ. Для раскроя и очистки листового металла от ржавчины используются многовалковые машины. Затем путем резки из листового металла делаются заготовки различного назначения (для штамповки листов магнитопровода, намотки корпусов и т. п.). Резание осуществляется различными способами (с помощью гильотинных ножниц, роликовых ножниц, виброножниц, пресс-ножниц, отрезных прессов, станков и т. п.). Для гибки листового металла в холодном виде применяются гибочные машины, листогибочные прессы и листогибочные вальцы. В современных электромашиностроительных производствах создаются специальные автоматические линии для раскроя и резки рулонной электротехнической стали.

Сварочное производство необходимо для изготовления многих элементов ЭМ. В частности, различные способы электрической сварки (дуговая, точечная и др.) применяются для изготовления корпусов из листовой стали, приварки крестовин, ребер щитов и т. п.

Наиболее широко применяется *механическое производство*. Механической обработке подвергается подавляющее большинство деталей и узлов ЭМ. Различные виды механической обработки (резание, сверление, фрезерование, шлифование и др.) выполняются на универсальных или специализированных станках. К универсальным можно отнести станки с ЧПУ и многоцелевые обрабатывающие центры, которые стоят значительно дороже, чем специализированные станки, предназначенные для выполнения только одного вида механической обработки. Выбор того или иного оборудования осуществляется с учетом конкретных условий (объема выпускаемой продукции, выделенных ресурсов и т. п.).

Штамповка и изготовление обмоток являются специфичными для электромашиностроения видами производства. Холодная штамповка применяется взамен литья иликовки для изготовления листов статора и ротора, крышек подшипников, болтов, гаек и т. п. Штамповка выполняется на универсальных прессах или специальных пресс-автоматах. Используемые штампы достаточно разнообразны (вырубные, совмещенные, многопозиционные последовательного действия, пазовые и т. п.). Важной задачей при штамповке листов статора и ротора является минимизация отходов листовой стали, т. е. коэффициента потерь.

Трудоемкость изготовления обмоток составляет 30...50% общей трудоемкости производства ЭМ. Причем обмотки достаточно разнообразны по конфигурации (сосредоточенные и распределенные), числу фаз, материалу (медные, алюминиевые и т. п.), способу укладки (намотка, заливка) и обработки (пропитка лаками, компаундирование битумом и т. п.), способу соединения проводов (пайка, сварка, прессование) и др. В последние годы технология обмоточного производства механизмируется и автоматизируется. Полностью механизирована укладка и изготовление обмоток из круглого провода, частично механизирована — из прямоугольного провода.

Сложным и трудоемким является также *процесс сборки ЭМ* и его узлов. Например, для сборки сердечников **магнитопровода** в листах надо предусмотреть выштамповки для подбора и крепления листов, подготовить листы к сборке (снятие заусенцев, отжиг и т. п.), изолировать листы и только после этого непосредственно приступить к сборке. Для сборки ЭМ используются в основном три вида соединений: 1) натяг (под прессом, при нагревании и со специальными приспособлениями); 2) резьба; 3) болт и гайка.

В зависимости от конкретной специфики производства применяются следующие способы сборки: при полной взаимозаменяе-

мости деталей и узлов, при групповом подборе деталей, при индивидуальном подборе, с применением компенсаторов и с индивидуальной пригонкой по месту. Крупные ЭМ собираются стационарно (на одном месте), средние и малые — в движении (на конвейере).

После сборки наносятся *защитно-декоративные* покрытия. Выбор покрытия, технология грунтовки и покраски (распыление, окунание, облив и т. п.) определяются типовыми руководящими материалами, используемыми в машиностроительных отраслях.

Завершающим этапом производства ЭМ являются *испытания*, которые классифицируются следующим образом:

- 1) приемочные (для опытных образцов ЭМ);
- 2) приемо-сдаточные (для каждого образца);
- 3) периодические (для случайно отобранных образцов);
- 4) типовые (при изменениях в конструкции или технологии производства).

Основными методами испытаний являются измерение сопротивлений обмоток и прочности изоляции, разгон ротора до критической скорости и проверка установочно-присоединительных размеров. Надо отметить, что качество продукции контролируется не только на завершающих испытаниях, но и на всех промежуточных этапах производства, начиная с контроля материалов и комплектующих изделий.

§ 10.3. Анализ и выбор технологических допусков

Технологические допуски, определяющие предельно допустимые отклонения реальных конструктивных размеров от расчетных, являются главными технологическими параметрами, которые на компромиссной основе согласуют проектные данные с производственными условиями. Как известно, расчетные данные ЭМ могут существенно отличаться от их действительных зафиксированных значений. По экспериментальным данным поле технологического разброса (расхождения) некоторых параметров и характеристик ЭМ составляет **20...30%** относительно расчетных данных. Особенно большой разброс наблюдается у малых и микромашин (до 50% и более). В то же время следует отметить, что не все отклонения конструктивных размеров одинаково влияют на технологичность производства и качество функционирования ЭМ. Заметное влияние обычно оказывают погрешности меньшей части конструктивных размеров. Поэтому технологические допуски на

переменной Δz_n при фиксированных значениях всех остальных переменных. Таким образом,

$$\Delta H_j = \sum_{n=1}^p \Delta H_{jn}, \quad (10.1)$$

где суммирование производится отдельно для положительных и отдельно для отрицательных значений ΔH_{jn} .

Путем сравнения положительных и отрицательных значений ΔH_j отбирается наихудший случай. Знаки ΔH_{jn} устанавливаются с учетом знаков частных производных $\partial H_j / \partial z_n$ и знаков Δz_n . Величины ΔH_{jn} вычисляются для максимальных значений Δz_n , определяемых заданными полями технологических допусков.

Метод наихудшего случая широко применяется в конструкторских расчетах размерных цепей, несмотря на ряд существенных недостатков, так как кроме сильных допущений о линейности и дифференцируемости функций H_j вероятность появления наихудшего случая в реальном образце чрезвычайно мала. Например, для наиболее часто встречающихся на практике нормальных законов распределения технологического разброса вероятность появления в процессе производства предельного значения допуска по одной переменной составляет 0,00135. Вероятность одновременного появления предельных значений допусков для двух переменных еще меньше ($1,82 \cdot 10^{-6}$) и резко падает с дальнейшим ростом числа переменных. Поэтому результаты расчета по методу наихудшего случая в большинстве случаев являются завышенными по сравнению с реальным технологическим разбросом (иногда даже в 5 раз).

Вероятностный метод использует среднеквадратичные отклонения (дисперсии) типа

$$\sigma^2(H_j) = \sum_{n=1}^p \left(\frac{\partial H_j}{\partial z_n} \right)^2 \sigma^2(z_n), \quad (10.2)$$

где $\sigma(H_j)$, $\sigma(z_n)$ — среднеквадратичные отклонения.

Квадратичное сложение в (10.2) допустимо при симметричном расположении полей допусков z_n и в диапазоне разброса H_j относительно соответствующих значений, а также для нормальных законов распределения случайных значений z_n и H_j . В случае систематической несимметричности допуска на z_n возникает систематическое смещение ΔH_{j0} , которое можно учесть соотношением

$$H_{j0} = \sum_{n=1}^p \frac{\partial H_j}{\partial z_n} \Delta z_{n0}, \quad (10.3)$$

где Δz_{n0} — систематическое смещение z_n .

Расчет по вероятностному методу сводится к определению среднего значения (математического ожидания) функции H_j и абсолютной или относительной стандартной погрешности, если заданы математическое ожидание z_n и среднеквадратичное отклонение $\sigma(z_n)$. Однако на практике обычно известны технологические допуски на z_n вместо числовых характеристик распределения их погрешностей. Поэтому в этих случаях пользуются соотношением

$$\Delta \dot{H}_j = \sqrt{\sum_{n=1}^p k_{zn}^2 c_{jn}^2 (\Delta \dot{z}_n)^2}, \quad (10.4)$$

где $\Delta \dot{H}_j, \Delta \dot{z}_n$ — половины диапазонов отклонений в относительных единицах; k_{zn} — коэффициенты относительного рассеивания, учитывающие отклонение фактического закона распределения от нормального (для нормального закона $k_{zn} = 1$); c_{jn} — коэффициенты влияния переменных на величину функции.

В инженерной практике коэффициенты c_{jn} определяются как частные производные $\partial H_j / \partial z_n$. Их аналитический расчет требует явновыраженности и дифференцируемой функций H_j , что не всегда возможно. Численные методы расчета этих коэффициентов достаточно трудоемки и применимы при ограниченном числе переменных. Поэтому обычно для вычисления c_{jn} пользуются приближенными разностными уравнениями типа

$$c_{jn} \approx \Delta H_j / (\Delta z_n). \quad (10.5)$$

Таким образом, основными ограничениями для применения вероятностных методов являются допущения о симметричности полей допусков и нормальном законе распределения технологических погрешностей. При выполнении этих условий точность расчетов вероятностным методом по сравнению с экспериментальными данными удовлетворительна.

Сущность **метода статистических испытаний** состоит в многократном разыгрывании случайных значений переменных z_n в пределах полей допусков и в соответствии с заданными законами вероятностного распределения. Для каждой совокупности значений z_n вычисляется H_j , что завершает единичное испытание. После выполнения заданного числа испытаний производится статистическая обработка полученных значений H_j , которая устанавливает количественные и качественные характеристики технологического разброса H_j .

Реализация метода статистических испытаний не требует допущений о линейности и дифференцируемости функций H_j и возможна для произвольных законов распределения z_n в пределах полей

допусков. В результате расчетов по этому методу можно получить не только средние значения и диапазоны технологического разброса H_p , но и законы распределения случайных значений H_j внутри полученных границ. Таким образом, метод статистических испытаний обладает наибольшей общностью по сравнению с рассмотренными выше.

Сравнительный анализ методов показывает, что при расчетах на ЭВМ целесообразно использовать либо метод статистических испытаний, либо вероятностный метод. Для метода статистических испытаний дополнительно к программам вычислений H_j необходимо иметь программы выработки псевдослучайных чисел, которые входят в стандартное математическое обеспечение многих ЭВМ. В случае вероятностного метода достаточно ограничиться программами вычисления H_p , но зато нужна априорная информация о выполнении исходных предпосылок метода.

Указанные методы используются на практике не только для оценки технологического разброса параметров и характеристик ЭМ при заданных допусках на конструктивные данные, но и для выбора допусков при заданных ограничениях на разброс параметров и характеристик. Эта обратная задача решается с помощью многократных решений прямой задачи при вариациях допусков на конструктивные данные. Определяя технологический разброс для различных вариантов допусков, можно установить их взаимное влияние (корреляцию) и соответственно выбрать допуски.

Пример. Более детально практические аспекты применения методов анализа характеристик погрешностей рассмотрим на примере бесконтактных высокочастотных сельсинов с кольцевым вращающимся трансформатором.

Обработка данных испытаний более 400 бесконтактных сельсинов типа БС-1404П позволяет построить графики распределения технологического разброса параметров (рис. 10.7, *а*). На этом же рисунке приведены соответствующие кривые нормального закона распределения, полученные расчетным путем. Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных графиков дополнительно проверено расчетами критерия согласия Пирсона. Эти результаты показывают, что для рассматриваемого типа электрических машин технологические погрешности происходят по нормальному закону распределения. Кроме того, технологические допуски являются симметричными и центры группирования погрешностей совпадают с номинальными значениями параметров. Все

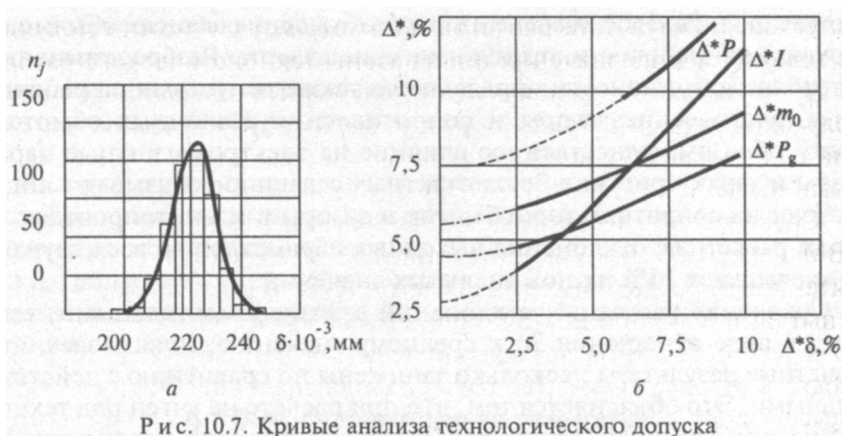


Рис. 10.7. Кривые анализа технологического допуска

это позволяет в данном случае применить **вероятностный** метод анализа погрешностей.

Для оценки влияния технологических допусков на рассеивание основных показателей выделены две группы параметров сельсинов. К *первой группе (входные параметры)* отнесено 17 конструктивных данных, определяющих геометрические размеры активной части сельсина. Ко *второй группе (выходные параметры)* отнесены такие интегральные показатели, как потребляемая мощность, ток возбуждения, удельный синхронизирующий момент и удельная мощность в поперечной оси.

Влияние допусков входных параметров на выходные определяется проектными расчетами сельсинов на ЭВМ. Сначала для номинальных значений входных параметров определяются номинальные значения выходных. Затем одному из входных параметров придается предельное значение допуска и расчет повторяется при номинальных значениях всех остальных параметров. В результате расчета устанавливаются отклонения всех выходных параметров от номинальных значений. Таким образом, изменяя поочередно входные параметры на значение технологического допуска, можно оценить влияние каждого из них на разброс значений выходных параметров.

Анализ полученных таким путем расчетных данных для сельсинов типа БСПИ-32-40 и БСПИ-50-40 показывает, что из рассмотренных 17 входных параметров лишь небольшая часть оказывает существенное влияние на разброс значений выходных параметров. Так, на разброс удельной синхронизирующей мощности и удельной мощности в поперечной оси влияют в основном допуски на сопротивление фазы обмотки синхронизации и длины рабочих воздуш-

ных зазоров. Разброс значений тока возбуждения зависит обычно от допусков на рабочие и технологические зазоры. Разброс значений потребляемой мощности определяется также допусками на рабочие и технологические зазоры и сопротивления различных обмоток. Таким образом, существенное влияние на электромагнитные параметры и характеристики бесконтактных сельсинов оказывают лишь допуски на сопротивления обмоток и зазоры в магнитопроводах. В целом расчетные отклонения выходных параметров во всех случаях не превышают 15% их номинальных значений.

Сравнение расчетных отклонений с экспериментальными, взятыми в виде **ОТНОШЕНИЯ** За к среднему значению, показывает, что расчетные результаты несколько занижены по сравнению с действительными. Это объясняется тем, что при расчете не учтен ряд технологических факторов (отжиг железа магнитопровода, режимы механической обработки и др.), а также погрешности расчета и измерений. Дополнительные расчеты и экспериментальные исследования показывают, что погрешность использованных методик расчета не превышает 14%, а средств измерения — 5%, что укладывается в рамки технологического разброса и является вполне удовлетворительным в микроэлектромашиностроении. Кроме того, расхождения расчетного и экспериментального разброса являются в большинстве случаев систематическими и их можно учесть путем введения постоянных составляющих.

В процессе проектирования нередко задают предельные отклонения выходных параметров и выбирают такие технологические допуски на входные параметры, чтобы удовлетворить заданным условиям. В этих случаях используют информацию, полученную при оценке влияния допусков входных параметров на разброс выходных. Выше установлено, что существенными являются допуски на сопротивления и воздушные зазоры. Однако допуски на сопротивления в основном определяются **заводами—изготовителями** проводов и они не управляемы электромашиностроительным заводом. Поэтому основное внимание следует уделить выбору допусков на воздушные зазоры.

На рис. 10.7, б приведены кривые зависимости относительного разброса выходных параметров от допусков на входные. Кривые показывают, что допуски следует выбирать одновременно, чтобы получить максимальное ограничение разброса выходных параметров. Во всех случаях выбор допусков менее 2,5% нецелесообразен из-за уменьшения их влияния. Кроме того, при этом обеспечивается первый класс точности для рассматриваемых сельсинов. Второй класс точности обеспечивается при выборе допусков в пределах 10%.

конструктивные размеры делятся на существенные и несущественные. На стадии проектирования основное внимание уделяется выбору существенных допусков, которые замыкают размерные цепи и по-разному влияют на качество работы и технико-экономические показатели ЭМ. Чем меньше эти допуски, тем лучше качество и тем хуже производственные показатели. Это означает, что выбор существенных допусков представляет собой оптимизационную задачу.

Расхождение между расчетными и экспериментальными данными объясняется следующим. Кроме методической погрешности расчетные алгоритмы электрических машин обычно предполагают, что конструктивные размеры и характеристики применяемых материалов строго детерминированы. В действительности эти данные являются случайными величинами и имеют соответствующий разброс значений, определяемый их технологическими допусками. Разброс конструктивных данных, в свою очередь, приводит к разбросу других параметров, характеристик и показателей машины. Таким образом, большинство проектных данных, несмотря на детерминированный характер расчетных алгоритмов, в действительности относятся к категории случайных величин.

Учет разброса параметров и характеристик для выбора технологических допусков на стадии проектирования является одним из эффективных способов повышения качества ЭМ. Однако конструирование расчетных алгоритмов с вероятностными значениями проектных данных приведет к недопустимому переусложнению инженерных методик расчета и необходимости статистической обработки громадного объема информации. Поэтому влияние технологических допусков обычно анализируется после определения расчетных проектных данных. При этом решается следующая задача анализа: исследовать отклонения расчетных проектных данных в зависимости от заданных законов распределения случайных значений исходных конструктивных данных и параметров. Отклонения расчетных данных исследуются с помощью тех же детерминированных расчетных алгоритмов, которые применяются без учета технологического разброса конструктивных данных.

На стадии проектирования эта задача решается различными математическими методами — наихудшего случая, вероятностными и методом статистических испытаний.

Метод наихудшего случая предполагает, что наибольшее отклонение значений функции $H_j(z_1, \dots, z_p)$ при изменениях переменных определяется сложением всех частных отклонений. Под частичным отклонением понимается ΔH_{jn} , обусловленное отклонением

Таким образом, явно ощущается большое отличие в технологии сельсинов первого и второго классов точности, поэтому в общем случае задача выбора допусков должна ставиться шире и учитывать также экономические факторы, связанные с изменением технологии.

Рассмотренные примеры исследования технологического разброса параметров бесконтактных сельсинов позволяют установить единый статистико-вероятностный подход к анализу и выбору технологических допусков, который использует действующие детерминированные расчетные алгоритмы, не требуя их существенных преобразований.

§ 10.4. Оптимизация проектов авиационных синхронных генераторов

Класс проектируемых авиационных синхронных генераторов (АСГ) ограничен генераторами, предназначенными для питания бортовых ЭЭС и представляющими собой электромашинные агрегаты, состоящие из трех ЭМ, расположенных на одном валу, и двух полупроводниковых выпрямительных устройств, один из которых вращается вместе с ротором, а другой находится на неподвижном статоре. Одна ЭМ играет роль основного трехфазного генератора переменного тока явнополюсной конструкции. Вторая ЭМ является возбудителем в виде обращенного явнополюсного генератора, который питает обмотку возбуждения основного генератора через вращающийся выпрямитель на роторе. Третья ЭМ служит подвозбудителем и имеет вид генератора нормального исполнения с магнитными полюсами, который питает обмотку возбуждения возбудителя через неподвижный выпрямитель на статоре. Такая бесконтактная схема электромагнитной связи трех машин в единой конструкции обеспечивает высокую надежность и дает возможность создания общей системы принудительного охлаждения для всего агрегата.

Опыт разработок АСГ показал, что рассмотренная конструктивная схема была и остается наилучшей в течение последних десятилетий для ЭЭС переменного тока повышенной частоты. Однако эти конструкции требуют максимального использования активных и изоляционных материалов, используемых для **всех** трех ЭМ. Например, сталь электротехническая кобальтовая марки 27КХ, медь прямоугольного сечения типа МГМ, эмалевая нагревостойкая изоляция и др. Эти материалы позволяют повысить величину магнитной индукции до **2,1** Тл и температуры обмоток до **300 °С**. Все эти осо-

бенности конструкции и используемых в АСГ материалов входят в состав исходных данных проекта. Типовое задание на проект АСГ включает также номинальные данные генератора, например: фазное напряжение $U_{\phi} = 120$ В, частоту колебаний $f = 400$ Гц, частоту вращения $n = 6000$ или 8000 об/мин, полную мощность $S = 60$ кВ А, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$, длительность режимов перегрузки по току (полуторакратная — 5 мин, двукратная — 1 мин), требования к схемам обмоток (трехфазная с соединением фаз звездой и выведенным нулем), требования к тепловым режимам и системе охлаждения (максимальная температура обмоток — 300°C , максимальный расход охлаждающего воздуха — $0,2$ кг/с), требования отраслевых и государственных стандартов и некоторые общие требования, например устойчивость во всех режимах работы.

С точки зрения тепловых потерь режим полуторакратной нагрузки является более тяжелым, чем меньший по длительности режим двукратной нагрузки. Поэтому расчет перегрева обмоток достаточно вести лишь для режима максимальных тепловых нагрузок (полуторакратная нагрузка). А вот максимальные магнитные нагрузки, соответствующие предельному насыщению магнитопровода, имеют место в режиме двукратной нагрузки генератора. Поэтому выбор размеров магнитопровода производится исходя именно из этого режима. В режиме короткого замыкания магнитодвижущая сила возбуждения чаще всего оказывается наибольшей, так как время короткого замыкания обычно больше, чем быстрдействие регуляторов напряжения. Из-за этого ток и напряжение возбуждения принимают максимальные значения, опасные для выпрямителей. Однако не исключена также вероятность появления максимальной МДС возбуждения в режиме двукратной нагрузки генератора. Поэтому диктуемые выпрямителями ограничения на предельно допустимые напряжения и токи возбуждения следует оценивать в двух указанных опасных режимах.

Требования к схемам обмоток АСГ могут включать число и соединение фаз (например, трехфазное с соединением фаз звездой и выведенным нулем), схемы соединения и укладки проводов в пазах статора (например, двухслойная, петлевая с жесткими секциями, симметричная с укорочением шага на $1/3$ при числе пазов на полюс и фазу, кратном $0,5$ и дробным при числе пазов меньше 4), форму паза якоря и др. Требования к конфигурации воздушного зазора включают коэффициент полюсной дуги $\alpha = 0,6...0,75$ и равномерность зазора.

Кроме отмеченных требований, необходимо также учитывать ограничения, связанные с режимами несимметричной нагрузки и

переменной скорости вращения. Наконец, могут быть специальные требования к переходным режимам типа подключения и отключения нагрузки, восстановления напряжения после короткого замыкания и т. д. Анализ всех режимов и требований к АСГ позволил выделить следующие существенные ограничения, которые в той или иной мере поддаются расчету и могут быть учтены на стадии расчетного проектирования, а именно:

- максимально допустимые температуры обмоток якоря и возбуждения в режиме полуторакратной нагрузки. Имеются в виду значения температур в конечный момент режима;
- ограничения на обмоточные данные якоря, связанные с условиями выполнения обмотки в виде звезды с выведенным нулем, укорочением шага на одну треть для подавления 3-й гармоники в однофазном режиме и т. д.;
- максимальное и минимальное предельные значения коэффициента полюсного перекрытия при равномерном рабочем зазоре, что дает возможность выбора обмоточных данных и скоса пазов, а также содействует условиям обеспечения синусоидальности формы кривой напряжения;
- минимальная перегрузочная способность или синхронизирующая мощность генератора, учитываемые при расчете статических параметров и характеристик;
- минимальный установившийся ток короткого замыкания, который обычно принимается равным тройной величине номинального тока;
- предельные значения напряжения и тока возбуждения, определяемые в зависимости от типа выпрямителей;
- максимально допустимые значения индукции в критических сечениях полюсного наконечника в режиме двукратной нагрузки, определяемые в зависимости от марки стали;
- максимально допустимые механические напряжения в критических сечениях ротора при максимальной частоте вращения.

Все указанные условия и требования в обязательном порядке учитываются в техническом задании на проект АСГ.

Варьируемые конструктивные параметры, значения которых должны быть найдены в процессе оптимизации, делятся на две группы: дискретные, например обмоточные данные, и непрерывные, например геометрические размеры. Оптимизация дискретных параметров возможна лишь с помощью методов перебора. Непрерывные параметры, наоборот, могут быть оптимизированы посредством поисковых методов. Учитывая это обстоятельство, выбор конструктивных параметров следует осуществлять в два этапа. На первом этапе про-

изводится перебор дискретных параметров, а на втором этапе — поиск оптимальных значений непрерывных параметров. Применительно к АСГ это делается так. Составляются многомерные таблицы вариантов дискретных обмоточных данных, включающие, например, для трехфазной обмотки число полюсов, число пазов якоря на полюс и фазу, число проводников в пазу якоря и число витков в фазе. Далее для каждой совокупности указанных данных (варианта таблицы) осуществляется поиск оптимальной совокупности непрерывных геометрических размеров или физических величин.

Критерий оптимальности проекта АСГ выбран, исходя из генеральной линии в разработках авиационного оборудования, направленной на уменьшение показателей массы и габаритов. Обычно рассматривается показатель полетной или стартовой массы, который больше, чем реальная масса АСГ. Он в виде приращений массы учитывает тот факт, что для функционирования и охлаждения АСГ требуются дополнительный расход топлива и дополнительная мощность маршевого двигателя. Но в связи с тем, что система охлаждения задана (известна), а основные характеристики авиадвигателей, топливных баков и планера тоже известны (ориентировочно они выбираются до разработки АСГ), то в приближении можно за критерий оптимальности принять собственную массу генератора (сумма масс его активной и конструктивной части). В качестве **конструктивных** материалов АСГ широко применяются легкие алюминиевые и магниевые сплавы, что уменьшает долю конструктивной массы M по сравнению с массой ЭМ общего назначения M_a и позволяет ее учитывать приближенно в виде произведения

$$M = kM_a, \quad (10.6)$$

где k — относительно стабильный конструктивный коэффициент.

С учетом изложенного и совместного анализа условий и требований технического задания задачу оптимизации проекта АСГ можно сформулировать так: минимизировать функцию (10.6) при выполнении следующих ограничений на расчетные величины:

$$t_{я,1,5} \leq t_{я \max}; \quad t_{в,1,5} \leq t_{в \max}; \quad (10.7)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}; \quad (10.8)$$

$$k_{п,2} \geq k_{п \min}; \quad (10.9)$$

$$U_{в} \leq U_{в \max}; \quad I_{в} \leq I_{в \max}; \quad (10.10)$$

$$B_{кр,2} \leq B_{кр, \max}; \quad (10.11)$$

$$\sigma \leq \sigma_{\max}; \quad (10.12)$$

где $t_{я1,5}$, $t_{в1,5}$ — температуры обмоток якоря и возбуждения в режиме полуторакратной нагрузки по току; $k_{п2}$ — коэффициент перегрузочной способности в режиме двукратной нагрузки по току; U_B , I_B — напряжение и ток возбуждения; $B_{кр.2}$ — максимальная индукция в режиме двукратной нагрузки по току; a — коэффициент полюсной дуги; σ — механическое напряжение в критических сечениях магнитопровода. Ограничение (10.10) обусловлено параметрами выпрямителя в схеме питания возбуждения. Ограничения (10.11) и (10.12) преобразуются в равенства, если необходимо максимальное использование активных материалов.

В результате решения поставленной задачи оптимизации определяются искомые варьируемые конструктивные размеры активной части АСГ. Вычислительный процесс поиска реализуется в соответствии со схемой на рис. 10.8. Анализ полученных на многих примерах результатов оптимизации позволяет выявить ранее не известные отличительные особенности оптимальных проектов АСГ. Так, например, установлено, что наибольшее влияние на массу генератора из всех варьируемых обмоточных данных оказывает число витков в фазе. Его отклонение от оптимального значения более чем на 15% резко сказывается на увеличении массы и изменении оптимальных геометрических соотношений активной части. При фикс-

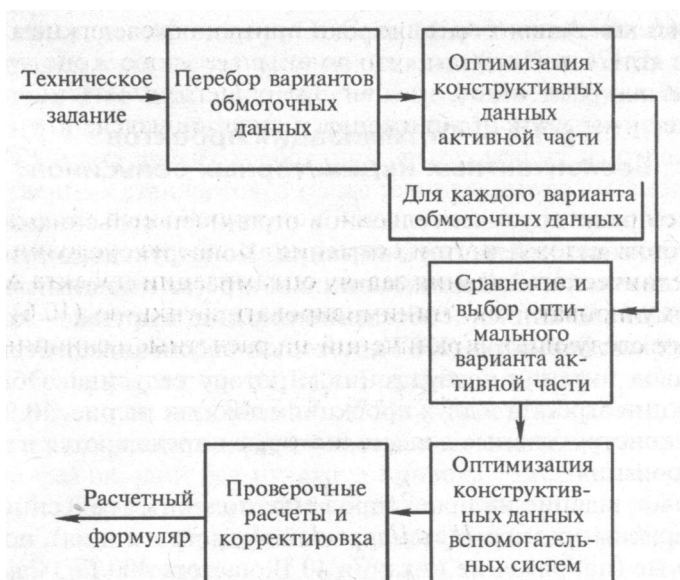


Рис. 10.8. Вычислительная схема оптимизации проекта АСГ

сированных значениях числа витков в фазе лучшими являются минимальные значения числа пазов на полюс и фазу. К особенностям геометрии активной части можно отнести увеличение традиционного отношения диаметра к длине и минимум коэффициента полюсной дуги вопреки традиционным представлениям.

Остальные конструктивные размеры, определяющие системы принудительного охлаждения, смазки и конструкцию АСГ в целом, выбираются исходя из того, что вся активная часть уже известна, т. е. после оптимизации ее расчетных параметров. Конечно, при этом допускается повторная корректировка проектных данных активной части путем многоэтапных итераций, как указано на рис. 10.3. Конечные оптимальные проекты АСГ не вызывают никаких дополнительных принципиальных затруднений для практической реализации. Более того, они, как правило, обеспечивают выигрыш в массе на 10...15% по сравнению с проектами, выполненными традиционным способом (вручную). Кроме того, оптимальные проекты, выполненные с помощью САПР, практически не нуждаются в экспериментальных доработках и подтверждают свое высокое качество в производстве и опытных испытаниях. Учитывая эти обстоятельства, оптимальные расчетные проекты АСГ с принудительным воздушным и масляным охлаждением были взяты за основу при создании и серийном производстве генераторов мощностью 60 кВ · А для бортовых ЭЭС широкофюзеляжных самолетов типа Ил-76 и Ил-86.

§ 10.5. Оптимизация проектов бесконтактных индикаторных сельсинов

Класс проектируемых сельсинов ограничен сельсинами-приемниками повышенной частоты питания. Конструктивно эти сельсины представляют собой двухмашинный агрегат с общими корпусом и валом. Одна машина — собственно сельсин, а другая — кольцевой входной трансформатор (КВТ), который обеспечивает бесконтактный подвод питания возбуждения к ротору сельсина. Общий вид конструкции агрегата в двух проекциях показан на рис. 10.9. Там же указаны конструктивные данные, которые определяются в процессе проектирования.

Типовое задание на проектирование подобных сельсинов включает габаритные размеры (стандартный диаметр и длина); номинальные данные (напряжение питания 40 В, частота 400 Гц, максимальное напряжение обмотки синхронизации (40 ± 1) В, допустимая потребляемая активная мощность в зависимости от габаритного ди-

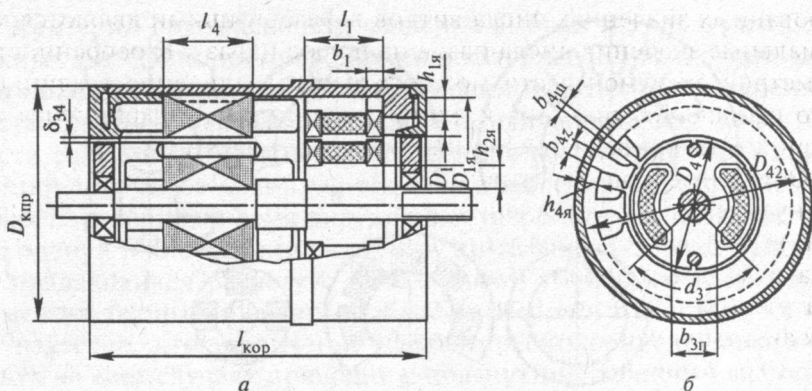


Рис. 10.9. Конструктивная схема бесконтактного сельсина с входным кольцевым трансформатором:

a — продольный разрез; *б* — поперечный; D_4 — внутренний диаметр статора сельсина; $b_{4\text{к}}$ — ширина зубцов статора сельсина; $h_{4\text{я}}$ — высота яра статора сельсина; l_4 — длина пакета статора сельсина; δ_{34} — длина рабочего зазора сельсина; $b_{3\text{н}}$ — ширина полюсного сердечника сельсина; $h_{1\text{я}}$ — высота яра статора трансформатора; D_1 — внутренний диаметр статора трансформатора; b_1 — толщина стенки окна статора трансформатора; $h_{2\text{я}}$ — высота яра ротора трансформатора; (индексы 1, 2, 3, 4 означают принадлежность соответственно статору и ротору КВТ, ротору и статору собственно сельсина)

аметра); время успокоения ротора (не более 3 с) и амплитуда колебаний стрелки в согласованном положении (не более $\pm 15'$ для сельсинов 1-го и 2-го классов точности и не более $\pm 30'$ для сельсинов 3-го и 4-го классов точности); среднюю рабочую температуру (не более 8°C) и ряд других требований, вытекающих из отраслевых и государственных стандартов, а также технических возможностей производства.

Экспериментальные исследования различных конструктивных вариантов показывают, что наилучшей является **явнополюсная** конструкция с обмоткой синхронизации на статоре. Бесконтактность питания обмотки ротора достигается с помощью кольцевого вращающегося трансформатора (КВТ). Внутренние диаметры сельсина, КВТ и корпуса под подшипник равны («сквозная» конструкция).

Обмотка синхронизации трехфазная, петлевая, двухслойная, соединение фаз звездой без нулевого провода. Число пазов нечетное (обычно 15). Форма пазов статора и ротора показана на рис. 10.10, *а*, *б*, *в*. Скос пазов статора и ротора встречный. Особенности конструкции КВТ показаны на рис. 10.10, *г*, *д*, *е*.

Магнитные материалы различны в зависимости от степени насыщения и механической прочности. Для ротора КВТ применяется



Рис. 10.10. Геометрические формы магнитопроводов бесконтактного сельсина

сплав марки 494Ф2 толщиной 0,35 мм; для статора — электротехническая сталь Э-13 толщиной 0,35 мм. Статор и ротор сельсина, а также боковые тороиды КВТ выполняются из пермаллоя 50Н толщиной 0,35 мм. Обмоточный провод сельсина и КВТ круглый, марки ПЭТВ с фторопластовой изоляцией.

С учетом требований типового задания и полученных экспериментально результатов сформирован массив исходных данных, который включает также требования технологического характера [1].

Анализ исходных данных выделяет следующие основные ограничения на расчетные величины:

$$P \leq P_{\max}; \quad (10.13)$$

$$\delta \geq \delta_{\min}; \quad (10.14)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}; \quad (10.15)$$

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max}; \quad (10.16)$$

$$\pi \leq \tau_{\max}; \quad (10.17)$$

$$D_c = D_\tau = D_k; \quad (10.18)$$

$$D_{c,н} = D_{т,н}; \quad (10.19)$$

где P — активная мощность, потребляемая из сети; δ — воздушный зазор; α — коэффициент полюсной дуги; d — диаметр провода; τ — время согласования; D_c, D_τ, D_k — внутренние диаметры статора сельсина, КВТ и корпуса под подшипник; $D_{c,н}, D_{т,н}$ — наружные диаметры статора сельсина и КВТ.

Критерий оптимальности сельсина выбран исходя из наиболее важных для функционирования индикаторных сельсино-приемников показателей погрешности слежения и времени успокоения в дистанционной передаче. Эти показатели определяют класс точности сельсинов. Обычно для сельсинов рассматриваемой конструкции требуемое время успокоения обеспечивается при необходимости внешними демпфирующими устройствами. Количественная оценка точности слежения затруднительна из-за ряда факторов, не поддающихся расчету с необходимой точностью (реактивные моменты, технологический разброс размеров и т. п.). В то же время известно, что увеличение удельного синхронизирующего момента во всех случаях приводит к повышению точности слежения. Поэтому за критерий оптимальности принят статический удельный синхронизирующий момент M_0 при работе от однотипного датчика.

Таким образом, задача оптимизации проекта рассматриваемых сельсинов требует максимизации удельного синхронизирующего момента при выполнении условий (10.13)—(10.19) и других ограничений, указанных в техническом задании. Параметрами оптимизации являются варьируемые конструктивные данные сельсина. Расчетная модель сельсина построена по аналогии с расчетами АСГ [1]. Сначала оптимизируются данные сельсина, а потом — КВТ.

Анализ и обобщение результатов оптимизации для различных значений габаритных размеров и потребляемой мощности позволяют получить ряд рекомендаций по выбору конструктивных данных сельсинов рассматриваемого типа. Обмотки роторов собственно сельсинов и КВТ следует выполнять проводами с максимально возможными по технологическим условиям сечениями, что обеспечивает минимальное число витков и снижает потери мощности. Рабочие зазоры сельсина и КВТ целесообразно выполнять на минимально допустимых уровнях. При заданных габаритных диаметрах наблюдается стабильное оптимальное соотношение длин сельсина (92%) и КВТ (58%). Оптимальное соотношение мощностей сельсина и КВТ зависит от габаритного диаметра. С увеличением габаритного диаметра доля активной мощности, потребляемой собственно сельсином, увеличивается.

Полученные рекомендации по выбору переменных, связывающих расчеты сельсина и КВТ, позволяют в дальнейшем для проектирования ограничиться решением отдельных подзадач оптимизации конструктивных данных сельсина и КВТ. Кроме того, задаваясь оптимальными значениями переменных связей, удастся сократить количество параметров оптимизации в каждой из подзадач.

В целом оптимальные проекты не вызывают затруднений при их практической реализации и обеспечивают более высокие показатели при прочих равных условиях. Полученные результаты подтверждены изготовлением и исследованием опытных образцов ряда сельсинов, рассматриваемых в следующем параграфе.

§ 10.6. Оптимизация проектов асинхронных двигателей переменной частоты

Ранее неоднократно отмечалось, что функциональные элементы электросистем типа источников, преобразователей и потребителей электроэнергии, аппаратов защиты и управления и т. п., как правило, выбираются исходя из имеющейся номенклатуры изделий, серийно выпускаемой промышленностью. Однако в ряде случаев, особенно при разработке систем принципиально нового типа, отдельные традиционные элементы могут оказаться непригодными по тем или иным причинам. Тогда возникает необходимость в адаптации имеющихся элементов за счет изменения их параметров или, если это невозможно, разработке конструктивно новых элементов. Рассмотрим подобный случай на примере авиационных асинхронных двигателей, широко применяемых в системах переменного тока.

Наиболее широкое применение нашли системы переменного тока стабильной частоты, где стабилизация частоты осуществляется с помощью привода постоянных оборотов или статических преобразователей частоты. В силу ряда недостатков, присущих этим системам, исследования по созданию более эффективных систем переменного тока продолжаются. В частности, одной из перспективных считается система переменного тока переменной частоты, в которой исключен привод постоянных оборотов и генератор вращается непосредственно от редуктора авиационного двигателя. Достоинства системы переменной (нестабильной) частоты определяются простотой и высокой надежностью генерирующего узла, более высоким КПД и экономичностью. Тем не менее применение систем нестабильной частоты целесообразно там, где потребность в преобразовании переменной частоты в постоянную частоту невелика, т. е. суммарная мощность потребителей переменного тока, строго критичных к частоте питания, составляет сравнительно небольшую долю. Дальнейшее расширение области применения систем нестабильной частоты требует адаптации (приспособления) основных потребителей переменного тока таким образом, чтобы полностью сохранить нормальную работоспособность в условиях изменения частоты в широком диапазоне при сохранении постоянства напряжения питания.

К числу основных, наиболее мощных потребителей переменного тока относятся АД с короткозамкнутым ротором для топливных систем, которые в совокупности потребляют значительную долю генерируемой электроэнергии (около 30% для самолета типа Ил-86). Поэтому вопрос эффективности, работоспособности таких АД при изменении частоты в пределах 400...710 Гц, что характерно для турбореактивных лайнеров типа Ил-86, представляет большой интерес. При анализе работоспособности АД следует учесть характеристики как топливных систем, так и авиационных двигателей в различных режимах полета, а также вентиляторный характер нагрузки погруженных в топливо АД. За основу приняты типовые графики часового расхода топлива на одну силовую установку (СУ), изменения частоты в зависимости от режима полета и типовые зависимости напорных характеристик насосов подкачки топлива типа ЭЦНГ. На рис. 10.11 график частоты представлен в абсолютных единицах, а график расхода топлива СУ — в относительных единицах (за базу принята максимальная производительность насоса в режиме взлета) [23].

Следует отметить, что топливные насосы при питании АД стабильной частотой 400 Гц изменяют свою производительность Q_n и перепад давлений ΔP только за счет изменения напорной характеристики топливной магистрали, что связано с дросселированием СУ. Частота же вращения насосов сохраняется практически неизменной. Значения Q_n , ΔP , гидравлической мощности P_2 и полезной мощности (на валу двигателя) P_v для частоты 400 Гц и с учетом графиков на рис. 10.11 представлены в табл. 10.1.

Из таблицы следует, что при дросселировании СУ производительность насосов подкачки снижается в меньшей мере, чем расход топлива в СУ. Избыточная мощность насосов рассеивается в виде гидравлических потерь в струйных насосах и магистрали топливной системы. Диспропорция между производительностью насосов и расходом топлива в СУ особенно вырастает в режиме малого газа (рулежка, снижение, посадка). При питании АД напряжением переменной частоты указанная диспропорция уменьшится за счет нового, дополнительного фактора — переменной частоты питания, который воздействует в том же направлении, что и дросселирование СУ. Благодаря этому уменьшаются гидравлические потери в топливной системе и появляются дополнительные возможности для управления СУ.

При переменной частоте питания АД данные табл. 10.1 получены исходя из следующих условий: АД при минимальной частоте питания 710 Гц имеют такую же полезную мощность и частоту вра-

Таблица 10.1

Режим работы СУ	Частота сети f , Гц	Расход топлива в СУ Q_n , о. е.	Производительность насоса Q_n , о. е., при		Перепад давлений на насосе ΔP , о. е., при		Гидравлическая мощность насоса P_r , о. е., при		Полезная мощность АД P_n , Вт, при	
			$f = 400$ Гц	$f = \text{var}$	$f = 400$ Гц	$f = \text{var}$	$f = 400$ Гц	$f = \text{var}$	$f = 400$ Гц	$f = \text{var}$
Взлетный	710	0,4	1	1	1	1	1	1	1500	1500
Номинальный	670...710	0,2	0,87	—	1,18	—	1	—	1500	—
Крейсерский	630...670	0,074... 0,115	0,79	0,7...0,77	1,22	0,96... 1,09	0,98	0,67... 0,82	1460	890...1060
Малый газ	400...620	0,05	0,36	0,22... 0,32	1,48	0,53... 1,13	0,53	0,16... 0,36	800	107...172

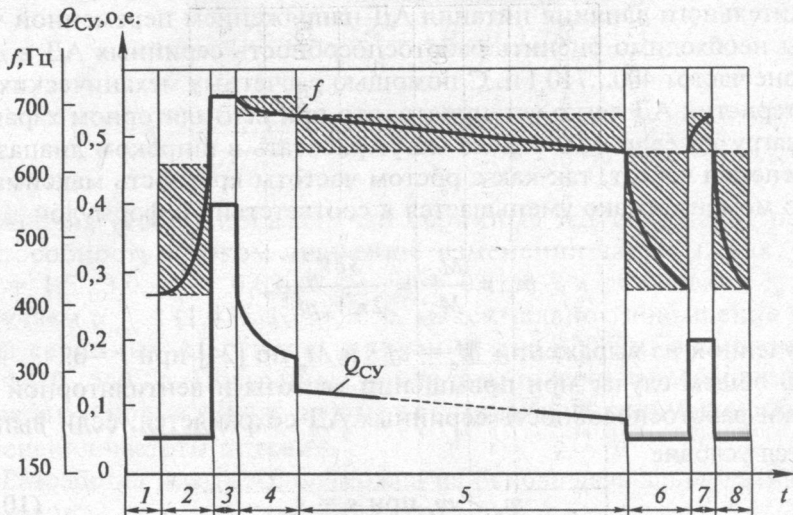


Рис. 10.11. Графики расхода топлива на одну СУ и изменения частоты в СЭ нестабильной частоты:

1 — подготовка к полету; 2 — запуск СУ, рулежка (малый газ); 3 — взлет, форсаж (до 6 мин); 4 — набор высоты (номинальный режим до 30 мин); 5 — крейсерский полет (режим на максимальную продолжительность); 6 — снижение (малый газ до 30 мин); 7 — заход на посадку (номинальный режим до 6 мин); 8 — посадка, рулежка (малый газ)

щения, что и АД стабильной частоты 400 Гц, т. е. в обоих случаях производительность подачи топлива в СУ во взлетном режиме одинакова; напорные характеристики насосов и топливной магистрали предполагались идеальными, что позволяет использовать известные соотношения для насосов подкачки

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}} = \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^2 = \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^2 = \left(\frac{Q_n}{Q_{\max}} \right)^2,$$

для топливной магистрали

$$\frac{\Delta P}{Q^2} = \text{const.}$$

Таким образом, с помощью табл. 10.1 показывается, что при питании АД переменной частотой эффективность работы насосов подкачки увеличивается, гидравлические потери снижаются, а требуемый расход топлива СУ обеспечивается в требуемом диапазоне изменения частот. Аналогичные результаты получены для АД в насосах перекачки и аварийного слива топлива. Для реализации по-

ложительного влияния питания АД напряжением переменной частоты необходимо оценить работоспособность серийных АД в диапазоне частот 400...710 Гц. С помощью расчетных механических характеристик АД легко установить, что при вентиляторном характере нагрузки серийные АД не могут работать в широком диапазоне изменения частот, так как с ростом частоты кратность максимального момента резко уменьшается в соответствии с формулой

$$m_k = \frac{M_k}{M_c} = \frac{3\rho V_\Phi^2}{2\pi^2 V_k a f^4},$$

полученной из выражений $M_c = af^2$ и M_k по [24] при $r=0$.

В общем случае при повышении частоты и вентиляторной нагрузки работоспособность серийных АД сохраняется, если выполняется условие

$$m_k > m_c \text{ при } s = s_k, \quad (10.20)$$

где m_k, m_c — относительные значения критического момента и момента сопротивления, а s — скольжение. Если воспользоваться обозначениями [24], то m_k и m_c можно представить в следующем виде:

$$m_k = \frac{M_k}{M_H} = \frac{[(r_1 + r_2' / S_H)^2 + X_{KH}] s_H}{2\alpha r_2' (r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_{KH}^2 \alpha^2})}, \quad (10.21)$$

$$m_c = \frac{M_c}{M_H} = \frac{(1-s)^2}{(1-s_H)^2} \alpha^2, \quad (10.22)$$

где $\alpha = \frac{f}{f_H} > 1$.

С помощью (10.20)—(10.22) и асимптотического метода возмущений по параметру [25] находится допустимый предел изменения частоты α_{\max} , при котором сохраняется работоспособность АД:

$$\alpha_{\max} \leq \alpha_0 - \alpha_0 \frac{r_1 (1-s_H) \sqrt{m_{KH} \epsilon}}{X_{KH} - 4\gamma} + \frac{r_2}{X_{KH}^2} \frac{\alpha_0}{4\gamma} \left[\alpha \left(\frac{1}{4} \frac{(1-s_H) m_{KH} \epsilon}{\epsilon \gamma^2} \right) - \left(\frac{(1-s_H) \sqrt{m_{KH} \epsilon}}{4\gamma} \right) - s_{KH} \delta \right], \quad (10.23)$$

где

$$\alpha_0 \leq \frac{s_{\text{кн}}}{2} \delta + \sqrt{\frac{s_{\text{кн}}^2 \delta^2}{4} + (1 - s_{\text{н}}) \sqrt{m_{\text{кн}}} \varepsilon};$$

$$\varepsilon = \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}{X_{\text{кн}}}; \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{r_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}{X_{\text{кн}}}; \quad \gamma = \alpha_0 - \frac{s_{\text{кн}}}{2} \delta.$$

Анализ (10.23) показал, что серийные АД сохраняют работоспособность в узком диапазоне изменения частоты. Так, при $m_{\text{кн}} = 1,5 \dots 3,0$, $s_{\text{н}} = 0,02 \dots 0,15$, $s_{\text{кн}} = 0,1 \dots 0,3$ и допущении $r_0 = 0$ получаем $\alpha_{\text{max}} \leq (1,18 \dots 1,35)$, т. е. максимальное повышение частоты серийных АД, спроектированных на 400 Гц, возможно до $f_{\text{max}} \leq 470 \dots 540$ Гц. Полученные результаты говорят о необходимости разработки новых АД для работы в системах с широким диапазоном изменения частоты питания.

Разработка новых АД возможна на основе двух альтернативных подходов:

- 1) сохранение традиционной конструктивной схемы и адаптация к переменной частоте питания за счет изменения конструктивных параметров;
- 2) выбор новых конструкций и параметров, например, **МНОГОСКОРОСТНЫХ** АД с переключением обмоток.

Учитывая надежность, простоту и многолетнюю апробацию традиционных АД, первое направление адаптации представляется более предпочтительным. Однако из-за отсутствия расчетных и опытных данных о работе подобных АД в широком диапазоне варьирования частоты и постоянства напряжения питания необходимы дополнительные исследования.

В первую очередь следует учесть, что предельная мощность новых АД будет ограничена в большей мере, чем у серийных АД. Это обусловлено тем, что новые АД следует выполнять примерно с теми же габаритными размерами и с той же максимальной частотой вращения, что и серийные АД топливных систем. В противном случае с ростом диаметра ротора или частоты его вращения резко возрастают механические потери жидкостного трения ($P_{\text{т}} \approx kD^5(f_{\text{max}/p})^3 l$). С учетом этих ограничений условие реализуемости новых АД можно представить в виде

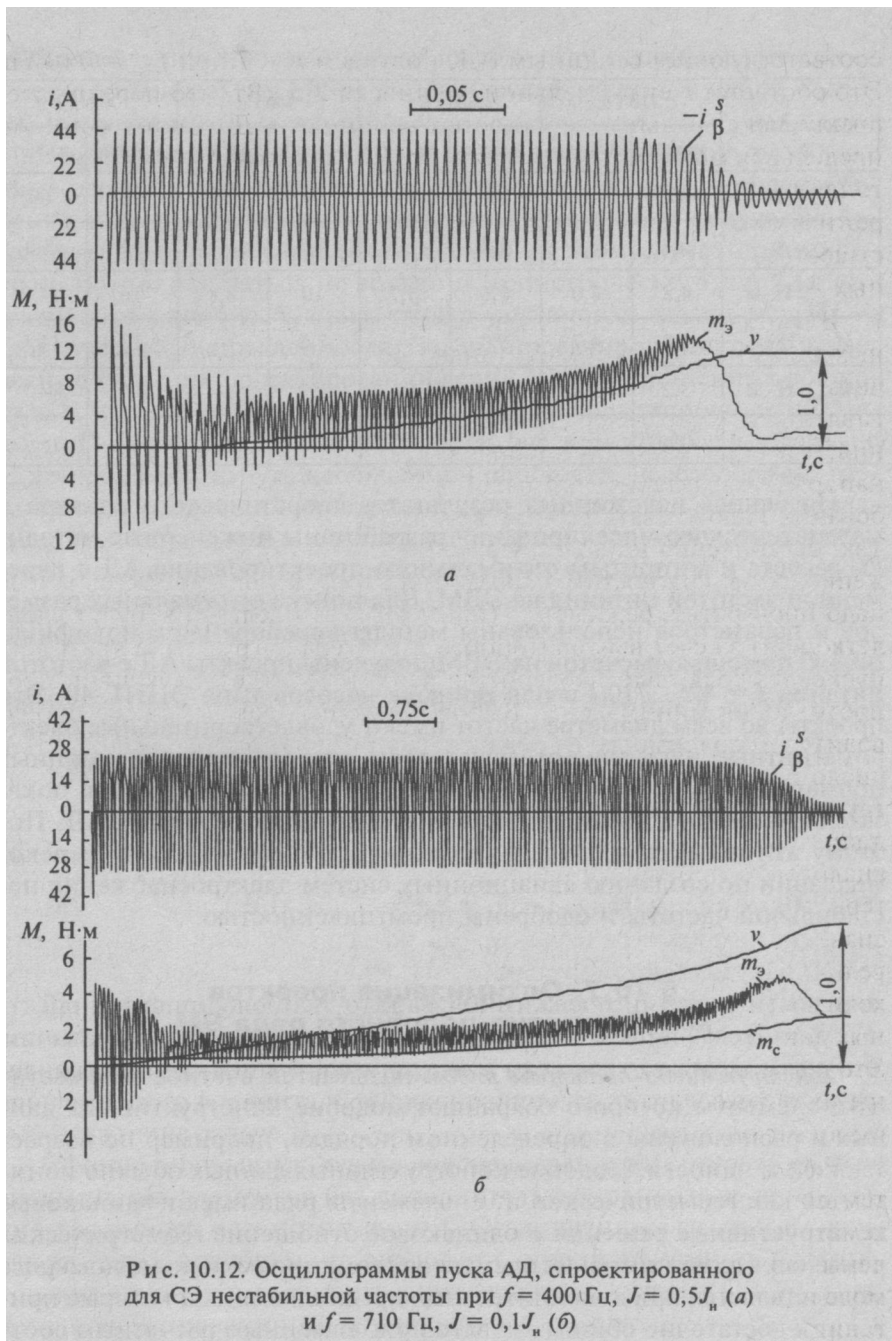
$$p f_{\text{max}} = k \sqrt{f_1 B \delta} f_{\text{max}}, \quad (10.24)$$

где p — число пар полюсов; f_1 — плотность тока статора; $B \delta f_{\text{max}}$ — магнитная индукция в зазоре АД при $f = f_{\text{max}}$; k — конструктивный коэффициент. Сохраняя правую часть уравнения (10.24) на уровне,

соответствующем серийным АД, получаем $p = 7$ при $f_{\max} = 710$ Гц. Это соответствует предельной мощности 2,5 кВт, что перекрывает шкалу максимальных мощностей серийных АД. Таким образом, предельная мощность не препятствует адаптации авиационных АД топливных систем к переменной частоте питания. Однако многорежимность (в зависимости от частоты питания) работы требует существенной модернизации методов проектирования авиационных АД.

В техническое задание на проектирование новых АД, кроме обычных данных и авиационных стандартов и нормативов, следует включить дополнительные характеристики: зависимость момента сопротивления от частоты вращения; диапазон изменения частоты питания; графики расхода топлива СУ в различных режимах полета; напорные характеристики насосов и т. д., причем для каждого требования надо указать режим, в котором оно должно выполняться. Так, ограничения на полезную мощность, частоту вращения, скольжение, $\cos \varphi$, кратности максимального и пускового моментов и т. п. надо проверять в режиме f_{\max} (при $f < f_{\max}$ эти величины будут удовлетворены за счет вентиляторного характера нагрузки), а кратность пускового тока надо проверить в режиме f_{\min} , где индуктивные сопротивления минимальны. Выбор проектных данных также производится в зависимости от режима. Например, полезная мощность и число пар полюсов АД выбираются в режиме f_{\max} , а магнитные нагрузки — в режиме f_{\min} , исходя из их минимального уровня. Выбор диаметра расточки и активной длины АД затруднен из-за отсутствия аналогов, подобных АД, и чрезмерного увеличения жидкостных потерь. Поэтому предварительно задаются минимально допустимыми значениями диаметра и размерами пазовой геометрии, а затем эти величины уточняются итерационным путем. И вообще из-за необходимости учета многорежимной работы АД большинство проектных данных неоднократно варьируется в процессе проектирования. Это делается до тех пор, пока в результате итераций не будут найдены их оптимальные значения, удовлетворяющие всем ограничениям в полном диапазоне изменения частоты питания.

Расчет и анализ переходных процессов АД для топливных систем при переменной частоте питания производится с помощью математических моделей, приведенных в § 7.7. На рис. 10.12 представлены осциллограммы пуска, полученные путем математического моделирования АД, спроектированного для изменения частоты питания в диапазоне 400...710 Гц. Зависимости проектных данных от изменения частоты приведены в табл. 10.2



Р и с. 10.12. Осциллограммы пуска АД, спроектированного для СЭ нестабильной частоты при $f = 400$ Гц, $J = 0,5J_{н}$ (а) и $f = 710$ Гц, $J = 0,1J_{н}$ (б)

Таблица 10.2

Показатель	710 Гц		600 Гц		500 Гц		400 Гц	
	модель	расчет	модель	расчет	модель	расчет	модель	расчет
$i_{п\ max}, A$	42	43,5	48	48	56	53	62	60
$I_{уст}, A$	6,8	8,4	4,2	—	4,0	—	3,8	5,0
$m_{э\ max}, H \cdot м$	4,8	4,0	6,6	5,7	10	8,8	16	14,3
$M_{э,кр}, H \cdot м$	4,8	4,7	6,0	—	8,6	—	12	11,8
$M_{э,уст}, H \cdot м$	3,2	3,4	2,1	—	1,3	—	0,9	—
$t_{пуск}, с$	2,65	—	1,55	—	0,75	—	0,4	—

На основе изложенных результатов теоретического анализа и математического моделирования разработаны инженерные методики расчета и алгоритмы оптимального проектирования АД с переменной частотой питания на ЭВМ. Для поиска оптимальных размеров и параметров использованы методы перебора и их модификации. С помощью расчетов на ЭВМ получены проекты АД с частотой питания $f = 425...710$ Гц для привода насосов типа ЭЦНГ-40. Эти проекты во всем диаметре частот имеют удовлетворительные электромагнитные нагрузки, отвечают всем требованиям авиационных нормативов и сохраняют энергетические и массогабаритные показатели на уровне, достигнутом для аналогичных серийных АД. Поэтому эти проекты включены в технические предложения и рекомендации по созданию авиационных систем электроснабжения нестабильной частоты и одобрены промышленностью.

§ 10.7. Оптимизация проектов конструктивно-подобного ряда ЭМ

Конструктивно-подобным рядом называется счетное множество ЭМ, элементы которого сохраняют подобие конструктивных данных и расположены в определенном порядке, например по возрастающей мощности. Подобие конструктивных данных обычно понимается как геометрическое, т. е. элементы ряда имеют одинаковые конструктивные решения и одинаковое отношение геометрических размеров. Проектирование элементов геометрически подобного ряда осуществляется при дополнительных предположениях, которые приводят к достаточно общим, но зато приближенным расчетным соотношениям. Например, при постоянстве плотности тока и индукции

удается получить простые зависимости между главными размерами и некоторыми показателями электрических машин, с одной стороны, и мощностью — с другой.

Применение методов оптимального проектирования позволяет снять ограничения, присущие классическому подходу к проектированию такого ряда и связанные с необходимостью получения дополнительных расчетных соотношений. В этом случае принципиально можно отказаться не только от геометрического, но и конструктивного подобия. Однако общая постановка задачи мешает ее практической направленности. Задача проектирования ряда играет важную роль при проектировании серий ЭМ, объединенных общностью многих конструктивных решений и эксплуатационных показателей. Поэтому, чтобы сохранить практический интерес к задаче и в то же время достигнуть необходимой общности, целесообразно рассматривать следующий конструктивно-подобный ряд. Элементы ряда имеют однотипные конструктивные формы и оптимальны в одном и том же смысле. Идентичность остальных требований к элементам ряда в каждом конкретном случае устанавливается техническим заданием на проектирование ряда.

С учетом изложенного задачу проектирования произвольного элемента ряда можно сформулировать по аналогии с задачей Д (см. гл. 3), а именно:

- максимизировать (минимизировать) функцию

$$H_0(z_1, \dots, z_p, P) \quad (10.25)$$

так, чтобы удовлетворить условиям

$$H_j(z_1, \dots, z_p, P) \geq 0, j = 1, \dots, m; \quad (10.26)$$

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max}. \quad (10.27)$$

Данная формулировка отличается от задачи Д введением новой переменной P (например, мощности элемента ряда) и условия (10.27), которое ограничивает проектируемый ряд сверху и снизу. Если для произвольного элемента P зафиксировать, то задача будет полностью идентична задаче Д.

Сформулированная задача обеспечивает проектирование ряда оптимальных элементов без дополнительных расчетных соотношений для выбора проектных данных. Ограничения, связанные с конструктивным подобием, по аналогии с ограничениями на проектирование единичного элемента учитываются условиями (10.26). Процесс проектирования ряда реализуется следующим образом. На непрерывном множестве изменения P , заданном (10.27), выбирает-

ся каким-либо образом последовательность фиксированных значений $P_{\min}, P_1, P_2, \dots, P_{\max}$, определяющая элементы ряда. Число элементов можно выбрать произвольным, но не очень малым для построения непрерывных характеристик ряда по известным дискретным точкам. Для каждого значения P решаются задачи и определяются соответственно последовательности:

$$H_0(P_{\min}), H_0(P_1), \dots, H_0(P_{\max}); \quad (10.28)$$

$$\dot{z}_1(P_{\min}), \dot{z}_1(P_1), \dots, \dot{z}_1(P_{\max}); \quad (10.29)$$

$$\dot{z}_p(P_{\min}), \dot{z}_p(P_1), \dots, \dot{z}_p(P_{\max}). \quad (10.30)$$

Если последовательности (10.28)–(10.30) рассматривать как дискретные аналоги непрерывных функций, то путем построения кривых по заданным точкам легко получить характеристики оптимального ряда типа $H_0(P), z_1(P), \dots, z_p(P)$. Аналогичным путем можно построить зависимости от P для любых расчетных проектных данных, однозначно определяемых через z_1, \dots, z_p . В качестве P может рассматриваться как мощность электромеханического преобразователя, так и другие данные, например габаритные диаметры и т. п. Ниже приводятся два примера построения закономерностей оптимального ряда, которые более подробно изложены в [1].

Пример 1. Оптимизация ряда синхронных генераторов. Типовое задание на проектирование оптимального ряда АСГ составлено на базе типового задания на проектирование единичного АСГ и шкалы мощностей (15; 30; 40; 60; 90; 120 $\text{kB} \cdot \text{A}$), которому соответствует следующая шкала расходов охлаждающего воздуха: 0,09; 0,12; 0,15; 0,20; 0,27; 0,34 кг/с с расчетной температурой входящего воздуха 60 $^{\circ}\text{C}$.

Решая задачу оптимального проектирования АСГ для каждого элемента шкалы мощностей, получаем различные технические характеристики оптимального ряда АСГ.

Обмоточные характеристики определяются в основном зависимостью числа витков в фазе от мощности при фиксированной частоте вращения или числа пар полюсов (рис. 10.13, *a*). Гиперболический характер кривых объясняется тем, что при одинаковых напряжениях и перегрузочной способности с увеличением мощности следует уменьшать число витков в фазе. Это необходимо, с одной стороны, для компенсации увеличения МДС якоря из-за соответ-

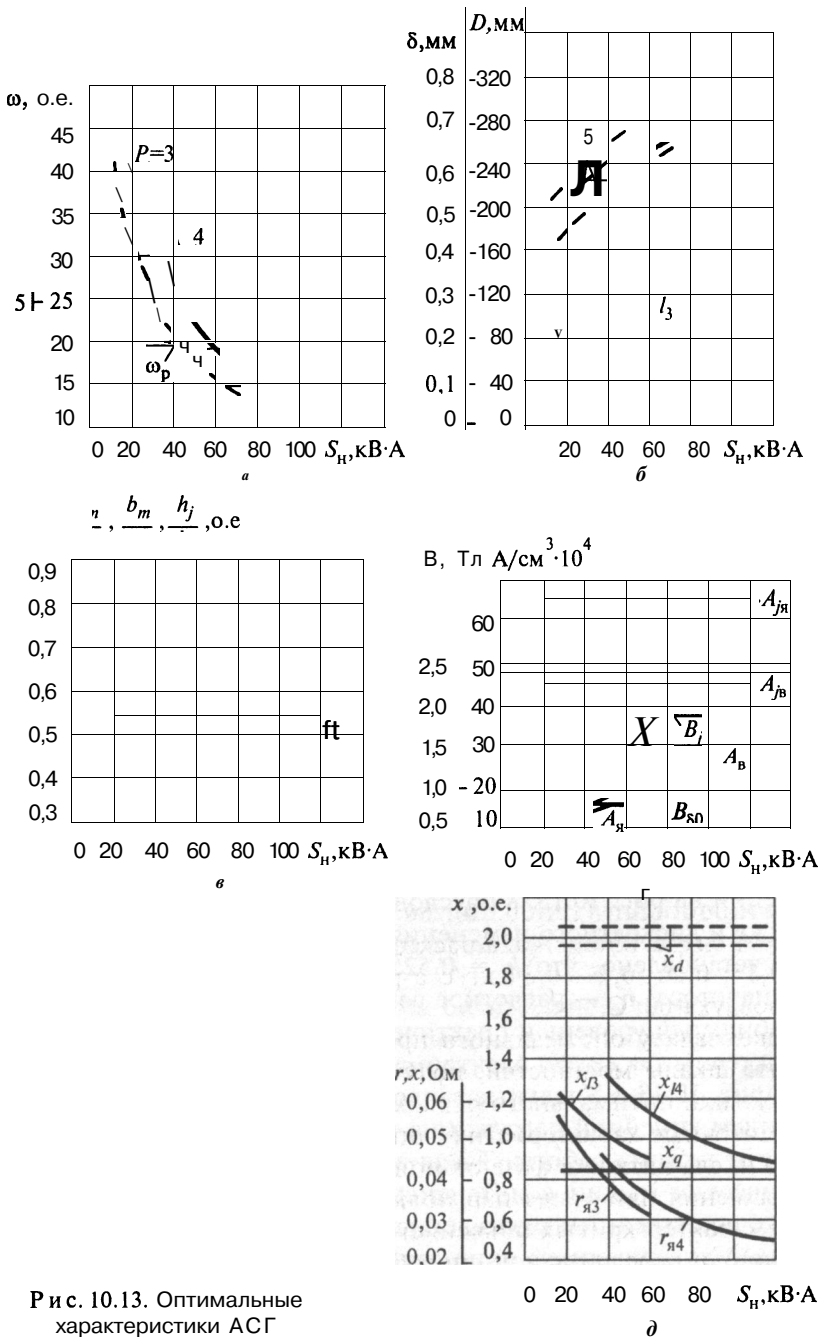


Рис. 10.13. Оптимальные характеристики АСГ

ствующего увеличения тока якоря, а с другой — для создания соответственно большего рабочего магнитного потока. Характеристика оптимальных чисел витков на полюс и фазу показана на рис. 10.13, а пунктиром. Эта кривая имеет довольно устойчивый характер в широком диапазоне изменения теплонапряженности генератора. Во всяком случае значительные увеличения температуры входа охлаждающего воздуха не влияют на сдвиг кривой. Тем не менее следует иметь в виду, что более общая пунктирная характеристика справедлива лишь для оговоренных в техническом задании исходных данных ($U_{\phi} = 120$ В, $f = 400$ Гц и т. п.).

Основные геометрические размеры в функции мощности представлены на рис. 10.13 б. Эти характеристики не учитывают ограничения на габаритные размеры, которые иногда возникают в практике проектирования. Качественно геометрические характеристики соответствуют закономерностям геометрически подобного ряда электрических машин, однако количественно имеются отклонения. Линейные размеры пропорциональны полной мощности в степени несколько большей чем $1/4$, особенно значения воздушного зазора. Поперечные геометрические размеры индуктора и зубцовой зоны оцениваются с помощью соотношений соответствующих размеров, которые приведены на рис. 10.13 в. Как видно, эти соотношения изменяются в узких пределах, а некоторые постоянны для всех элементов ряда. Поэтому средние или постоянные значения приведенных соотношений можно рекомендовать в качестве исходных данных для проектирования генераторов по аналогичным техническим заданиям.

Таким образом, полученные соотношения дают возможность сокращения количества искомых размеров. Некоторый разброс соотношений на рис. 10.13, в обусловлен конечностью шагов процесса поиска и дискретного изменения обмоточных данных. Дополнительно установлено, что $h_j = 0,525b_m$, где h_j — расчетное сечение ярма индуктора; b_m — расчетное сечение сердечника индуктора.

Стабильный уровень и практическая независимость от мощности характерны также для электромагнитных нагрузок, представленных на рис. 10.13 г. Удельные тепловые нагрузки, выражаемые произведением линейной нагрузки на плотность тока A_j , зависят в основном от режима работы. Такая закономерность справедлива для электрических машин с интенсивным охлаждением в отличие от машин с естественным охлаждением, для которых произведение A_j возрастает с увеличением мощности. Это объясняется тем, что расход охлаждающего воздуха увеличивается пропорционально возрастанию мощности, а уровень температур нагревания обмоток остается

ся неизменным из-за необходимости работы в предельных температурных режимах.

Характер произведения A_1 , в свою очередь, влияет на распределение линейных нагрузок и плотность тока в зависимости от мощности. Если линейные нагрузки, так же как и в машинах общепромышленного назначения, увеличиваются с возрастанием мощности, то плотность тока, наоборот, в отличие от обычных машин уменьшается.

Уровни индукций в различных участках магнитопровода также постоянны и зависят от режима работы. При этом периферийные участки в магнитном отношении нагружены сильнее, чем центральные. Это объясняется тем, что периферийные участки имеют большую долю в активной массе всего генератора.

Стабильный уровень параметров установившихся режимов x_d и x_q (рис. 10.13, д) обусловлен единым значением ограничения по перегрузочной способности k_{n2} и постоянством оптимального значения коэффициента a для всех элементов ряда. Так как соотношение между параметрами x_d и x_q характеризует степень явнополюсности машины, то при постоянном a существует жесткая функциональная связь: задание одного из параметров, например x_d , равносильно заданию k_n .

Таким образом, ограничение по перегрузочной способности можно задавать в различных формах, что расширяет возможности проектировщика. Насыщенные значения x_d и x_q также стабильны, но имеют несколько больший диапазон изменения, так как зависят не только от геометрических размеров зазора, но и степени насыщения магнитопровода, т. е. от всех остальных геометрических размеров и режимов работы. Уменьшение кривых индуктивных сопротивлений рассеивания и активных сопротивлений естественно и объясняется соответствующим увеличением воздушного зазора и уменьшением числа витков.

Сравнительные характеристики оптимального ряда АСГ приведены на рис. 10.14. Анализ их показывает, что переход от частоты вращения 6000 об/мин к частоте вращения 8000 об/мин приводит к уменьшению массы всего лишь на 10%. Для сравнения с лучшими зарубежными данными пунктиром даны характеристики массы серий Auxilec (1) и Bendix (2), которые по совокупности основных показателей достаточно близки к полученному ряду. Масса элементов в среднем на 10% меньше массы соответствующих зарубежных генераторов. Благодаря указанному преимуществу ряд АСГ с минимальной массой служит хорошей расчетно-теоретической основой для инженерного проектирования аналогичных машин.

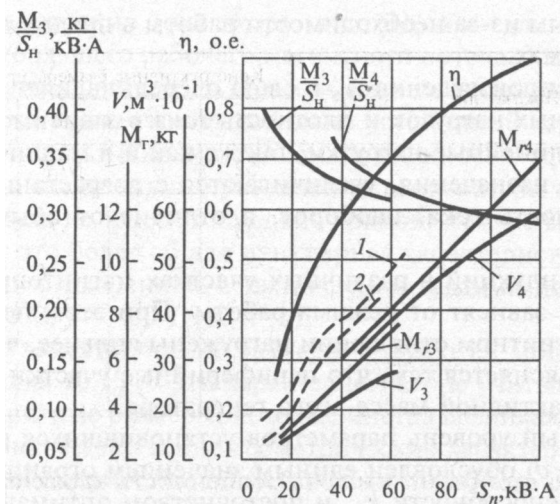


Рис. 10.14. Сравнительные характеристики АСГ

Пример 2. Оптимизация ряда бесконтактных сельсинов. Типовое задание на проектирование оптимального ряда бесконтактных индикаторных сельсинов повышенной частоты основано на типовом задании единичных сельсинов и стандартных данных. Шкала габаритных диаметров принята равной 25, 32, 40, 50, 60 мм. Выбор диаметра 60 мм при частоте колебаний 400 Гц не всегда оправдан и может рассматриваться в качестве верхней допустимой границы. Этой шкале поставлена в соответствие шкала максимально допустимой потребляемой активной мощности: 4; 6; 8,5; 12,5; 16 Вт. Уровни потребляемой активной мощности выбраны исходя из коэффициентов теплоотдачи (0,1...0,15 Вт на 1 см² поверхности корпуса) так, чтобы превышение температуры было не более 55 °С. Фиксация габаритных диаметров позволяет также фиксировать некоторые основные конструктивные размеры с учетом заданных конструкторско-технологических требований (табл. 10.3).

Решение задачи оптимального проектирования сельсина для каждого элемента заданного ряда позволяет получить оптимальные технические характеристики ряда в функции габаритного диаметра. При этом оказывается, что реализация сельсина диаметром 25 мм невозможна в рамках технического задания ряда. Поэтому проект этого сельсина выполнен с отступлением от задания на снижение напряжения обмоток до 27 В. В результате расчетные данные сельсина диаметром 25 мм, особенно обмоточные, нарушают монотонность

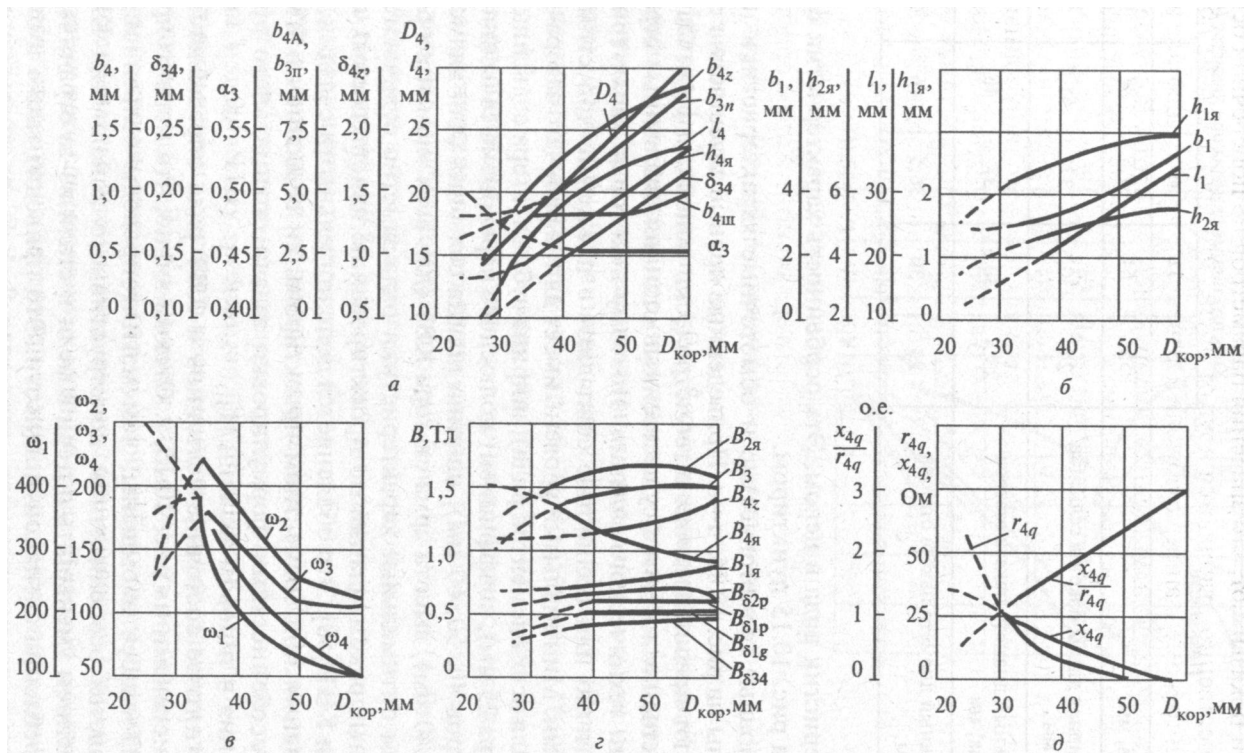
Таблица 10.3

Показатели	Конструктивные размеры при диаметре (мм)				
	25	32	40	50	60
Длина, мм	52	61	67,5	88	102
Суммарная длина пакетов сельсина и КВТ, мм	24	30,5	37	51,5	61
Наружный диаметр пакета статора сельсина, мм	23,5	30,5	37	46	56
Наружный диаметр пакета статора КВТ, мм	23	30	36,5	46	56

характеристик ряда в целом. Эта особенность характеристик отмечена на **рис. 10.15** пунктиром.

Основные геометрические и обмоточные характеристики представлены на рис. 10.15, *а—в*. Приведенные кривые качественно соответствуют представлениям о геометрически подобном ряде. Однако количественно имеются существенные отличия, вызванные ограничениями технического задания. Поэтому некоторые характеристики частично или полностью совпадают с предельно допустимыми уровнями. Минимальный уровень имеет длина рабочего зазора сельсина (для всех элементов **ряда**), ширина зубца статора сельсина (для диаметра 25 мм), коэффициент полюсного перекрытия сельсина (для диаметров 40, 50, 60 мм), ширина шлица сельсина (для диаметров 25, 32, 40 мм), высота яра статора КВТ (для всех элементов ряда). В целом оптимальные характеристики ряда заметно отличаются от известных рекомендаций по проектированию явнополюсных сельсинов и КВТ [58]. Это объясняется дополнительными связями, возникающими при совместном проектировании сельсинов и КВТ, а также особенностями формулировки задачи оптимального проектирования в типовом задании [1].

Магнитное состояние сельсинов и КВТ ряда определяется характеристиками на рис. 10.15, *г*. Отсюда видно, что магнитопроводы КВТ слабее насыщены, чем магнитопроводы сельсинов, что объясняется особенностями конструктивного исполнения КВТ и стремлением уменьшить потери в меди и стали из-за **ограниченного** потребления активной мощности. Это приводит также к отклонению некоторых магнитных характеристик от рекомендованных в [58], что подробно показано и объяснено в [1].



Параметрические характеристики ряда представлены на рис. 10.15, d и показывают, что значения параметров по поперечной оси x_{4q} и r_{4q} существенно отличаются друг от друга. Это противоречит общепринятой рекомендации, требующей равенства x_{4q} и r_{4q} для достижения максимума удельного синхронизирующего момента. В случае невозможности равенства соотношение x_{4q}/r_{4q} рекомендуется выбирать в диапазоне 0,8...2,4. Этот же диапазон на рис. 10.15, d значительно расширен и равен 0,472...2,91. Аналогичный результат получается при оптимизации не только по критерию удельного синхронизирующего момента, но и по критерию удельной синхронизирующей мощности. Полученные параметрические характеристики также обусловлены ограничением по потребляемой активной мощности. Кроме того, они показывают, что оптимальные элементы ряда можно использовать как в качестве приемников, так и датчиков.

Сравнительные характеристики ряда приведены на рис. 10.16. Характеристика $M_0(D_k)$ является критериальной. Характеристика $M_0/P_{1234}(D_k)$ определяет оптимальный удельный синхронизирующий момент, приходящийся на единицу потребляемой мощности в элементах ряда. Характеристика $M_0(P_{34}/D_k)$ оценивает относительный момент, приходящийся на единицу мощности потребления собственно сельсина, и полезна для сравнения сельсинов в контактном и бесконтактном исполнении. Характеристики $P_{12}(D_k)$, $P_{34}(D_k)$ оценивают пропорции в разделении потребляемой мощности между сельсином и КВТ для каждого элемента ряда.

Интегральные характеристики в сравнении с аналогичными показателями выпускаемых сельсинов позволяют качественно оценить спроектированный ряд. На рис. 10.16 точками показаны данные двух бесконтактных сельсинов:

- 1) марки **11ВТР-300-А-1** с диаметром 27 мм фирмы Hagowe (США);
- 2) марки **БС-151А** с диаметром 45 мм отечественного производства.

Относительный момент M_0/P_{1234} сельсина **11ВТР-300-А-1** практически совпадает с аналогичным показателем оптимального ряда. Но при этом следует учесть, что сельсин **11ВТР-300-А-1** выполнен на напряжения обмоток 115 и 118 В. Его выходное напряжение значительно ниже по сравнению с рядом. Учитывая, что с уменьшением числа витков, следовательно, и напряжения повышаются энергетические показатели сельсинов, можно предполагать, что оптимальный ряд имеет более высокие относительные показатели по сравнению с сельсином **11ВТР-300А-1**.

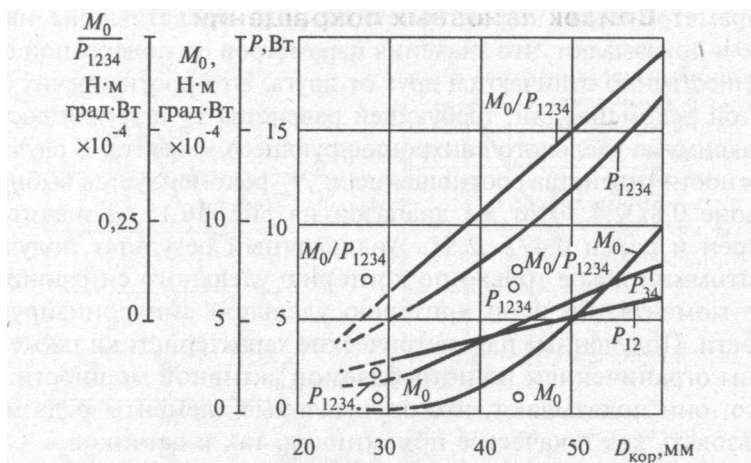


Рис. 10.16. Сравнительные характеристики бесконтактного сельсина

Показатели сельсина **БС-151А** значительно ниже оптимальных характеристик ряда.

Однако надо иметь в виду, что **БС-151А** имеет неявнополюсную конструкцию и повышенные напряжения обмоток (110 и 100 В). Переход к явнополюсной конструкции и напряжениям 40 В позволяет существенно повысить показатели оптимального ряда по сравнению с сельсином **БС-151А**. Таким образом, в обоих случаях сельсины оптимального ряда имеют лучшие характеристики. Опытные образцы сельсинов, изготовленные на основании проектов оптимального ряда, экспериментально подтверждают расчетно-теоретические показатели.

Список основных сокращений

АБД — автоматизированная база данных
АД — асинхронный двигатель
АРМ — автоматизированное рабочее место
АСГ — авиационный асинхронный генератор
АСНИ — автоматизированная система научных исследований
АЭК — автоматизированный экспериментальный комплекс
БД — база данных
БУ — блок управления
ВК — вычислительный комплекс
ВС — вычислительная система
ГМ — геометрическая модель
ГПС — гибкая производственная система
ЕСКД — единая система конструкторской документации
И — источник
ИО — измерительный орган
ИПК — интегрированный измерительный комплекс
ИПЭ — импульсный приемник энергии
КВТ — кольцевой входной трансформатор
КГ — канал генерирования
КТ — компенсирующий трансформатор
ЛА — летательный аппарат
МКШД — многокоординатный шаговый двигатель
Н — нагрузка
ОС — операционная система
ПК — программный комплекс
ППП — пакет прикладных программ
ППЧВ — привод постоянной частоты вращения
ПЭ — приемник электроэнергии
РК — распределительная коробка
РН — регулятор напряжения
С — стоки-потребители
САПР — система автоматизированного проектирования
СГ — синхронный генератор
СПР — сеть передачи и распределения
СУБД — система управления базой данных
СЭ — система энергоснабжения
СЭС — самолетная энергетическая система
ТВУ — трансформаторно-выпрямительное устройство
ТЗ — техническое задание
ФИМ — фазоимпульсная модуляция
ЦРУ — центральное распределительное устройство
ЧПУ — числовое программное управление
ШД — шаговое движение
ШИМ — широтно-импульсная модуляция
ШР — штепсельный разъем
ЭИС — электроинформационная система
ЭМ — электрическая машина
ЭС — энергетическая система
ЭТС — электротехническая система
ЭЭС — электроэнергетическая система

Список литературы

1. *Аветисян Д.А., Соколов В.С., Хан В.Х.* Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. — М.: Энергия, 1976.
2. Системы автоматизированного проектирования. Типовые элементы, методы и процессы / *Д.А. Аветисян, И.А. Башмаков, В.И. Геминтерн* и др. — М.: Изд-во стандартов, 1985.
3. *Аветисян Д.А.* Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей. — М.: Высшая школа, 1988.
4. *Аветисян Д.А.* Автоматизация проектирования электрических систем. — М.: Высшая школа, 1998.
5. *Аветисян Д.А., Игнатов В.П., Фролов Г.Д.* Автоматизация проектирования строительных и технических объектов. — М.: Наука, 1986.
6. *Норенков И.П., Маничев В.Б.* Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры. — М.: Высшая школа, 1983.
7. *Петренко А.И.* Автоматизация проектирования. — Киев: Техника, 1982.
8. *Уокер Б.С., Гурд Дж.Р., Дроник Е.А.* Интерактивная машинная графика. — М.: Машиностроение, 1980.
9. *Морозовский В. Т., Синдеев И.М.* К вопросу о синтезе оптимальной структуры системы электроснабжения летательного аппарата // Сб. трудов «Автоматика и электромеханика». — М.: Наука, 1973.
10. *Аветисян Д.А., Винский О.В., Глухое О.М.* Автоматизированный синтез вариантов энергетических систем // Сб. «Автоматизированное проектирование электротехнических устройств и систем». — Тр. всесоюзного семинара АН СССР. — Челябинск, 1982.
11. *Пахлеванян А.Р.* Пакет прикладных программ для моделирования динамических процессов в самолетных электросистемах // Сб. «Автоматизированное проектирование электротехнических устройств и систем». Тр. всесоюзного семинара АН СССР. — Челябинск, 1982.
12. *Гермейер Ю.Б.* Введение в теорию исследования операций. — М.: Наука, 1971.
13. *Беллман Р.* Динамическое программирование. — М.: Иностранная литература, 1960.
14. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Физматгиз, 1961.
15. *Моисеев Н.Н.* Численные методы в теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1971.
16. *Карманов В.Г.* Математическое программирование. — М.: Наука, 1975.
17. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. — М.: Мир, 1975.
18. *Уайльд Д.Д.* Методы поиска экстремума. — М.: Наука, 1967.
19. *Полак Э.* Численные методы оптимизации. — М.: Мир, 1974.
20. *Фиакко А., Маккормик Г.* Нелинейное программирование. — М.: Мир, 1972.
21. *Растргин Л.А.* Статистические методы поиска. — М.: Наука, 1968.
22. *Зойтендейк Г.* Методы возможных направлений. — М.: Иностранная литература, 1963.
23. *Аветисян Д.А.* Поиск максимума вдоль подходящих допустимых направлений // Изв. АН АрмССР. Сер. техн. наук, 1969. Т. XXII.
24. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования. — М.: Наука, 1965.
25. *Беллман Р., Гликсберг И., Гросс О.* Некоторые вопросы математической теории процессов управления. — М.: Иностранная литература, 1962.
26. *Хедли Дж.А.* Нелинейное и динамическое программирование. — М.: Мир, 1967.
27. *Зенер К.* Геометрическое программирование и техническое проектирование. — М.: Мир, 1973.
28. *Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю.* Дискретное программирование. — М.: Наука, 1970.
29. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1976.
30. *Аветисян Д.А.* Элементы общей теории электрических машин. — М.: Изд-во МАИ, 1971.
31. *Адкинс Б.* Общая теория электрических машин. — М.: ГЭИ, 1966.

32. *Уайт Д., Вудсон Г.* Электромеханические преобразования энергии. — М.: Энергия, 1973.
33. *Демирчян К.С.* Моделирование магнитных полей. — Л.: Энергия, 1974.
34. *Иванов-Смоленский А.В., Кузнецов В.А.* Методы расчета магнитных полей. — М.: МЭИ, 1979.
35. *Налимов В.В.* Теория эксперимента. — М.: Наука, 1971.
36. *Постников И.М.* Выбор оптимальных геометрических размеров в электрических машинах. — М.: ГЭИ, 1952.
37. *Смит Джон М.* Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. — М.: Машиностроение, 1980.
38. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1973.
39. *Демирчян К.С., Чечурин В.Л.* Машинный расчет электромагнитных полей. — М.: Высшая школа, 1985.
40. *Бусленко И.П., Шрейдер Ю.Л.* Метод статистических испытаний (Монте-Карло). — М.: Физматгиз, 1961.
41. *Стронгин Р. Г.* Численные методы в многоэкстремальных задачах. — М.: Наука, 1978.
42. *Геминтерн В.И., Казан Б.М.* Методы оптимального проектирования. — М.: Энергия, 1980.
43. *Соболь И.М., Статников Р.Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981.
44. *Лазарев И.А.* Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1976.
45. *Аветисян Д.А.* О синтезе электрических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, №2.
46. *Винский О.В., Коляда В.К., Сыроежкин А.В.* Экономико-математическая модель системы электроснабжения летательного аппарата // Сб. трудов всесоюзного семинара АН СССР «Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств». Вып. 3. — Челябинск, 1982.
47. *Коляда В.К.* Расход топлива на функционирование самолетных ЭЭС // Сб. трудов всесоюзного семинара АН СССР «Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств». Вып. 3. Челябинск, 1982.
48. *Аветисян Д.А., Пищулова Н.М.* Решение задачи оптимального формирования кабелей систем автоматики методами дискретной оптимизации // Изв. РАН. Энергетика, 1993, № 5.
49. *Синдеев И.М.* Электроснабжение летательных аппаратов. — М.: Транспорт, 1982.
50. *Бертинов А.И., Мизюрин С.Р., Геворкян Р.Л.* Повышение степени использования синхронного генератора, работающего на импульсную нагрузку // Электричество, 1969, № 8.
51. *Веников В.А.* и др. Электрические системы. — М.: Высшая школа, 1976.
52. *Щедрин О.П.* Эквивалентирование линий при выборе сечений проводов разветвленных разомкнутых сетей // Электричество, 1985, № 11.
53. Автоматизация проектирования раскладки жгутов / *Д.А. Аветисян, В.В. Козлов, В.Б. Баль* и др. // Электротехника, 1990, № 8.
54. Автоматическая линия для сборки магнитной системы электромагнитного реле / *Д.А. Аветисян, В.А. Цехмейструк, Г.Н. Никогосян* и др. // Авт. свид. СССР, № 760227, 1990.
55. Поточная автоматизированная линия для сборки реле // *Д.А. Аветисян, М.С. Уколов, В.А. Цехмейструк* и др. // Авт. свид. СССР, № 555459, 1989.
56. Автоматизация поискового конструирования / Под ред. *А.М. Половинкина* — М.: Радио и связь, 1981.
57. *Антонов М.В., Герасимов Л.С.* Технология производства электрических машин. — М.: Энергоиздат, 1982.
58. *Хрущев В.В.* Электрические микромашины автоматических устройств. — Л.: Энергия, 1976.

Оглавление

Предисловие.....	3
ГЛАВА 1. Введение в автоматизацию проектирования.....	10
§ 1.1. Развитие методов и средств проектирования.....	10
§ 1.2. Концептуальные основы САПР.....	16
§ 1.3. Функциональная структура САПР.....	20
§ 1.4. Типовые компоненты САПР.....	26
§ 1.5. Создание и развитие САПР.....	32
§ 1.6. Этапы и подсистемы проектирования в САПР.....	37
§ 1.7. Организация проектирования в САПР.....	44
ГЛАВА 2. Формализация задач и методов проектирования.....	52
§ 2.1. Структуризация процессов проектирования ЭТС.....	52
§ 2.2. Постановка задач проектирования в САПР.....	61
§ 2.3. Общая формулировка задач проектирования ЭТС.....	68
§ 2.4. Декомпозиция общей задачи.....	74
§ 2.5. Приведение к задачам математического программирования.....	78
§ 2.6. Методы линейного и нелинейного программирования.....	85
§ 2.7. Методы динамического, геометрического и дискретного программирования.....	109
ГЛАВА 3. Моделирование объектов и процессов проектирования.....	123
§ 3.1. Развитие методов и средств моделирования.....	123
§ 3.2. Системный подход к моделированию.....	126
§ 3.3. Теоретические методы моделирования.....	133
§ 3.4. Статистические методы моделирования.....	148
§ 3.5. Кибернетические методы моделирования.....	155
§ 3.6. Переход к вычислительным моделям.....	164
§ 3.7. Моделирование процессов оптимизации.....	172
ГЛАВА 4. Структурно-параметрический синтез систем.....	188
§ 4.1. Постановка задачи синтеза.....	188
§ 4.2. Математическая модель однокритериальной задачи синтеза.....	191
§ 4.3. Алгоритмы однокритериального синтеза (общий случай).....	195
§ 4.4. Алгоритмы однокритериального синтеза (линейный случай).....	198
§ 4.5. Многокритериальный синтез.....	202
§ 4.6. Критерии анализа самолетных ЭЭС.....	206
§ 4.7. Автоматизированный синтез самолетных ЭЭС.....	214
ГЛАВА 5. Структурно-топологический синтез систем.....	224
§ 5.1. Постановка задачи синтеза.....	224
§ 5.2. Математическое моделирование задачи синтеза.....	229
§ 5.3. Переход к задаче динамического программирования.....	233
§ 5.4. Геометрическое моделирование топологии пространства.....	237
§ 5.5. Вычислительные алгоритмы синтеза.....	243
§ 5.6. Синтез самолетных электросетей.....	246
§ 5.7. Синтез кабельных связей систем автоматики.....	250

ГЛАВА 6. Синтез принципиальных схем систем.....	256
§ 6.1. Задачи синтеза.....	256
§ 6.2. Общий алгоритм синтеза.....	261
§ 6.3. Детализация потребителей электроэнергии.....	266
§ 6.4. Детализация электрических сетей.....	268
§ 6.5. Детализация систем электроснабжения.....	277
§ 6.6. Изображение принципиальных схем.....	286
§ 6.7. Размещение и трассировка электросвязей.....	291
ГЛАВА 7. Анализ физических процессов.....	297
§ 7.1. Задачи анализа и моделирования.....	297
§ 7.2. Математическое моделирование источников электроэнергии.....	303
§ 7.3. Математическое моделирование регуляторов напряжения.....	312
§ 7.4. Математическое моделирование преобразовательных устройств.....	326
§ 7.5. Математическое моделирование потребителей электроэнергии.....	336
§ 7.6. Функциональный анализ самолетных электросистем.....	342
§ 7.7. Анализ переходных процессов авиационных асинхронных двигателей	346
ГЛАВА 8. Синтез физических процессов.....	350
§ 8.1. Задачи синтеза управляемых процессов.....	350
§ 8.2. Оптимальное управление конечным состоянием.....	353
§ 8.3. Оптимальное управление по быстродействию.....	357
§ 8.4. Стабилизация напряжения синхронного генератора.....	361
§ 8.5. Циклическая зарядка—разрядка емкостного накопителя.....	364
§ 8.6. Синтез электросистем с импульсными приемниками энергии.....	371
ГЛАВА 9. Конструкторско-технологическое проектирование самолетных ЭЭС.....	393
§ 9.1. Задачи и методы.....	393
§ 9.2. Оптимизация сечения проводов.....	397
§ 9.3. Оптимальный выбор электросоединителей.....	408
§ 9.4. Конструирование жгутов.....	418
§ 9.5. Конструирование распределительных устройств и коробок, пультов управления и приборных досок.....	426
§ 9.6. Монтажно-технологическое проектирование.....	436
§ 9.7. Автоматизация сборочных технологий.....	444
ГЛАВА 10. Проектирование авиационных электрических машин.....	455
§ 10.1. Особенности расчетно-теоретического проектирования.....	455
§ 10.2. Особенности конструкторско-технологического проектирования.....	462
§ 10.3. Анализ и выбор технологических допусков.....	472
§ 10.4. Оптимизация проектов авиационных синхронных генераторов.....	479
§ 10.5. Оптимизация проектов бесконтактных индикаторных сельсинов.....	484
§ 10.6. Оптимизация проектов асинхронных двигателей переменной частоты.....	488
§ 10.7. Оптимизация проектов конструктивно-подобного ряда ЭМ.....	496
Список основных сокращений.....	507
Список литературы.....	508