



В.В. СЕНЬКО

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЭС**

Учебное пособие

Тольятти
ТГУ
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Электротехнический факультет
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

В.В. Сенько

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЭС**

Учебное пособие

Второе издание

Тольятти
ТГУ
2011

УДК (621.31: 658.512.01.56)(075.8)

ББК 31.29-05

С31

Рецензенты:

и.о. директора ЛИО «Институт качества», к.т.н., доцент *Д.И. Панюков*;
завкафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета,
д.т.н., профессор *Л.С. Зимин*.

С31 Сенько, В.В. Системы автоматизированного проектирования СЭС : учеб. пособие / В.В. Сенько. – 2-е изд. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 44 с.

В пособии рассмотрены вопросы методологии инженерного проектирования, описана технология параллельного проектирования, показаны структура и состав систем автоматизированного проектирования (САПР), принципы разработки САПР для систем электроснабжения промышленных предприятий и объектов электроэнергетики. Также были представлены общие вопросы развития и базовые информационные технологии САПР-Электро – системы CAD/CAM/CAE, программное и аппаратное обеспечение. В пособие вошли базовые понятия и определения по дисциплине, а также перечень вопросов для самоконтроля знаний.

Предназначено для студентов специальностей 140211 «Электроснабжение», 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и подготовки магистров по направлениям 140600.68 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника».

Научный редактор: завкафедрой ЭСиЭТ к.т.н., доцент В.В. Вахнина.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© В.В. Сенько, 2007

© Тольяттинский государственный университет, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования ГОСТ вынуждают инженеров-электриков проектировать системы электроснабжения максимально быстро и точно, так чтобы вновь проектируемая *система электроснабжения* (СЭС) не была морально устаревшей к моменту завершения стадии проектирования, а подготовленный комплект документации можно было действительно использовать на этапе строительства. Это трудно осуществить, не используя для этого новые информационные технологии и передовое техническое обеспечение. Для эффективного использования рабочего времени и творческого потенциала разработчика СЭС необходимо использовать *систему автоматизированного проектирования* – САПР.

Основные задачи автоматизации проектирования СЭС следующие:

- повысить качество и технико-экономический уровень проектируемых систем, в том числе при их сооружении, эксплуатации и использовании;
- повысить производительность труда инженеров-проектировщиков и стабилизировать их численность;
- сократить сроки и уменьшить стоимость и трудоемкость проектирования.

Основная цель курса «Системы автоматизированного проектирования» – дать студентам основы теоретических и практических знаний, которые являются фундаментом для решения задач автоматизации процесса проектирования систем электроснабжения (СЭС).

Программа курса «Системы автоматизированного проектирования» (САПР) специальности 100400 рассчитана на обучение специалиста на завершающей стадии обучения (11-й семестр на заочной форме обучения). Программой курса в объеме подготовки инженера-электрика предусматривается практическое внедрение в учебный процесс основных принципов и методов проектирования СЭС с использованием современных информационных технологий и средств вычислительной техники.

Программа курса базируется на знании дисциплин: «Инженерная графика», «Основы технического творчества», «Математические задачи энергетики», «Электроснабжение», «Системы электроснабжения», «Эксплуатация систем электроснабжения», «Автоматизация систем электроснабжения». Этот курс увязывается с дисциплинами специализации: «Проектирование и оптимизация СЭС предприятий», «Инженерный эксперимент», «Энергосбережение», «Надежность электроснабжения».

При изучении курса на практических занятиях используются графические пакеты AutoCAD, Компас, CASE-средства моделирования и программирования, а также специальное прикладное программное

обеспечение для решения конкретных задач проектирования систем электроснабжения.

За время изучения данного курса студенту необходимо освоить:

- принципы и цели автоматизации проектирования СЭС;
- стадии и состав автоматизированного проектирования электроснабжения ПП;
- инструментальное обеспечение САПР-Электро (аппаратную и программную часть);
- лингвистическое, графическое и организационное обеспечения САПР электроснабжения;
- применение CASE-технологий для решения задач автоматизации проектирования СЭС.

Во время практических занятий студенту необходимо научиться:

- использовать ПЭВМ для создания расчетной части проекта СЭС;
- создавать прикладные программы для САПР-Электро с помощью CASE-средств Delphi, VBasic;
- работать в графических средах AutoCAD 2000/2006, Компас и Компас-Электрик;
- проектировать СЭС с помощью пакетов WinELSO, ElectiCS, CADElectro и др.

Основные задачи курса:

- иметь представление о принципах и методах автоматизации проектирования СЭС;
- обучить моделированию в стандартных графических пакетах;
- уметь разрабатывать прикладное программное обеспечение задач проектирования систем электроснабжения.

В начале семестра студенту выдаётся индивидуальное расчётное задание, связанное с разработкой программного продукта или графической модели СЭС и её элементов в САД-пакетах. В конце семестра проводится научно-технический семинар (в форме устных докладов) по результатам сделанных студентами научно-исследовательских работ по наиболее перспективным направлениям применения САПР в электроэнергетике. Студенты заочной формы обучения в течение семестра выполняют контрольные работы по дисциплине, а в качестве итоговой аттестации сдают зачёт.

На базе этого курса студенты более подробно изучают вопросы автоматизации проектирования СЭС и учатся использовать полученные знания при дипломном проектировании.

1. ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. Базовые понятия и структура процесса проектирования

Анализу на предмет выделения компонентов САПР, нуждающихся в экспертном сопровождении, следует подвергнуть не только подсистему моделирования объекта проектирования, но и множество операций, которые совершает коллектив проектантов над этой подсистемой.

На основе этого анализа представляется разумным установить, насколько поддается формализации инженерная деятельность в среде САПР.

Проектная процедура – совокупность действий над модельным представлением объекта проектирования, приводящая к принятию решения и характеризующаяся повторяемостью, воспроизводимостью и инвариантностью к модели объекта.

Проектное решение – форма описания объекта проектирования или его компонент, отображающая знание проектанта о способе или методе обеспечения выполнения требований части *технического задания* (ТЗ). *Проектная операция* – часть проектной процедуры, инвариантная к группе проектных процедур.

Этап проектирования – совокупность проектных процедур с определенной, заранее детерминированной, последовательностью их выполнения, обеспечивающая выполнение всех требований ТЗ при выработке проектных решений. *Маршрут проектирования* – совокупность проектных процедур, в которой можно выделить альтернативные по способу выполнения, но аналогичные по характеру проектных решений, этапы проектирования.

Критерий принятия проектного решения – количественное представление одного или нескольких требований ТЗ, имеющих либо лингвистическое, либо количественное описание, не соответствующее формализму модельного представления объекта проектирования.

Нестрогая классификационная схема (рис. 1) включает в себе основные проектные процедуры, выбор которых продиктован следующими соображениями. Для большинства объектов низшим уровнем проектирования можно считать компонентный. Объект проектирования на этом уровне имеет *структурное* (топологическое) и *параметрическое* описания. Следовательно, любая проектная процедура может быть квалифицирована на структурную и параметрическую.

Техническое задание на объект проектирования – это, как правило, не достаточно корректно поставленная задача. Поэтому при нисходящей технологии проектирования, даже если возможно выполнение процедуры синтеза, проектных решений всегда больше одного по структуре и значениям конструктивных параметров. Уточнение ТЗ

порождает необходимость выполнения процедуры анализа. При восходящем проектировании процедура анализа той или иной гипотетической структуры объекта проектирования становится едва ли не единственно возможной.

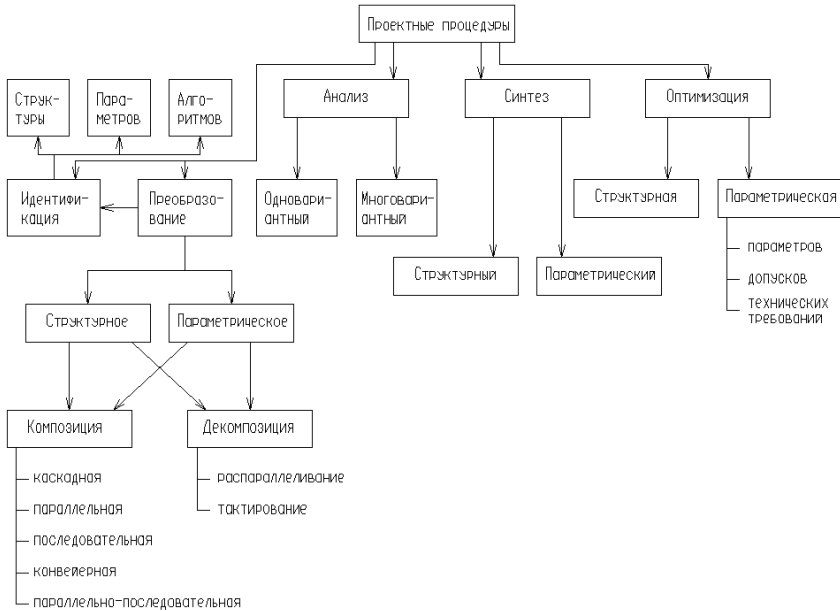


Рис. 1. Проектные процедуры в САПР

Если САПР построена по принципу генерации проектных решений, то процедура оптимизации является одной из основных. Но даже в случае нисходящего проектирования в САПР, допускающего выполнение синтеза по ТЗ без генерации вариантов, уточнение значения конструктивных параметров осуществляется процедурами оптимизации.

В процессе выполнения проектных процедур, перечисленных выше, почти всегда приходится приводить в соответствие способ описания ТЗ, проектного решения способу модельного представления объекта проектирования. Преобразованию может быть подвергнуто либо ТЗ, либо собственно модельное представление. Таким образом, процедура преобразования описаний как структуры, так и параметров является неотъемлемой частью любой САПР.

Множество рассмотренных проектных процедур было бы неверным считать замкнутым по номенклатуре и детализации описания. Процедура анализа понимается как процесс определения выходных

характеристик объекта проектирования при известных входных воздействиях или начальных условиях по какому-либо описанию объекта проектирования (модельному представлению). Одновариантный анализ проводится с целью установления соответствия выходных характеристик требованиям ТЗ. Многовариантный анализ направлен на установление связи между входными данными, выходными характеристиками и конструктивными параметрами.

Решение задачи синтеза обеспечивает получение описания объекта проектирования по ТЗ на объект в виде структуры и совокупности значений конструктивных параметров. Параметрический синтез проводится, если структура синтезируемого объекта оговорена либо ТЗ, либо единственными условиями физической реализуемости (единственный физический принцип, обеспечивающий выполнение ТЗ).

В результате решения задачи синтеза может возникнуть счетное конечное множество проектных решений. Если решение одно, синтезируемый объект будем называть «*оптимальным по ТЗ*». Выбор наиболее предпочтительного, верного варианта конструктивных параметров приводит к полному описанию объекта проектирования, оптимальному по объективному критерию, теоретически и экспериментально разработанному для данного класса технических объектов.

Оптимизация допусков проводится с целью установления совокупности значений каждого конструктивного параметра по заданному теоретически обоснованному критерию. Приведение системы технических требований в наилучшее состояние обеспечивает назначение оптимальных (в смысле теоретически обоснованного критерия) требований к выходным характеристикам объекта проектирования.

Процедуры преобразования осуществляются над множеством лингвистических и математических переменных, цепочки которых образуют запись либо ТЗ, либо проектного решения с целью:

- 1) обеспечения представления ТЗ на метаязыке конкретной САПР;
- 2) представления проектного решения в форме, понятной проектиранту и сформулированной на метаязыке системы;
- 3) обеспечение совместимости проектных процедур.

Процедура преобразования, применяемая к тому или иному проектному решению, записанному в виде топологии объекта проектирования, может осуществляться либо объединением (*композицией*), либо *декомпозицией*. В свою очередь, композиция проектных решений имеет несколько модифицированных представлений.

Каждая из перечисленных процедур может классифицироваться по трем типам процедур: формальной, формализуемой, эвристической. В дальнейшем под *формальной процедурой* будем понимать такую совокупность действий, которая порождает проектное решение

(или счетное множество проектных решений) без участия проектанта. В этом случае проектант только формулирует задачу – назначает входные данные и указывает критерий проектного решения.

Будем называть процедуру *эвристической*, если она не поддается никакому формальному описанию, не может быть описана никаким алгоритмом и при определенных условиях не обеспечивает принятия проектного решения.

Наконец, *формализуемой* будем называть процедуру, которая может лишь частично и формально описываться в виде какого либо алгоритма, иногда даже реализующего численный метод, но исходные данные для нее требуют преобразования, а условия ее протекания, критерии проектных решений – уточнения не только при переходе от одного объекта проектирования к другому, но и в процессе ее выполнения.

Формализуемые процедуры занимают промежуточное положение между формальными и эвристическими. С одной стороны, они протекают с использованием математических моделей, с другой – характер их протекания является экстраполяционным. Например, параметрическая оптимизация, осуществляемая с изменением метода оптимизации. Причем изменение метода происходит в результате анализа как целевой функции, так и влияния ограничений на характер процесса оптимизации. Из сказанного следует, что проектная операция может быть только формальной (по определению). Поэтому можно говорить, что формальная проектная процедура всегда состоит из конечного числа проектных операций. Эвристическая процедура не содержит проектных операций, а формализуемая состоит из несовместных операций, т. е. таких, которые или нельзя применять в любой последовательности и в любом сочетании, или их сочетание нельзя заранее предсказать.

Технология проектирования любого изделия характеризуется Шигли как итеративная процедура, имеющая шесть четко различимых этапов или фаз [1]:

- 1) выявление потребностей;
- 2) постановка задачи;
- 3) синтез проектного решения;
- 4) анализ и оптимизация;
- 5) оценка;
- 6) представление результатов.

Этапы *синтеза* и *анализа* тесно связаны друг с другом и многократно повторяются в процессе проектирования. Итеративный характер этих этапов проявляется в том, что вначале проектировщик определяет концептуальную основу конкретного компонента или узла создаваемой системы, затем эта концепция подвергается анализу, усовершенствованию и повторному воплощению в проектное решение. Этот цикл

повторяется до тех пор, пока не будет получено наилучшее решение в условиях проектных ограничений, учитываемых разработчиком. Спроектированные компоненты и подсистемы синтезируются затем в рамках окончательного проектного решения по всей системе в целом с использованием аналогичных итеративных методов.

Этап *оценки* связан с измерением проектных характеристик конкретного варианта и сопоставлением их с требованиями, установленными на этапе постановки задачи. Для проведения такой оценки часто бывает необходимо изготовить и испытать опытный образец-прототип в целях получения реальных рабочих характеристик, параметров качества, надежности и др. Заключительная фаза процесса проектирования – это представление результатов, включающих документирование проекта с помощью чертежей, спецификаций материалов, сборочных листов и т. п. Естественно, что для подготовки такой документации необходимо иметь надлежащую базу данных. Проект электрического устройства предполагает подготовку электрических схем, спецификации электронных компонентов и т. п. Основные этапы процесса проектирования отображены на рис. 2, где стрелки свидетельствуют об итеративном характере процедур.

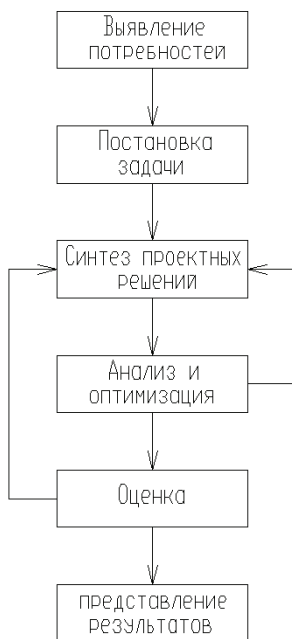


Рис. 2. Типовая схема процесса проектирования по Шигли

В каждой инженерной дисциплине традиционный подход состоял в ручной разработке технического проекта изделия и последующем анализе проектных решений тем или иным способом. Для проведения анализа могут требоваться сложные инженерные расчеты, либо он может основываться на крайне субъективных суждениях об эстетических достоинствах конструкции.

В результате анализа выявляются конкретные усовершенствования, которые можно внести в проектируемый объект. Как уже отмечалось, весь процесс проектирования носит итеративный характер, и на каждой итерации происходит улучшение первоначальных проектных решений, однако неудобство состоит в том, что при отсутствии автоматизации каждый цикл анализа занимает очень много времени, и для завершения всего проекта необходим большой объем трудозатрат.

1.2. Автоматизация процессов проектирования

Разнообразные задачи проектирования, решаемые в современных САПР, можно объединить в четыре группы функций:

- 1) геометрическое моделирование;
- 2) инженерный анализ;
- 3) обзор и оценка проектных решений;
- 4) автоматическое изготовление чертежей.

Эти четыре группы функций соответствуют четырем заключительным фазам предложенной Шигли общей схемы процесса проектирования (рис. 3).



Рис. 3. Область использования ЭВМ в процессе проектирования

Геометрическое моделирование относится к фазе синтеза, в рамках которой проект физического объекта принимает конкретную форму в системе *интерактивной машинной графики (ИМГ)*. *Инженерный анализ* выполняется на четвертом по счету этапе, связанном с анализом и оптимизацией. Вслед за этим на пятом этапе осуществляются *обзор и оценка проектных решений*. Для *автоматического изготовления чертежей* требуется преобразование данных о будущем объекте, хранящихся в памяти ЭВМ, в документальную форму. Такое преобразование выполняется на шестом этапе и обеспечивает представление проектных решений в виде конструкторских чертежей. Ниже каждая из четырех выделенных функций САПР рассматривается более подробно.

Геометрическое моделирование в рамках САПР связано с получением понятного машине математического описания геометрических свойств объекта. При наличии такого описания образ проектируемого объекта можно воспроизвести на экране монитора (графического терминала), а с ним можно манипулировать посредством различных сигналов, идущих от центрального процессора САПР. Программные средства, обеспечивающие геометрическое моделирование, должны быть удобны для эффективного использования их как в вычислительном процессе, так и при человеко-машинном взаимодействии пользователя-конструктора с системой.

Известно несколько различных методов представления объекта при геометрическом моделировании. Основным является способ представления объекта в каркасной форме, когда он отображается совокупностью соединительных линий. Каркасное геометрическое моделирование существует в трех видах – в зависимости от конкретных возможностей используемой системы ИМГ:

- 1) двумерный (типа **2D**) – для плоских объектов;
- 2) двух с половиной мерный, позволяющий воспроизводить на экране трехмерные объекты, не имеющие деталей с боковыми стенками;
- 3) трехмерный (типа **3D**), дающий возможность моделировать сложные геометрические объекты в трехмерном отображении.

Иногда трехмерного каркасного представления проектируемого объекта оказывается недостаточно для надлежащего отображения сложных форм. Поэтому существуют различные методы, расширяющие возможности каркасного моделирования. Возможно, например, отображение внутренних, невидимых снаружи ребер объекта штриховыми линиями или вообще полное «стирание» скрытых линий. В результате изображение становится более упорядоченным и наглядным. В одних САПР удаление скрытых линий происходит автоматически, в других – пользователь должен сам указывать линии, подлежащие стиранию. Каркасная модель может приобрести эстетичный вид в большей

степени, если воспользоваться при геометрическом моделировании средствами отображения поверхностей, позволяющими создать у наблюдателя ощущение монолитности представленного на экране объекта.

Наиболее совершенный метод геометрического моделирования — это объемное представление монолитных тел. При использовании этого метода проектируемый объект конструируется из монолитных геометрических тел, называемых графическими примитивами. Здесь используются методы твердотельного моделирования объектов проектирования.

При выполнении почти любого проекта технического назначения в той или иной форме требуются процедуры анализа. Этот анализ может включать расчеты механических напряжений и усилий, тепловых процессов или даже основываться на решении дифференциальных уравнений, описывающих динамическое поведение проектируемого объекта. В этой связи зачастую бывает необходимо, чтобы группа инженерного анализа для решения конкретных задач проектирования разработала специальные программы. В целом ряде случаев для этого удастся использовать универсальные программы инженерного анализа, имеющиеся в продаже в виде коммерческих пакетов.

В САПР, готовых к непосредственному применению, такие средства либо часто предусматриваются в составе системного программного обеспечения, либо могут включаться в библиотеку программ потом и вызываться для использования в процессе работы с каждой конкретной моделью проектируемого объекта. В нашем пособии остановимся лишь на двух характерных типах подобных программных средств: для решения задач анализа *свойств масс* и *методом конечных элементов*.

Задачи *первого типа* получили в рамках САПР наибольшее распространение. Программные средства для решения этих задач позволяют исследовать такие свойства монолитных объектов, как площадь поверхности, масса, объем, центр тяжести и момент инерции. Применительно к плоским поверхностям (или поперечным сечениям твердых тел) соответствующие вычисления охватывают расчет периметра, площади и инерциальных свойств.

Наиболее мощным инструментом анализа, имеющимся в САПР, является *метод конечных элементов*, в соответствии с которым объект разбивается на большое число элементов конечных размеров (обычно прямоугольников или треугольников), образующих связную сеть узлов концентрации напряжений. Используя богатые вычислительные возможности ЭВМ, можно проанализировать свойства целостного объекта в аспекте возникающих механических усилий, передачи тепла и других характеристик, исследуя поведение каждого отдельного элемента. Оценка поведения целостного объекта производится на основе определения взаимосвязанного поведения всех его узлов.

В некоторых САПР имеется возможность автоматического выделения узлов и получения сетевой структуры для данного объекта. Пользователь при этом должен лишь задать параметры модели на основе метода конечных элементов, и система самостоятельно произведет все нужные вычисления.

Результат анализа по методу конечных элементов зачастую лучше всего отображается системой в графической форме на экране дисплея и легко воспринимается пользователем благодаря наглядности. Если полученные результаты анализа свидетельствуют о нежелательных свойствах поведения проектируемого объекта, конструктор имеет возможность изменить его форму и повторить анализ методом конечных элементов для пересматриваемой конструкции.

Автоматическое черчение предполагает получение выполненных на бумаге конструкторских чертежей непосредственно на основе информации, хранящейся в базе данных САПР. В некоторых автоматизированных конструкторских бюро возможность автоматического изготовления чертежей стала определяющим фактором целесообразности затрат на приобретение САПР, т. к. производительность системы на указанной операции по сравнению с чертежником возрастает примерно в пять раз.

Целый ряд функциональных возможностей ИМГ наилучшим образом проявляется именно в процедурах изготовления чертежей. Сюда относятся автоматическое определение размеров, штриховка нужных областей, масштабирование, а также построение разрезов и увеличенных изображений конкретных элементов деталей. Важную роль в черчении с использованием ЭВМ играет возможность вращения деталей или выполнения иных преобразований изображений (например, для получения косоугольных проекций, построения изометрии или перспективы). Конструкторские чертежи в конкретной фирме могут приводиться в соответствии с принятой системой стандартов путем воплощения требований этих стандартов в определенные машинные программы САПР.

1.3. Технология параллельного проектирования

Параллельное (смешенное) проектирование (С-технология) – это принципиально новый, интегрированный подход к разработке изделий. В основе технологии лежит идея совмещенного проектирования изделия, а также процессов его изготовления и сопровождения, координируемая с помощью специально создаваемой для этой цели распределенной информационной среды. Подобная технология позволяет

использовать проектные данные, начиная с самых ранних стадий проектирования, одновременно различными группами специалистов.

Например, в трех главных конструкторских бюро компании Boeing действует 220 групп «проектирования производства», которые координируют параллельные разработки и состоят из специалистов таких разнообразных областей, как проектирование, технология материалов, производство и взаимодействие с клиентами. Фактически при использовании С-технологии удается достичь «перекрытия» всех стадий *жизненного цикла изделий* (ЖЦИ) (рис. 4).



Рис. 4. Организация ЖЦИ в С-технологии

Развитие С-технологии связано, прежде всего, с повышением значимости для потребителя таких неценовых факторов конкурентоспособности продукции, как качество, способность к быстрому выполнению индивидуального заказа.

Использование подобной организации проектирования изделий, ориентированной на применение новых информационных технологий и интеграцию знаний из различных проблемных областей ЖЦИ «маркетинг – проектирование – производство», позволяет экономить не только время, но и средства за счет повышения качества изделий, сокращения изменений, вносимых в конструкцию на стадии изготовления, и упрощения сервисного обслуживания.

С-технология охватывает все условия и факторы повышения эффективности ЖЦИ, обеспечивает образование интегрального эффекта,

индивидуализирована, так как ее конкретная реализация учитывает особенности предприятия, на котором она внедряется, а также требования заказчика. С-технология обычно внедряется в рамках уже действующего предприятия, конкретные экономические параметры которого и условия функционирования оказывают существенное влияние на результативность ее внедрения. Объектами ее внедрения являются предприятия, поэтому анализ проблем внедрения должен проводиться с учетом внешних (социальных, экономических, политических) и внутренних (производственных) факторов повышения эффективности деятельности предприятий.

Все проектные работы имеют три общих составляющих: спецификация требований (начальное состояние), информационная модель изделия (цель, конечное состояние), средства, обеспечивающие достижение цели. Первая составляющая определяет все доступные для выполнения проектной работы ресурсы и существующие в настоящий момент времени ограничения (внутренние и внешние). Вторая составляющая – это «задача», определение которой требует максимального учета знаний о факторах, которые на нее влияют и формируют. Чем точнее задача поставлена, тем меньше риск, что она не будет выполнена. Третья составляющая – это средства, обеспечивающие максимальную эффективность достижения цели и допускающие переосмотр и изменение в процессе её реализации.

Эффективность С-технологии по сравнению с технологией последовательного проектирования объясняется следующими соображениями.

Пользователи С-технологии по сравнению с традиционной, образно говоря, имеют более «четкую» цель и более «управляемые» средства ее достижения. Качественное сопоставление технологий относительно стоимости реализации стадий ЖЦИ и риска при достижении требуемых характеристик изделия приведено на рис. 5.

С-технология предполагает согласованное проектирование системы «изделие – технологический процесс – производственная система (оборудование-люди)». Соответственно информационной основой технологии является единая информационная модель «изделие – технология – оборудование».

С-технология основывается на использовании технологии поддержки принятия решений и распадается на три стадии (рис. 6): *формирование спецификации требований (А)*, *концептуальное проектирование (В)* и *детализированное проектирование (С)*. На первой стадии осуществляется анализ исходных требований и ограничений, дается оценка возможности нахождения проектного решения, на второй – выбор допустимых (в смысле последующего комплексирования) типов проектных решений (концепций реализации элементов модели предметной области), на третьей – выбор технических решений.

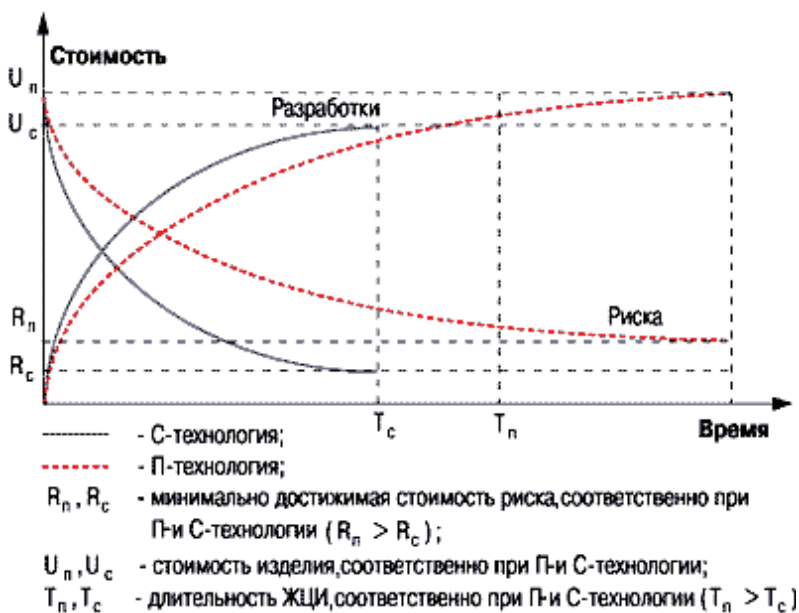


Рис. 5. Сравнительные характеристики технологий

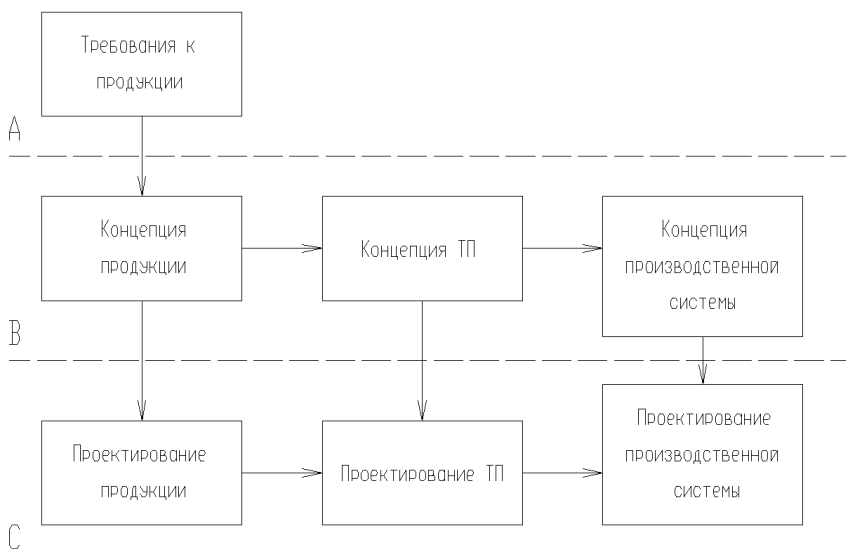


Рис. 6. Основные стадии С-технологий (ТП – технологический процесс)

Основными составляющими С-технологии являются:

- распределенная компьютерная архитектура, обеспечивающая синхронизацию, оптимальное планирование и обработка информации на отдельных стадиях ЖЦИ;
- совокупность инструментальных программных средств (CASE-технология), которые обеспечивают быстрое прототипирование и многокритериальную оптимизацию при проектировании;
- унифицированное и всестороннее представление всей требуемой при проектировании и производстве информации, которая может быть проанализирована в соответствии с потребностями пользователя и рынка.

1.4. Технологии CAD/CAM/CAE

CAD-системы (*computer-aided design* – компьютерная поддержка проектирования) предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации. Как правило, в современные CAD-системы входят системы моделирования трехмерной объемной конструкции (детали) и оформления чертежей и текстовой конструкторской документации (спецификаций, ведомостей и т. д.). Ведущие трехмерные CAD-системы позволяют реализовать идею сквозного цикла подготовки и производства сложных промышленных изделий.

В свою очередь, CAM-системы (*computer-aided manufacturing* – компьютерная поддержка изготовления) предназначены для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи программ для этих станков. CAM-системы еще называют системами *технологической подготовки производства*. В настоящее время они являются практически единственным способом для изготовления сложнопрофильных деталей и сокращения цикла их производства. В CAM-системах используется трехмерная модель детали, созданная в CAD-системе.

CAE-системы (*computer-aided engineering* – поддержка инженерных расчетов) представляют собой обширный класс систем, каждая из которых позволяет решать определенную расчетную задачу (группу задач), начиная от расчетов на прочность, анализа и моделирования тепловых процессов до расчетов гидравлических систем и машин, расчетов процессов литья. В CAE-системах также используется трехмерная модель изделия, созданная в CAD-системе. CAE-системы еще называют *системами инженерного анализа*.

CAD/CAM/CAE-системы занимают особое положение среди других приложений, поскольку представляют индустриальные технологии, непосредственно направленные на наиболее важные области

материального производства. За последние годы CAD/CAM/CAE-системы прошли путь от сравнительно простых чертежных приложений до интегрированных программных комплексов, обеспечивающих единую поддержку всего цикла разработки, начиная от эскизного проектирования и заканчивая технологической подготовкой производства, испытаниями и сопровождением.

Современные CAD/CAM/CAE-системы не только дают возможность сократить срок внедрения новых изделий, но и оказывают существенное влияние на технологию производства, позволяя повысить качество и надежность выпускаемой продукции (повышая, тем самым, ее конкурентоспособность). В частности, путем компьютерного моделирования сложных изделий проектировщик может зафиксировать нестыковку ещё на ранних стадиях проектирования, что позволит сэкономить на стоимости изготовления физического прототипа.

За период существования CAD/CAM/CAE-систем сложилась их общепринятая международная классификация:

- чертежно-ориентированные системы;
- системы, позволяющие создавать трехмерную электронную модель объекта, которая дает возможность решения задач его моделирования вплоть до момента изготовления;
- системы, поддерживающие концепцию полного электронного описания объекта (EPD – *Electronic Product Definition*).

EPD – это технология, которая обеспечивает разработку и поддержку электронной информационной модели на протяжении всего жизненного цикла изделия, включая маркетинг, концептуальное и рабочее проектирование, технологическую подготовку, производство, эксплуатацию, ремонт и утилизацию. При применении EPD-концепции предполагается замещение «компонентно-центрического» последовательного проектирования сложного изделия на «изделие-центрический» процесс, выполняемый проектно-производственными командами, работающими коллективно. Вследствие разработки EPD-концепции и появились основания для превращения автономных CAD-, CAM- и CAE-систем в интегрированные CAD/CAM/CAE-системы.

Традиционно существует также деление CAD/CAM/CAE-систем на системы верхнего, среднего и нижнего уровней. Следует отметить, что это деление является достаточно условным, т. к. сейчас наблюдается тенденция приближения систем среднего уровня (по различным параметрам) к системам верхнего уровня, а системы нижнего уровня все чаще перестают быть просто двумерными чертежно-ориентированными и становятся трехмерными. Примерами CAD/CAM-систем верхнего уровня являются ProEngineer, Unigraphics, CATIA, EUCLID, IDEAS (все они имеют расчетную часть – CAE).

В настоящее время на рынке широко используются два типа твердотельного геометрического ядра (Parasolid от фирмы Unigraphics Solutions и ACIS от Spatial Technology). Наиболее известными CAD/CAM-системами среднего уровня на основе ядра ACIS являются: AutoCAD 2000, Mechanical Desktop и Autodesk Inventor (Autodesk Inc.); ADEM (Omega Technology); Cimatron (Cimatron Ltd.); CADdy++ Mechanical Design (Ziegler Informatics GmbH) и др. К числу CAD/CAM-систем среднего уровня на основе ядра Parasolid принадлежат, в частности, Pro/Desktop (Parametric Technology Corp.); SolidWorks (SolidWorks Corp.); Solid Edge и Unigraphics Modeling (Unigraphics Solutions); IronCAD (VDS) и др.

CAD-системы нижнего уровня (например, AutoCAD LT, Medusa, TrueCAD, КОМПАС и др.) применяются только при автоматизации чертежных работ.

Проектная фирма Southern Company Engineering (USA) является отделением компании Southern Company Services (USA), крупного производителя электроэнергии в США. Для улучшения координации проектных работ руководство проектных подразделений решило попытаться представить всю электрическую станцию в виде трехмерной компьютерной модели с помощью соответствующей программы. В результате анализа наиболее подходящей оказалась программа «AutoPLANT 97» фирмы Rebis. Эта программа является профессионально ориентированным приложением для AutoCAD и использует те же самые меню и графическое ядро для моделирования. Southern Company Engineering (USA) использовала пакет AutoPLANT 97 для разработки проектов двух электростанций. Один из них, названный проектом Olin, это проект тепловой Электрической станции (ТЭС), вырабатывающей 112 *MВт* электроэнергии. Для ее строительства должна была быть использована сравнительно небольшая строительная площадка. Вторая станция, названная станцией Вагу, это ТЭС, вырабатывающая 532 *MВт* электроэнергии. Две группы, один инженер-механик и один проектировщик, разработали проект всей трубопроводной обвязки станций, включая изготовление 250 изометрических чертежей для каждой.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные цели автоматизации проектирования СЭС. С помощью применения каких технологий их можно достичь?
2. Дайте определение понятиям: проектные операция и процедура, проектные решение и маршрут, этап и стадия проектирования.
3. Какие виды проектных процедур могут быть использованы в САПР и САПР-Электрo?
4. Какие этапы входят в типовую схему проектирования (по Шигли)? Приведите их область назначения и основные функции.

5. Какие типовые задачи автоматизации проектирования характерны для САПР-Электро?
6. В чём особенность параллельного (смешанного проектирования)? Для каких энергетических объектов его можно применить?
7. Перечислите преимущества и недостатки технологии CAD/CAM/CAE. В чём заключаются основные трудности их внедрения в электроэнергетике?

2. СТРУКТУРА И СОСТАВ САПР СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1. Особенности автоматизации проектирования СЭС промышленных предприятий

Системы электроснабжения (СЭС) как объект проектирования обладают рядом свойств:

- 1) *уникальностью* – каждая СЭС не имеет полных аналогов по числу и составу элементов, структуре и поведению;
- 2) *слабой предсказуемостью* – никакое самое подробное знание функций элементов и структуры сети не позволяет формально описать функцию системы, а сколь угодно точное описание поведения СЭС на временном интервале не позволяет точно предсказать поведение системы на произвольном интервале $[0, t]$;
- 3) *целенаправленностью* – способность СЭС устранять последствия внешних и внутренних воздействия, осуществлять достижение определенной цели.

Признаком сложной системы является свойство слабой предсказуемости поведения, которое для СЭС промышленных предприятий заключается в соответствии расчетных электрических нагрузок их фактическим значениям. Как известно, иногда наблюдается недостаточная (менее 20%) загрузка цеховых КТП, трансформаторов ГПП и ПГВ. Поскольку синтез схемы и определение оптимальных параметров элементов СЭС полностью основывается на расчетных значениях электрических нагрузок, достаточная достоверность методов их определения может оказаться сдерживающим *фактором* в развитии методов оптимизации в САПР ЭС.

В системотехнике существует три принципа, на которых основаны исследования, создание и использование сложных систем: физичность, моделируемость, целенаправленность.

Принцип *физичности* опирается на постулат целостности, который гласит: «Сложная система должна рассматриваться как единое целое, причем ни при композиции, т. е. объединении подсистем в систему, ни при декомпозиции, т. е. при любом из вариантов членения системы недопустима потеря понятий». Одним из аспектов постулата целостности является неразрывность во времени процессов производства и потребления электрической энергии, обусловленная отсутствием способов и средств аккумуляирования энергии в промышленных масштабах. Это приводит к тому, что параметры режима СЭС, определяющие ее поведение: активные и реактивные мощности, токи, напряжения

в узлах, частота и т. п. характеризуются высокой скоростью изменения во времени и зависят от параметров режима питающей энергосистемы. Особенностью поведения СЭС является чрезвычайно малая ее инерционность в переходных режимах, например, при коротких замыканиях. При этом скорость изменения режима намного превосходит скорость реакции человека-диспетчера, что вынуждает использовать устройства противоаварийной автоматики и управления с высоким быстродействием.

В то же время при отсутствии электроприёмников (ЭП) с резкопеременным характером нагрузки и стабильном производственном процессе режимы СЭС изменяются значительно медленнее и позволяют выявить устойчивые и специфические суточные, недельные, декадные и годовые компоненты в графиках нагрузок $P(t)$ и $Q(t)$.

Принцип *моделируемости* состоит в том, что сложную систему представляют конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань сущности этой системы. Модель – это условный образ объекта проектирования, выявляющий его основные свойства (взаимосвязи, характеристики, параметры). Модель, ориентированная на определенную группу свойств сложной системы, всегда проще самой системы.

Для большинства традиционных проектных процедур математическая постановка неочевидна, а их последующая (прямая) алгоритмическая реализация известными математическими методами зачастую неэффективна. При этом ведущая роль в процессе проектирования и принятия проектных решений в САПР сохраняется за человеком, поскольку существуют функции, невыполнимые формальными методами с приемлемыми затратами времени и средств. В результате процесс автоматизированного проектирования сводится к решению конечной последовательности задач приемлемой сложности в режиме взаимодействия человека и ЭВМ.

Специфика проектных задач и требование взаимодействия человека и ЭВМ выдвигают дополнительные требования к техническим средствам САПР – требуются устройства оперативного обмена информацией, документирования и архива проектных решений, создание базы знаний, сохраняющей накопленный опыт проектирования. Поэтому автоматизация проектирования как научно-техническая дисциплина включает:

- методологию проектирования и математическое обеспечение;
- программно-информационное обеспечение, базы данных, пакеты прикладных программ, операционные системы ЭВМ;
- технические средства, автоматизированные рабочие места проектировщиков (АРМ-П) с учетом специфики СЭС как объекта проектирования.

2.2. Основные принципы и задачи проектирования СЭС

Известны следующие основные принципы проектирования технических систем:

- сверху вниз (*нисходящее проектирование*), когда решение задач более высоких иерархических уровней предшествует решению задач низших уровней;
- снизу вверх (*восходящее проектирование*), при котором ранее выполняются этапы низших уровней.

При нисходящем проектировании система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще неизвестны и системные функции определяют требования к ним. При восходящем проектировании элементы проектируются раньше системы, и их функциональные возможности определяют и ограничивают возможности системы. Процесс первого типа позволяет проектировать эффективные системы, но требует широкой номенклатуры электротехнических аппаратов, изделий и материалов. Во втором случае наблюдается обратное: можно обойтись узкой номенклатурой элементов, но при этом снижается общая эффективность системы. В любом случае процесс проектирования носит многоэтапный итеративный характер, что также является одним из принципов проектирования.

На практике обычно сочетают нисходящее и восходящее проектирование, причем целью любой методологии проектирования является снижение возможного числа итераций в проектной процедуре. Поэтому различают *стратегию проектирования* – поиск и определение последовательности процедур и операций, необходимых и достаточных для решения сформулированной технической задачи в приемлемые (возможно минимальные) сроки с допустимыми трудозатратами.

Технологией проектирования называют опробованную последовательность процедур и операций, приводящую к цели, определяемой стратегией при проектировании объектов некоторого класса.

Теорией и практикой проектирования СЭС выработан ряд специфических принципов, не всегда поддающихся строгой формализации: дробление подстанций; объединение линий; построение минимально разомкнутой сети; вставка дополнительных узлов и др. Поэтому первоочередной задачей теории проектирования СЭС следует считать разработку стратегии проектирования, ориентированной на автоматизацию на основе анализа и моделирования типовых проектных процедур.

Достижение этих целей возможно лишь при комплексной автоматизации проектных процедур на основе анализа и моделирования, необходимость которой заключается в требовании оптимального разделения проектных работ между проектировщиком (или их группой)

и ЭВМ. Задача состоит в создании человеко-машинной системы, в которой человек и машина будут взаимно дополнять друг друга: с одной стороны, следует использовать эвристические способности, опыт и интуицию инженера, а с другой – возможности ЭВМ как эффективного средства хранения и обработки больших информационных массивов (способность ЭВМ решать задачи а) легко поддающиеся математической формализации; б) трудоемкие, требующие многократного выполнения однотипных операций, значительных затрат времени, запоминания и обработки больших информационных массивов).

Задачи, которые удается математически формализовать и алгоритмизировать:

- хранение и переработка информации (организация библиотек моделей и параметров элементов; библиотек прикладных программ; представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме; организация архива схемных решений и т. д.);
- расчет параметров СЭС в случаях, для которых существует алгоритмизируемая методика;
- анализ (расчет характеристик) схем;
- поиск лучшего решения по формальным критериям.

Развитие средств вычислительной техники и математики, электрооборудования потребует периодического пересмотра концепций, лежащих в основе той или иной стратегии проектирования. Модели, полученные таким образом, должны обеспечивать возможность многовариантной оптимизации проектных решений, требуя тем самым создания САПР высокоавтоматизированного проектирования.

Анализ проектной документации СЭС показывает, что в конструкторских и графических работах большой объем занимает техническая документация на разработку *низковольтных (до 1000 В) комплектных устройств (НКУ)*, передаваемая заводам-изготовителям, и задания *монтажно-заготовительным участкам (МЗУ)* на закладные детали и монтаж секций шинопроводов.

На этапе конструкторской разработки решаются следующие задачи:

- компоновка аппаратов и приборов НКУ по панелям и шкафам щита;
- привязка аппаратов и приборов на плоскостях панелей и дверей с учетом геометрии элементов и ограничений (технологических и схемотехнических);
- трассировка соединений электрических цепей;
- изготовление графической документации (схем электрических соединений, конструктивных узлов и видов щитов, панелей, шкафов).

Это предопределяет наличие средств компьютерной графики в составе САПР-Электро и, следовательно, необходимость разработки

и исследования оптимальных по времени (и другим характеристикам) алгоритмов машинной геометрии.

Особенности СЭС как объекта проектирования обуславливают необходимость создания в САПР ЭС специфической автоматизированной подсистемы научных исследований (АСНИ) для формирования единой информационной базы характеристик электропотребления, динамика которых должна изучаться систематически.

По характеру и степени участия человека и использования ЭВМ в процессе проектирования различают следующие режимы: *ручной*; *автоматический*, когда отдельный маршрут проектирования выполняется без вмешательства человека в ход решения; *автоматизированный*, в случае выполнения части проектных процедур человеком, а части – ЭВМ; *диалоговый* (интерактивный), при котором все проектные процедуры маршрута проектирования выполняются ЭВМ, а участие человека заключается в выборе пути решения и корректировке хода проектирования на основе оперативной оценки результатов процедур или операций.

Несмотря на необходимость повышения степени автоматизации проектирования, все режимы в САПР электроснабжения будут использоваться еще достаточно длительное время. По мере развития методологии САПР и теории электроснабжения будет изменяться доля каждого из режимов в едином процессе проектирования СЭС.

Для всех стадий создания САПР характерны следующие принципы:

- *системное единство* – связи между подсистемами САПР должны обеспечивать целостность системы;
- *развитие* – САПР должна создаваться и функционировать с учетом пополнения, совершенствования и обновления подсистем;
- *совместимость* – языки, символы, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами, средствами обеспечения и компонентами САПР должны обеспечивать совместное функционирование подсистем и сохранять открытую структуру системы в целом;
- *стандартизация*, заключающаяся в унификации и типизации подсистем и компонентов, инвариантных проектируемым объектам и отраслевой специфике.

Таким образом, автоматизация проектирования СЭС – это систематическое применение ЭВМ в проектировании на основе моделей объекта и процесса проектирования и научно обоснованного разделения функций между человеком и ЭВМ.

2.3. Структура и состав САПР систем электроснабжения

САПР представляет собой организационно-техническую систему, состоящую из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с подразделениями проектной организации. Их создание, внедрение и развитие регламентируется системой Государственных стандартов.

Комплекс средств автоматизации проектирования включает техническое, методическое, математическое, лингвистическое, информационное, программное и организационное обеспечение (рис. 7).

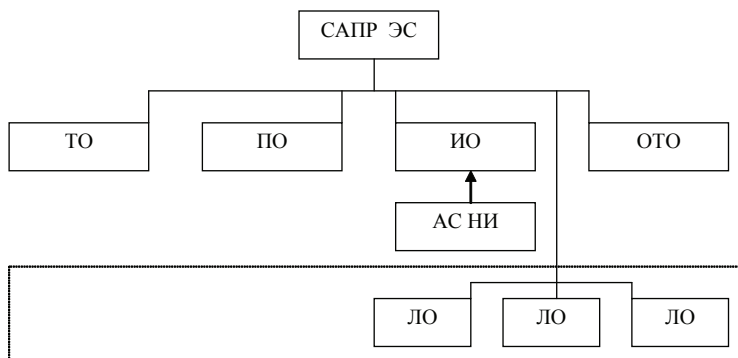


Рис. 7. Виды обеспечения САПР

Техническое обеспечение (ТО) САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств и делится на группы средств программной обработки, подготовки и ввода данных, отображения и документирования, архива проектных решений, передачи данных.

Программное обеспечение (ПО) объединяет собственно программы и алгоритмы для систем обработки данных на машинных и бумажных носителях и программную документацию. Программное обеспечение подразделяется на *общесистемное*, *базовое* и *прикладное*. *Общесистемное ПО* предназначено для планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов и представлено совокупностью операционной системы ЭВМ и системных утилит. В *базовое ПО* входят обслуживающие программы, обеспечивающие правильное функционирование прикладных программ (например, графическое ядро САПР). *Прикладное ПО* реализует математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур и имеет форму пакетов прикладных программ (ППП), каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или группу однотипных задач в рамках отдельных этапов.

Математическое обеспечение (МО) САПР объединяет математические модели проектируемых объектов, методы и алгоритмы выполнения проектных процедур. В числе элементов МО имеются инвариантные (относительно объектов проектирования) методы численного решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, поиска экстремума.

Информационное обеспечение (ИО) объединяет данные, представленные в виде документов на различных носителях, содержащие сведения справочного характера о типовых проектных решениях, параметрах элементов и комплектующих изделий, структурах и параметрах проектируемых объектов, состоянии текущих проектных разработок (промежуточные проектные решения). Основу ИО составляет банк данных, представляющий собой совокупность средств для накопления и коллективного использования их в САПР. *Банк данных* (БНД) состоит из *базы данных* (БД) и системы *управления БД* (СУБД). *База данных* – это собственно данные, находящиеся в запоминающих устройствах и структурированные в соответствии с принятыми в данном БНД правилами. *Система управления базой данных* представляет собой совокупность программных средств, обеспечивающих запись данных в БНД, их выборку по запросам пользователей или прикладных программ, защиту данных от искажений и несанкционированного доступа к ним.

Лингвистическое обеспечение (ЛО) – совокупность языков, применяемых для описания процедур автоматизированного проектирования; основа ЛО – языки общения пользователя с ЭВМ.

Методическое обеспечение (МТО) – совокупность документов, характеризующих состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования. При более широком толковании в состав МТО включают также математическое и лингвистическое обеспечение.

Организационное (организационно-технологическое) обеспечение (ОТО) включает положения, инструкции, приказы и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений проектной организации и порядок взаимодействия комплексов средств между собой и подразделениями организации.

Составными частями САПР являются подсистемы двух видов: проектирующие и обслуживающие.

К *проектирующим* относятся подсистемы, выполняющие проектные процедуры и операции.

Обслуживающими являются подсистемы, предназначенные для поддержания работоспособности следующих проектирующих подсистем:

- графического отображения объектов проектирования;
- информационного поиска;
- документирования.

Существуют два вида проектирующих подсистем, различающихся отношением к объекту проектирования:

1) *объектные* (объектно-ориентированные), выполняющие одну или несколько проектных процедур или операций, непосредственно зависящих от конкретного проектируемого объекта;

2) *инвариантные* (объектно-независимые), выполняющие унифицированные проектные процедуры и операции.

Компонентом САПР называют элемент обеспечения, выполняющий определенную функцию в подсистеме, например, компонентами технического обеспечения являются устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных и др. Возможность широкого внедрения САПР в практику проектирования обеспечивается за счет тиражирования и использования при создании новых САПР комплексов средств и компонентов различных обеспечений. Виды компонентов и комплексов средств для САПР приведены на рис. 8. Комбинированные комплексы подразделяются на *программно-методические* (ПМК) и *программно-технические* (ПТК)

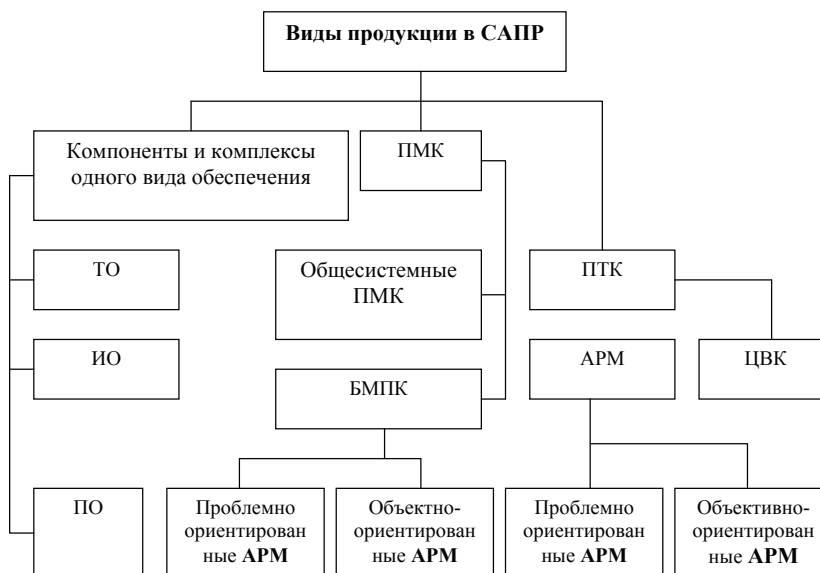


Рис. 8. Виды компонентов и комплексов средств САПР

ПМК представляют собой взаимосвязанную совокупность методического, программного и информационного (а также, при необходимости, компонентов математического и лингвистического) обеспечения, предназначенного для получения законченного проектного

решения по одной или нескольким частям, по всему объекту проектирования в целом или для выполнения унифицированных процедур. По назначению ПМК подразделяются на общесистемные и базовые; в составе последних выделяют объектно-ориентированные и проблемно-ориентированные.

ПТК представляют взаимосвязанную совокупность ПМК с комплексами и (или) компонентами технического обеспечения и подразделяются в зависимости от назначения на *автоматизированные рабочие места* (АРМ) и *центральные вычислительные комплексы* (ЦВК).

Комплексы средств САПР-Электро должны обеспечивать:

- автоматизацию проектирования СЭС;
- заданный научно-технический уровень проектных решений;
- документирование результатов проектирования с необходимой полнотой и в установленных формах;
- простоту и удобство работы пользователя в пакетном и диалоговом режимах с возможностью перехода с режима на режим на любом этапе проектирования.

Вопросы для самопроверки

1. Какими свойствами обладает система электроснабжения как объект проектирования? Как они влияют на создание САПР-Электро?

2. Какие задачи САПР-Электро относятся к формализуемым, а какие – к трудно формализуемым?

3. Какие применяются режимы в работе САПР в зависимости от характера и степени участия человека и использования ЭВМ?

4. В чём особенности нисходящего и восходящего проектирования? Как это учитывается при создании САПР? Приведите примеры.

5. Дайте определения обеспечивающим подсистемам САПР. Как связаны между собой техническое и программное обеспечения САПР-Электро?

6. Какие подсистемы САПР можно отнести к обслуживающим, а какие – к проектирующим?

7. Приведите примеры компонентов и комплексов САПР систем электроснабжения.

3. РАЗРАБОТКА САПР СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

3.1. Проблема создания САПР электрической части промышленного предприятия

Применение ЭВМ к решению каждой конкретной задачи автоматизации проектирования электроснабжения промышленного предприятия (ЭПП) состоит из ряда этапов:

- 1) выявление и создание математической модели объекта;
- 2) анализ задач проектирования, возникающих при исследовании математической модели;
- 3) выбор алгоритмов решения задач проектирования;
- 4) создание, тестирование и установка программного обеспечения (ПО);
- 5) настройка и использование системного ПО;
- 6) проведение расчетов и анализ результатов.

Необходимым условием является понимание системы электроснабжения как технической системы, состоящей из множества готовых изделий, т. е. как отдельного раздела науки и научных проблем, важнейшими из которых являются:

- 1) выделение электрического хозяйства как технической системы нового типа, изучение особенностей его построения, функционирования и развития для формирования критериев оптимизации;
- 2) системное исследование электрического хозяйства, основанное на математическом описании элементов системы в целом и ее отдельных подсистем;
- 3) изучение законов и закономерностей, специфически присущих только электрическому хозяйству;
- 4) выделение крупных подсистем электрического хозяйства и формирование задач целей программно-математического и другого обеспечения САПР подсистемы;
- 5) исследование проектных информационных потоков, возникающих в САПР-Электро, создание локальных баз данных по задачам, по институтам, межотраслевым и отраслевым и т. п.

Общая *теория систем* утверждает, что система обладает свойствами, не присущими элементам, из которых она состоит; сколько бы глубоко и полно не исследовался каждый элемент (и даже все по отдельности), это не приведет к знанию закономерности поведения системы в целом.

На практике *система* всегда есть целостный комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, т. е. целое, которое всегда следует рассматривать как единое со средой, и требующее учета

воздействия этой среды. Создавая часть, всегда следует помнить, что действия проектировщика в конечном итоге должны проявляться в эффективности функционирования всей системы в целом.

3.2. Системное описание СЭС

Условную схему системы электроснабжения современного промышленного предприятия ПП можно представить в виде многоуровневой системы (рис. 9) [2].

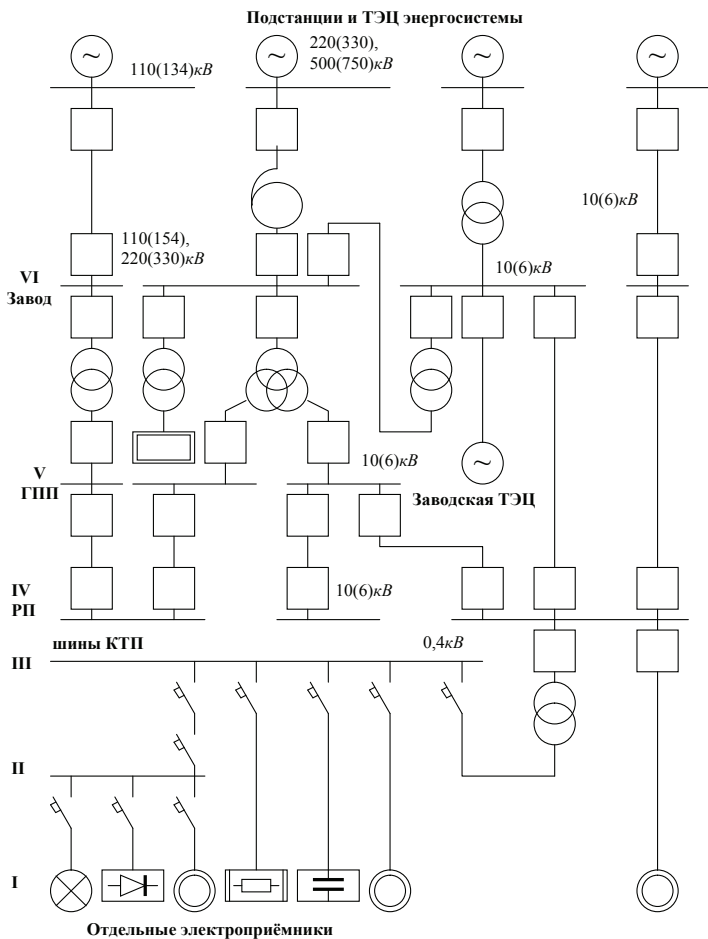


Рис. 9. Уровни (ступени) системы электроснабжения промышленного предприятия

На представленной схеме различаются следующие уровни:

1) отдельный электроприёмник, агрегат (станок) с многодвигательным приводом, или группа электроприемников, связанных технологически или территориально и образующих единое изделие с паспортной мощностью;

2) щиты распределительные переменного и постоянного тока, щиты управления, шкафы силовые, вводно-распределительные устройства, шинные выводы сборки и магистралей;

3) щит низкого напряжения трансформаторной подстанции (ТП) 10(6)/0,4 кВ;

4) щиты распределительной подстанции (РП) 10(6) кВ;

5) шины главной понизительной подстанции (ГПП) глубокого ввода;

6) граница предприятия и энергосистемы – заявляемый, лимитируемый, контролируемый и отчётный уровень потребителя электроэнергии.

Три нижних уровня находятся в ведении цеховых электриков; обычно к ним относится цеховое электрооборудование.

Следующие 5 и 4 уровни относятся к внецеховому электроснабжению; сети называют межцеховыми (магистральными), а напряжение – распределительным (обычное – 10 кВ, может достигать 110 кВ). От 5-го уровня осуществляется электроснабжение крупного цеха или района, от 4-го уровня питаются цехи, отдельные здания и сооружения.

Обслуживание 5-го уровня осуществляется цеховыми ТП, а 4-го уровня – производственным персоналом технологического цеха. Это могут быть предприятия в целом, организация, территориально-обособленный цех, строительная площадка.

С системой внешнего электроснабжения энергосистемы 6-й уровень связан через линии электропередач (ЛЭП), которые присоединены к источникам питания энергосистемы, где номинальное напряжение от 6 до 750 кВ. Особенность 6-го уровня заключается в том, что для этого уровня имеются наиболее достоверные, сравнимые и обширные данные по заявленному полчасовому максимуму нагрузки (средне-годовой и суточной). Именно на этом уровне в наибольшей степени неприменима классическая электротехника для создания экономико-математических моделей.

Разделение системы электроснабжения на уровни соответствует разделению обязанностей, происходящему на промышленных объектах и в проектном деле. За показатели 6-го уровня отвечает служба главного энергетика непосредственно (группа контроля и учета) и диспетчер. При проектировании показатели этого уровня являются решающими для принятия технических решений. Уровни с 6-го по 4-й проектирует отдел (группа) электроснабжения, задачи 2-го и 3-го – решаются отделом (группой) электрооборудования, выбирающим и размещающим

силовое электрооборудование, аппаратуру управления, освещение и канализацию электроэнергии. Каждый уровень имеет свои особенности проектирования и соответственно автоматизации задач и функций САПР-Электро.

3.3. Системные показатели и системное описание электрохозяйства

Охарактеризуем электрохозяйство крупного промышленного предприятия количеством электрооборудования на разных уровнях системы электроснабжения на примере крупного металлургического комбината. Величина получасового максимума нагрузки $P_m = 850 \text{ кВт}$; число часов использования максимума нагрузки $\hat{O}_l = 6320 \text{ ч}$; коэффициент спроса по комбинату

$$\hat{E}_{\hat{N}} = \frac{P_l}{P_o} = 0,24, \quad (1)$$

где P_y — устанавливаемая мощность электроприемников в *Мвт*; количество установленных электрических машин *109 тыс. шт.* и их средняя мощность: $P_{cp} = 46,3 \text{ кВт}$.

На пятом уровне насчитывается 2 ТЭЦ; 18 ГПП; 92 трансформатора; 184 высоковольтных выключателей *35 кВ* и выше; 736 выключателей *3 кВ* и выше; 281 км ВЛ и КЛ *35 кВ* и выше.

Четвертый уровень образует 92 РП; 4600 выключателей *3 кВ* и выше; 3500 км ВЛ и КЛ распределительного напряжения.

Третий уровень включает 2100 цеховых трансформаторов; 2860 высоковольтных электродвигателей; 1 3900 км КЛ до и выше *1 кВ*.

На втором уровне установлено 27 600 силовых пунктов, щитов и панелей; 44 000 км проводов и кабелей до *1 кВ*.

На первом уровне эксплуатируется *109 тыс.* электрических машин; 1600 000 электрических источников света и 2280 сварочных преобразователей.

На крупном металлургическом комбинате имеется 10^5 электрических машин, 10^6 низковольтных аппаратов, 10^6 источников света и 10^6 линий по кабельным журналам. Именно математическое описание этого множества для целей САПР-Электро и требует теоретического подхода, основанного на системных исследованиях.

Введем меру f взаимодействия элементов x множества X и через x_i обозначим количество элементов, мера взаимодействия которых имеет наибольший порядок $f(x)$. При количестве элементов x_i ,

мера взаимодействия которых на порядок ниже $f(x_{i-1})$, $i = 1, 2, \dots, n$, может быть образована система S , состоящая из набора элементов $x_1 + x_2 + \dots + x_k + \dots + x_n$, где $k < n$, которая характеризуется функционом [2]:

$$S = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n), x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n]. \quad (2)$$

Изменяя порядок k , получаем различные системы; элементы, не входящие в систему S , будем называть внешней средой.

Двигаясь от целого к частям, можно выделить подсистему электроснабжения. Подсистемы имеют последовательно все большую меру взаимодействия, превращаясь на каком-то измерении в жесткие, однозначно считаемые электрические цепи; электроснабжение завода в целом; электроснабжение по стороне 110 кВ и т. д.

Принятие технических решений в большей мере основывается на решениях, утверждаемых на более высоких ступенях. Но и в момент принятия решения на i -ом уровне иерархии полных электрических данных по элементам получить невозможно из-за множества их по каждому из элементов, которые еще необходимо рассчитывать.

Для создания САПР необходимо описание, которое опирается на систему показателей, построенных по иерархическому принципу. На рис. 10 приведена структура такой системы [2].



Рис. 10. Системные показатели электрического хозяйства [2]

3.4. Стадии и состав документации при проектировании СЭС

В целом проектирование СЭС необходимо увязывать в единую иерархическую систему. Вопросы проектирования – создание проектно-сметной документации для объектов капитального строительства, реконструкции и технического перевооружения. К вопросам конструирования относится создание проектно-конструкторской и технологической документации, обуславливающей выпуск изделия (технологии или материалов). Для обеспечения каждой деятельности (конструирование, проектирование) создается специальная САПР, имеющая собственную специфику и опирающаяся на свои законы и закономерности.

Установлено, что решения о проектировании по сложным и крупным предприятиям принимаются на основе технико-экономических обоснований (ТЭО) строительства; по менее крупным предприятиям, зданиям и сооружениям – на основании *технико-экономических расчетов* (ТЭР).

ТЭО определяют порядок разработки проектной документации:

- для крупных промышленных объектов – в две стадии: «*проект*» и «*рабочая документация*».
- для мелких и средних – в 1 стадию – «*рабочий проект*».

Технико-экономические обоснования разрабатываются с 1985 г. и исходят из формирования и размещения отраслей народного хозяйства и отраслевой промышленности, схем развития и распределения производительных сил по экономическим районам. ТЭО являются предплановыми и предпроектными документами, которые можно отнести к стадии внешнего проектирования.

В современных рыночных условиях внешнее проектирование может быть начато с составления бизнес-плана проекта. По результатам бизнес-плана проводится подготовка инвестиционного проекта и принимается участие в конкурсе проектных организаций, на котором решается вопрос об окончательном финансировании (и его формах) проекта СЭС.

Предусматриваемый в ТЭО технический уровень и основные показатели после осуществления строительства должны соответствовать показателям лучших предприятий данной отрасли.

Технико-экономическое обоснование должно состоять из следующих разделов:

- 1) исходные данные о техническом состоянии предприятия, анализ и оценка его деятельности, основные технико-экономические показатели за последние 3 года (предшествующие году разработки ТЭО);
- 2) мощность – объем производства продукции, номенклатура продукции, сравнение с аналогами;
- 3) обеспечение предприятия энергией и другими ресурсами, обоснование источников электроэнергии с учетом топливно-энергетического баланса района;

4) основные технологические решения и требования к оборудованию, состав обслуживающего и энергетического хозяйства, структура управления;

5) выбор площадки строительства;

6) основные строительные решения – ситуационный план с указанием внеплощадочных сооружений энергоснабжения, основные объемы строительно-монтажных работ;

7) охрана окружающей среды;

8) расчетная стоимость строительства;

9) основные технико-экономические показатели, удельные расходы энергетических ресурсов, уровень производительности труда, сравнение с показателями действующих аналогических предприятий;

10) выводы и предложения, оценка эффективности строительства, составление задания на проектирование, перечень научно-исследовательских, конструкторских, экспериментальных и изыскательных работ, необходимых для проектирования и строительства предприятий;

11) схемы генерального и ситуационного планов, габаритные схемы по наиболее крупным и сложным зданиям и сооружениям, сводный расчет стоимости строительства.

При разработке ТЭО ограничиваются схемой электроснабжения, интересующей энергосистему, т. е. решающие вопросы присоединения электрических объектов на этой стадии не предусмотрены.

Создание САПР электрической части ТЭО (в значительной степени и всего проекта в целом) должно состоять из:

- создания информационной базы, содержащей данные по электрическим показателям действующих строящихся и проектируемых объектов;
- разработок математических моделей, позволяющих выбрать аналог;
- согласования критериев оптимизации.

Стадия *«Проект»* выполняется на основе утвержденного ТЭО. Основным отличием *«Проекта»* от ТЭО является проработка всех его частей, определение цехов, а в цехах – состава основных отделений и участков, обслуживающих и вспомогательных объектов.

Большой объем стадии *«Проект»* при выполнении электроснабжения предполагает следующий банк исходных данных:

- генеральный план завода с размещением основных и вспомогательных производственных зданий и сооружений, основных подземных и наземных коммуникаций;
- данные по составу и характеру электрических нагрузок и электроприемников технологического и другого назначения;
- данные по пожаро- и взрывоопасности производства;
- требования к бесперебойности электроснабжения отдельных производств, цехов, агрегатов и отдельных механизмов с выделением ЭП с первой и особой группой категории по ПУЭ;

- геологические и климатические данные, метеорологические условия;
- основные планы и размеры цехов и сооружений;
- данные по силовому электрооборудованию, электроприводу и освещению.

В проекте подтверждаются согласованные в ТЭО (бизнес-плане) технические решения и выдаются технические условия, включающие нагрузки сторонних потребителей, данные по токам и мощности КЗ на шинах источника питания, требования по компенсации реактивной мощности и качеству энергии, требования к устройствам РЗ, автоматике связи и телемеханики, а также оговариваются границы раздела и учета трассы питающих ЛЭП и их параметры.

Для разработки САПР стадии «Проект» необходимо не только определить основные электропоказатели по цехам, но и разработать алгоритмы и программы по всей технологической линии проектирования.

Введение стадии «Рабочая документация» еще более расширяет количество решаемых задач, охватывающих все уровни и углубляющих знания по конкретным установкам, монтажу и эксплуатации электрооборудования. На чертеже должен быть указан каждый приемник электроэнергии, к которому подведено питание, выполнено управление и защиты, сделаны все монтажные чертежи и чертежи на присоединение. Разрабатывают компоновочные и установочные чертежи, опросные листы, задания заводам-изготовителям и т. д.

САПР в стадии «Рабочая документация» разбивается на большое число алгоритмизируемых задач, количество которых резко возрастает по мере детализации (например, количество чертежей электрической части на стадии «Рабочая документация» крупного металлургического предприятия может достигать от 10 до 100 тыс. штук). Примеры блок-схем проекта САПР-Электро на разных этапах проектирования приведены в приложении.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные проблемы проектирования систем электроснабжения. Какое влияние они оказывают на создание САПР-Электро?
2. Какая информация необходима для составления ТЭО электрической части промышленного предприятия; энергетического объекта?
3. Какие основные задачи проектирования СЭС необходимо автоматизировать в первую очередь? Почему?
4. Какие этапы и стадии проектирования систем электроснабжения регламентированы? Каким образом их лучше автоматизировать?
5. Какие промышленные программные пакеты САПР-Электро вам известны? Сравните их основные возможности и область применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание проекта электрической части промышленного предприятия необходимо рассматривать как неотъемлемую часть всей технологической цепочки производства. Следует использовать горизонтальную интеграцию автоматизированных систем, опираясь на такие инновации, как смешанное проектирование, технологии CAD/CAM/CAE, ERP-системы. Современные средства САПР-Электро, как правило, отвечают именно этим требованиям. Решающим фактором выбора набора таких средств при выполнении конкретного проекта СЭС являются технико-экономическое обоснование и квалификация персонала проектно-конструкторской организации.

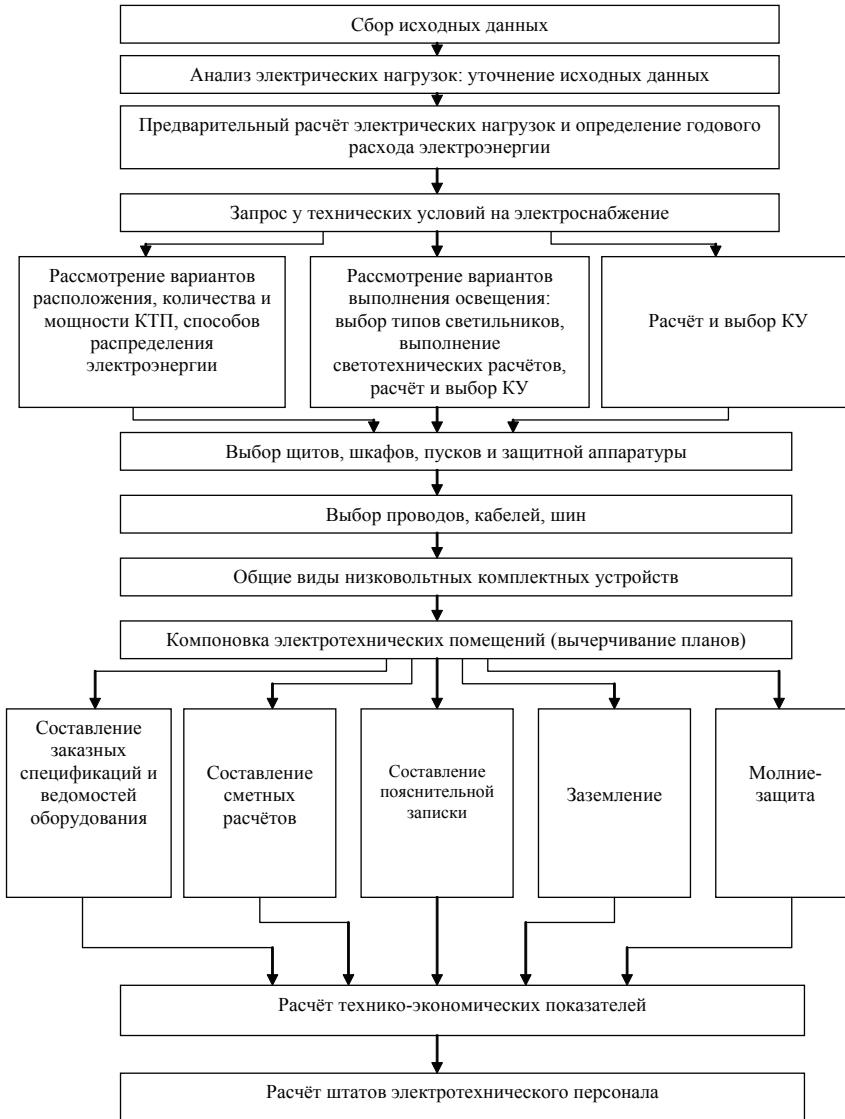
Задача выбора и обоснования средств автоматизации особенно актуальна в жестких условиях рынка с ограничениями по различным экономическим показателям проекта СЭС: по потерям электроэнергии и учету стоимости оборудования; по существующим резервам мощностей района предполагаемого строительства и по расположению, топографии и климатическим условиям, а также по многим другим факторам.

Дальнейшее развитие общей теории автоматизированного проектирования; совершенствование методологии электроснабжения промышленных предприятий и энергетических объектов, внедрение новых информационных технологий должно позволить существенно сократить сроки проектирования СЭС, улучшить качество выпускаемой проектной документации на всех стадиях жизненного цикла, а также повысить надежность и эффективность эксплуатации электрического хозяйства промышленных предприятий.

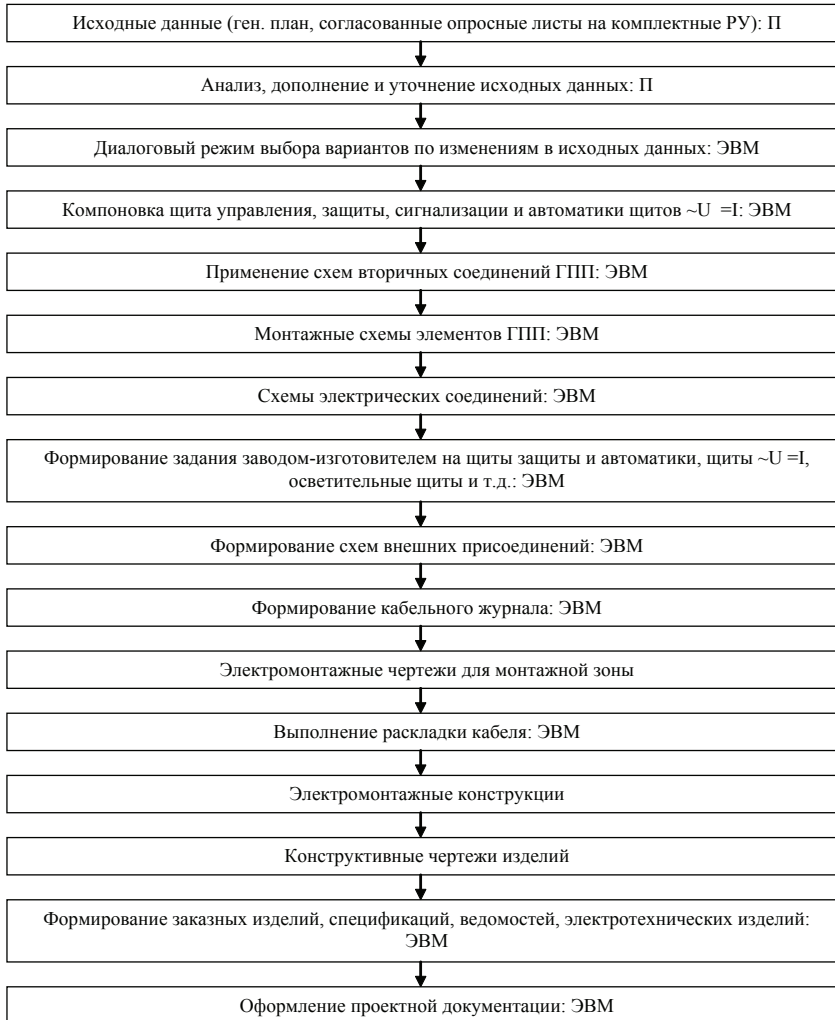
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ганин, Н. Компас 3D–V7: самоучитель (+CD) / Н. Ганин. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 384 с.
2. Кудрин, Б.И. САПР в электроснабжении промышленных предприятий: учеб. пособие / Б.И. Кудрин, Т.В. Анчарова. – М. : Изд-во МЭИ, 1987. – 74 с.
3. Кудрявцев, Е.М. Компас 3D–V7. Наиболее полное руководство / Е.М. Кудрявцев. – М. : ДМК-Пресс, 2005. – 664 с.
4. Норенков, И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем / И.П. Норенков – М. : Высшая школа, 1986. – 304 с.
5. Пемров, А.В. Графические системы САПР / А.В. Пемров // Разработка САПР: в 10 кн. – М. : Высшая школа, 1990. – Кн. 7. – 104 с.
6. САПР и автоматизация производства / под ред. Е.К. Масловского. – М. : Мир, 1987. – 420 с.
7. Съёмщикова, Л. Создаем чертежи на компьютере. AutoCAD 2005/2006 / М. Съёмщикова. – М. : ДМК-Пресс, 2005. – 192 с.
8. Тику, Ш. Эффективная работа: AutoCAD 2002 / Ш. Тику. – СПб. : Питер, 2003. – 1168 с.
9. Федотов, Е.Н. САПР цеховых электрических сетей. Инструкция пользователю: учеб. пособие / Е.Н. Федотов, А.Н. Проценко. – Куйбышев : КПиТ, 1990. – 24 с.
10. Шукин, Б.Д. Применение ЭВМ для проектирования систем электроснабжения / Б.Д. Шукин, Ю.Ф. Лыков. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 176 с.

Функциональная схема проектирования силового электрооборудования на стадии «Проект»



Функциональная схема проектирования ПС на стадии «Рабочая документация» (П – задачи проектировщика, ЭВМ – компьютера)



СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Технологии инженерного проектирования	5
1.1. Базовые понятия и структура процесса проектирования	5
1.2. Автоматизация процессов проектирования	10
1.3. Технология параллельного проектирования	13
1.4. Технологии CAD/CAM/CAE	17
2. Структура и состав САПР систем электроснабжения	21
2.1. Особенности автоматизации проектирования СЭС промышленных предприятий	21
2.2. Основные принципы и задачи проектирования СЭС	23
2.3. Структура и состав САПР систем электроснабжения	26
3. Разработка САПР систем электроснабжения	30
3.1. Проблема создания САПР электрической части промышленного предприятия	30
3.2. Системное описание СЭС	31
3.3. Системные показатели и системное описание электрохозяйства	33
3.4. Стадии и состав документации при проектировании СЭС	36
Заключение	39
Библиографический список	40
Приложения	41

Учебное издание

Владислав Владимирович Сенько

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЭС

Учебное пособие

Второе издание

Корректор *И.В. Шевченко*
Компьютерная вёрстка: *И.И. Шишкина*

Подписано в печать 10.02.2011. Формат 60х84/16.
Печать оперативная. Усл. п. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,56.
Тираж 50 экз. Заказ № 2-10-11.

Тольяттинский государственный университет
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

