

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт  
Факультет Энергетический  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»



**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Начальник ОПС

[Signature] / А.П. Корсун /  
« 13 » июня 2017 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

[Signature] / И.М. Кирпичникова /  
« 13 » юня 2017 г.

Исследование и разработка элементов САПР электрических сетей

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)  
ЮУрГУ – 13.04.02. 2017. 122-257. ВКР**

**Консультант, доцент,  
доктор технических наук**

[Signature] / А.В. Коржов /  
« 13 » юня 2017 г.

**Руководитель, профессор, доцент,  
кандидат технических наук**

[Signature] / Б.Г. Булатов /  
« 13 » июня 2017 г.

**Автор**

студент группы П – 281

[Signature] / Е.Д. Корсун /  
« 10 » июня 2017 г.

**Нормоконтролер, профессор,  
доцент, кандидат технических наук**

[Signature] / Б.Г. Булатов /  
« 13 » июня 2017 г.

Челябинск 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(национальный исследовательский университет)

Институт Политехнический  
Факультет Энергетический  
Кафедра Электрические станции, сети и системы электроснабжения  
Направление Электроэнергетика и электротехника

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

/И.М. Кирпичникова/

24.04. 2017 г.

**ЗАДАНИЕ**

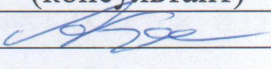

на выпускную квалификационную научную работу (диссертацию) студента

Корсун Екатерины Дмитриевны

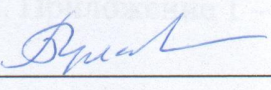
Группа П-281


1. Тема выпускной квалификационной работы  
«Исследование и разработка элементов САПР электрических сетей»  
утверждена приказом по университету от 28 апреля 2017 г. № 835
2. Срок сдачи студентом законченной работы 01.06.2017 г.
3. Исходные данные к работе:  
результаты проведения научно-исследовательской работы
4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)
  - 1 Введение
  - 2 Проблемы развития САПР электрических сетей
  - 3 Анализ метода сопоставительного проектирования
  - 4 Исследование методов формализации затрат в сетевую часть развивающейся электрической сети в экономико-математических моделях развития энергосистем
  - 5 Оценка распределения потенциалов на поверхности грунта на территории открытого распределительного устройства при ударах молнии в различных грунтово-климатических условиях
  - 6 Заключение

5. Консультанты по работе, с указанием относящихся к ним разделов работы

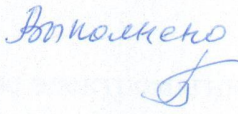
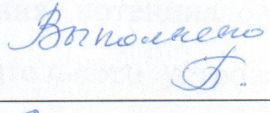
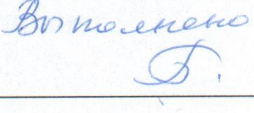
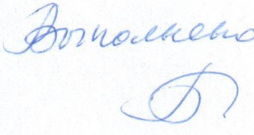
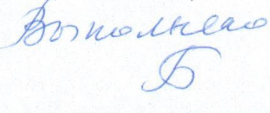
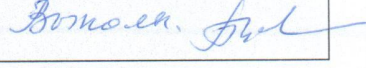
Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
Раздел ЭМС	А.В. Коржов		 24.04.2017

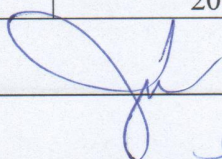
6. Дата выдачи задания 7 сентября 2015 г.

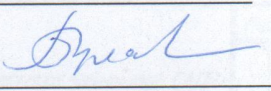
Научный руководитель  / Б.Г. Булатов /


Задание принял к исполнению  / Е.Д. Корсун /

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Анализ состояния проблемы автоматизации проектирования объектов развивающихся электрических сетей	Октябрь 2015 г. – Январь 2016 г.	 Выполнено
Выбор актуальных задач исследования и разработки приемов автоматизации проектирования	Февраль – Апрель 2016 г.	 Выполнено
Расчет и анализ характерных режимов выбранной сети в программном пакете RastrWin	Сентябрь 2016 г. – Январь 2017 г.	 Выполнено
Исследование методов формализации затрат в сетевую часть развивающейся электрической сети в экономико-математических моделях развития энергосистем. Применение контурного метода и метода проектирования градиента при выборе оптимальной схемы сети	Февраль – Апрель 2017 г.	 Выполнено
Исследование возможностей программы «ОРУ-М» для оценки распределения потенциалов на поверхности грунта. Подготовка статьи для публикации	Февраль – Апрель 2017 г.	 Выполнено
Оформление ВКР. Подготовка презентации	Май 2017 г.	 Выполнено

Заведующий кафедрой  /И.М. Кирпичникова/

Руководитель работы  / Б.Г. Булатов /

Студент  / Е.Д. Корсун /

## АННОТАЦИЯ

Корсун Е.Д. – Исследование и разработка элементов САПР электрических сетей: ЮУрГУ, П - 281, 2017 г., стр. 90, илл. 24, табл. 15. Список литературы – 19 наименований. Приложение 1 – 7 листов чертежей

Исследование и разработка элементов САПР электрических сетей обусловлена обзором современных программ, используемых в проектных институтах, анализом действующей до сих пор системы сопоставительного проектирования и предложением о дальнейшем развитии САПР в направлении комплексного алгоритма, который будет основан на использовании экономико-математической модели.

В качестве специального вопроса был рассмотрен вопрос электромагнитной совместимости на подстанции, касающийся распределения потенциалов на поверхности грунта на территории открытого распределительного устройства при ударах молнии в различных грунтово-климатических условиях.

					13.04.02. 2017. 122-257. ПЗ			
					Исследование и разработка элементов САПР электрических сетей	Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Корсун Е.Д.	<i>Корсун</i>	10.06				
Руковод.		Булатов Б.Г.	<i>Булатов</i>	13.06				
						Лист 2	Листов 90	
Н. Контр.		Булатов Б.Г.	<i>Булатов</i>	13.06	ЮУрГУ Кафедра ЭССиС			
Утв.		Горшков К.Е.	<i>Горшков</i>	13.06.17				

## ВВЕДЕНИЕ

Степень развития энергетики страны во многом определяет уровень развития в целом. А проектирование в энергетике занимает основополагающее место. Поэтому повышение производительности и качества труда инженеров-проектировщиков является одной из важнейших задач, необходимость решения которой, декларируется на государственном уровне.

Важно понимать, что при проектировании электрических сетей требуется обрабатывать большой объем разнообразной информации. И трудоемкость проекта резко возрастает при выявлении оптимальных параметров и режимов работы сети на основе многовариантных электрических и технико-экономических расчетов. Но традиционные способы решения проектных задач приводят к неоправданно большим затратам труда и времени проектировщиков на подготовку проектной документации.

Поэтому эффективное решение задач проектирования становится возможным только за счет использования средств автоматизированного проектирования (САПР). Дальнейшее развитие САПР должно идти именно по пути комплексного алгоритма, который в состоянии заменить действующую до сих пор систему сопоставительного проектирования на новую, основанную на использовании экономико-математической модели. Кроме того, в условиях развития науки и техники при появлении новых микропроцессорных защит, количество которых стремительно растет на рынке, возникают новые требования к электромагнитной совместимости на подстанциях, для чего также необходимо осваивать новое программное обеспечение.

В связи с этим целью исследований в предлагаемой выпускной квалификационной работе является:

1. Анализ метода сопоставительного проектирования на примере конкретного сетевого объекта;
2. Исследование экономико-математических моделей развития сети;
3. Освоение программного обеспечения по электромагнитной совместимости (ЭМС) на подстанции.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

# Глава 1. Проблемы развития САПР электрических сетей

## 1.1 Основные принципы построения САПР

Разработка САПР представляет собой крупную научно-техническую проблему, а ее внедрение требует значительных капиталовложений. Накопленный опыт позволяет выделить следующие основные принципы построения САПР.

1. САПР — человеко-машинная система. Все созданные и создаваемые системы проектирования с помощью ЭВМ являются автоматизированными, важную роль в них играет человек — инженер, разрабатывающий проект технического средства.

2. САПР — иерархическая система, реализующая комплексный подход к автоматизации всех уровней проектирования. Иерархия уровней проектирования отражается в структуре специального программного обеспечения САПР в виде иерархии подсистем.

Следует особо подчеркнуть целесообразность обеспечения комплексного характера САПР, так как автоматизация проектирования лишь на одном из уровней оказывается значительно менее эффективной, чем полная автоматизация всех уровней. Иерархическое построение относится не только к специальному программному обеспечению, но и к техническим средствам САПР, разделяемых на центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места проектировщиков.

3. САПР — совокупность информационно-согласованных подсистем, работающих на единой информационной основе. Этот очень важный принцип должен относиться не только к связям между крупными подсистемами, но и к связям между более мелкими частями подсистем. Информационная согласованность означает, что все или большинство возможных последовательностей задач проектирования обслуживаются информационно согласованными программами. Две программы являются информационно согласованными, если все те данные, которые представляют собой объект переработки в обеих программах, входят в числовые массивы, не требующие

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

изменений при переходе от одной программы к другой. Так, информационные связи могут проявляться в том, что результаты решения одной задачи будут исходными данными для другой задачи. Если для согласования программ требуется существенная переработка общего массива с участием человека, который добавляет недостающие параметры, вручную перекомпоновывает массив или изменяет числовые значения отдельных параметров, то программы информационно не согласованы. Ручная перекомпоновка массива ведет к существенным временным задержкам, росту числа ошибок и поэтому уменьшает спрос на услуги САПР. Информационная несогласованность превращает САПР в совокупность автономных программ, при этом из-за неучета в подсистемах многих факторов, оцениваемых в других подсистемах, снижается качество проектных решений.

4. САПР — открытая и развивающаяся система. Существует, по крайней мере, две веские причины, по которым САПР должна быть изменяющейся во времени системой. Во-первых, разработка столь сложного объекта, как САПР, занимает продолжительное время, и экономически выгодно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Введенный в эксплуатацию базовый вариант системы в дальнейшем расширяется. Во-вторых, постоянный прогресс техники, проектируемых объектов, вычислительной техники и вычислительной математики приводит к появлению новых, более совершенных математических моделей и программ, которые должны заменять старые, менее удачные аналоги. Поэтому САПР должна быть открытой системой, т. е. обладать свойством удобства использования новых методов и средств.

5. САПР — специализированная система с максимальным использованием унифицированных модулей. Требования высокой эффективности и универсальности, как правило, противоречивы. Применительно к САПР это положение сохраняет свою силу. Высокой эффективности САПР, выражаемой прежде всего малыми временными и материальными затратами при решении проектных задач, добиваются за счет специализации систем. Очевидно, что при этом растет число различных САПР. Чтобы снизить расходы на разработку

Изм. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв. №

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист

многих специализированных САПР, целесообразно строить их на основе максимального использования унифицированных составных частей. Необходимым условием унификации является поиск общих черт и положений в моделировании, анализе и синтезе разнородных технических объектов. Безусловно, может быть сформулирован и ряд других принципов, что подчеркивает многосторонность и сложность проблемы САПР [1].

Создание и развитие САПР осуществляется самой проектной организацией с привлечением (при необходимости) других организации-соисполнителей, в том числе научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений. Следует подчеркнуть, что создание САПР — сложная и трудоемкая работа, выполнение которой под силу только большому высококвалифицированному коллективу разработчиков.

Процесс создания САПР включает в себя восемь стадий: предпроектные исследования, техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочий проект, изготовление, отладка и испытание, ввод в действие.

Руководство разработкой, внедрением, эксплуатацией и модернизацией систем и компонентов САПР в проектной организации должно заниматься специализированное подразделение, включающее группы специалистов соответствующих направлений.

Предпроектные исследования проводятся для выявления готовности конкретной проектной организации к внедрению автоматизированных методов. Основу этой работы составляет системное обследование объекта проектирования и используемых в инженерной практике традиционных методов и приемов проектирования, а также объема технической документации, разрабатываемой в процессе проектирования. Процесс обследования осуществляется главным образом опросом опытных проектировщиков и конструкторов.

В результате обследования определяется необходимость и экономическая эффективность создания автоматизированной системы. При этом учитывается объем проектно-конструкторских работ, их периодичность, общие затраты

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

											Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							



инженерного труда, возможность создания адекватного математического описания и оптимизационных процедур, необходимость повышения качественных показателей проектируемого изделия, сокращение сроков проектирования.

Существенным фактором при решении вопроса о целесообразности создания САПР является подготовленность соответствующего проектного подразделения к созданию и внедрению САПР. Подготовленность может быть оценена по следующим критериям:

- возможность формализации проектно-конструкторских задач и реализации математических методов их решения;
- наличие требуемых технических средств и необходимость приобретения и установки дополнительных агрегатов;
- подготовленность информационных фондов и технических средств хранения и обработки информации.

Кроме того, важно выявить факторы оценки подготовленности кадров для эксплуатации САПР, к которым можно отнести следующие:

- соответствие внедряемой системы принятой организации проектных работ;
- наличие в проектно-конструкторской организации кадров для эксплуатации и поддержания работоспособности САПР;
- отношение руководства организации к созданию системы и уровень организации этих работ;
- психологическая подготовленность коллектива к внедрению САПР.

Техническое задание (ТЗ) является исходным документом для создания САПР и должно содержать наиболее полные исходные данные и требования. Этот документ разрабатывает головной разработчик системы. ТЗ на создание САПР должно содержать следующие основные разделы:

«Наименование и область применения», где указывают полное наименование системы и краткую характеристику области ее применения;

«Основание для создания», где указывают наименование директивных

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
-----	------	----------	---------	------	------

документов, на основании которых создается САПР;

«Характеристика объектов проектирования», где приводят сведения о назначении, составе, условиях применения объектов проектирования;

«Цель и назначение», где перечисляют цель создания САПР, ее назначение и критерий эффективности ее функционирования;

«Характеристика процесса проектирования», где приводят общее описание процесса проектирования, требования к входным и выходным данным, а также требования по разделению проектных процедур (операции), выполняемых с помощью неавтоматизированного и автоматизированного проектирования;

«Требования к САПР», где перечисляют требования к САПР в целом и к составу ее подсистем, к применению в составе САПР ранее созданных подсистем и компонентов и т. п.;

«Технико-экономические показатели», где оценивают затраты на создание САПР, указывают источники получения экономии и ожидаемую эффективность от применения САПР.

На стадиях технического предложения, эскизного и рабочего проектирования выбираются и обосновываются варианты САПР, разрабатываются окончательные решения. При этом выполняются следующие основные виды работ:

- выявление процесса проектирования (его алгоритм), т. е. принятие основных технических решений;
- разработка структуры САПР и ее взаимосвязи с другими системами (определение состава проектных процедур и операции по подсистемам; уточнение состава подсистем и взаимосвязи между ними; разработка схемы функционирования САПР в целом);
- определение состава методов, математических моделей для проектных операций и процедур; состава языков проектирования; состава информации (объем, способы ее организации и виды машинных носителей информации); состава общего, специализированного общего и специального программного обеспечения;

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

- формирование состава технических средств (ЭВМ периферийные устройства и другие элементы);
- принятие решений по математическому, информационному, программному и техническому видам обеспечения по САПР в целом и отдельно по подсистемам;
- расчет технико-экономических показателей САПР.

Оформление всей документации, необходимой для создания и функционирования САПР, выполняют на стадии рабочего проектирования.

На стадии изготовления, отладки и испытания производят монтаж, наладку и испытание комплекса технических средств автоматизации проектирования, на тестовых примерах доводят программное обеспечение и подготавливают проектную организацию к вводу в действие САПР.

Ввод в действие системы осуществляют после опытного функционирования и приемочных испытаний у заказчика [2].

## 1.2 Отображение процесса проектирования в программном обеспечении

Важнейшим вопросом при создании САПР после формализации процесса проектирования является вопрос отображения проектно-конструкторской деятельности инженера в программное обеспечение.

В общем виде процесс проектирования в САПР можно упрощенно представить в виде блок-схемы. Блоки алгоритма отображают элементарные отдельные относительно самостоятельные этапы проектно-конструкторского процесса, из цепочки которых состоит реальный автоматизированный процесс. Все системы проектирования, создаваемые с помощью современных средств вычислительной техники, являются автоматизированными. Важнейшую роль в этих системах играет человек-инженер, разрабатывающий проект новых технических средств. Человек в САПР решает все неформализованные проектные задачи и задачи планирования работ. Современная САПР является инструментом высококвалифицированного инженера-проектировщика, поэтому тесное взаимодействие человека и ЭВМ в процессе проектирования — один из

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

						Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

важнейших принципов построения и эксплуатации САПР.

Основным блоком в алгоритме процесса автоматизированного проектирования является блок проектных решений. В зависимости от полноты формализации наших знаний в конкретной предметной области проектное решение может быть выполнено автоматически или в интерактивном режиме. На основе входных данных и ограничений (независимые параметры проектирования) блок изменяет варьируемые параметры (факторы решения) до получения приемлемых проектных решений (зависимых переменных).

Результаты проектирования должны быть представлены в виде, удобном для восприятия человеком, и содержать информацию, на основе которой инженер мог бы вынести суждение о результатах проектирования.

Если проектное решение утверждается, то оформляется требуемая выходная документация; если необходима корректировка проекта, инженер, уточняя варьируемые параметры, в интерактивном режиме добивается нужных результатов; когда же проектно-конструкторский процесс не приводит к намеченной цели, необходимо уточнить входные данные и ограничения.

Рассмотрение даже такой упрощенной схемы процесса проектирования позволяет уточнить разделение функции между инженером и ЭВМ в САПР. Получение вариантов проектных решений и их представление в виде, удобном для восприятия человеком, может быть возложено на ЭВМ в той мере, в какой это позволит сделать математическое обеспечение проектных процедур. Но даже при автоматическом получении вариантов проектных решений за инженером остаются важнейшие функции — ввод исходных данных для проектирования, окончательная оценка и утверждение проектных решений. В интерактивном же режиме проектирования инженер непосредственно участвует в ходе решения задач, воздействуя на выбор факторов решения и уточняя независимые переменные. Получение выходной документации в соответствии с существующими требованиями является операцией рутинной и должно выполняться автоматически [1, 2].

На основании изложенного модель программного обеспечения

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

									Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

автоматизированной проектной процедуры можно представить в виде алгоритма, показанного на рис 1.1.

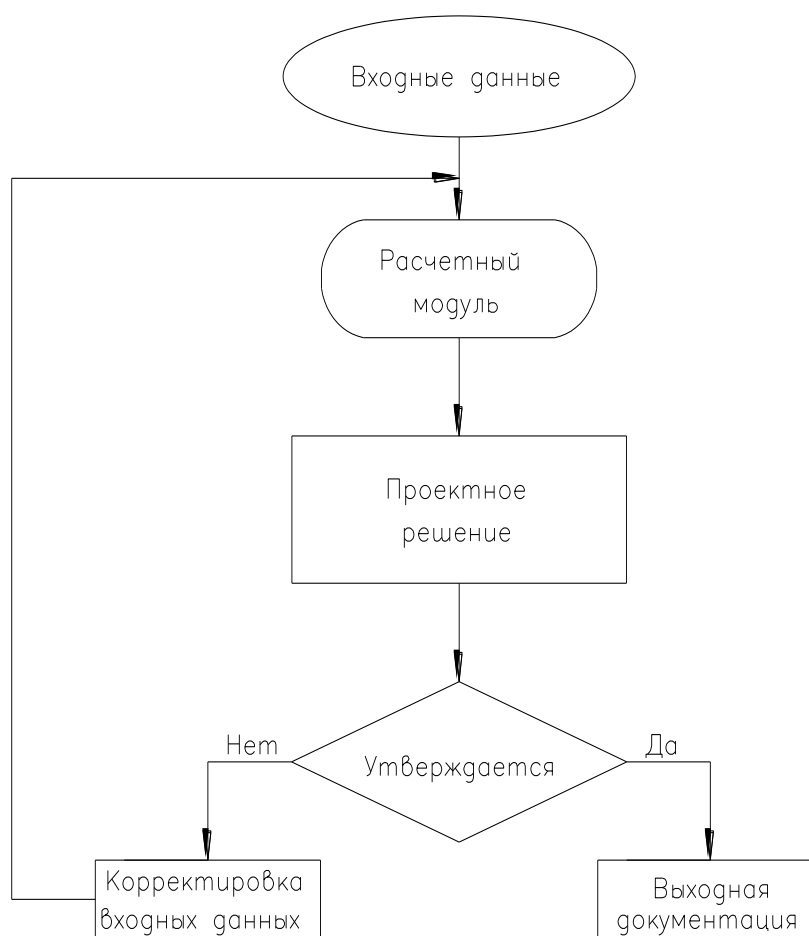


Рис. 1.1. Алгоритм итеративной проектной процедуры

Обобщенная модель программного обеспечения проектной процедуры в САПР имеет ряд составляющих и списки данных. В общем виде каждая составляющая должна реализоваться своим программным модулем.

Назначение модуля формирования входных данных состоит в создании списка этих данных для проектирования и его контроля при вводе в систему. Структура и формат списка входных данных зависят от содержания проектной процедуры (расчетного модуля). Необходимо предусмотреть существование нескольких версий списка входных данных, которые с заданными именами хранятся на участках магнитного диска. Структура списка данных определяется разработчиком САПР, а формируется он либо в диалоговом режиме пользователем, либо генерируется автоматически предыдущими проектными

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист

процедурами.

Программный модуль корректировки входных данных предусматривает редактирование (удаление, вставку и т. п.) списка, потребность в котором возникает из-за ошибок пользователя при вводе данных, обнаруживаемых при контроле, а также при необходимости их уточнения в результате анализа и оценки проектных решений.

Для обеспечения тщательного контроля в САПР должны быть предусмотрены программные средства для визуализации списков данных. Для реализации различных требований пользователя распечатка может выводиться на экран дисплея или на АЦПУ. Все эти операции выполняет модуль распечатки входных данных.

Программные модули формирования, корректировки и распечатки имеют ограничения. Структура и формат ограничений зависят от проектного модуля, но они существенно меньше подвержены изменениям, чем структура и формат исходных данных. Однако необходимо предусматривать существование нескольких версий этих списков (например, общих требований к техническим средствам со стороны различных заказчиков).

Создание и контроль списка варьируемых параметров осуществляются программными модулями их задания и распечатки.

Расчетный модуль программного обеспечения процесса проектирования предназначен для автоматического выполнения ЭВМ всех тех операций проектной процедуры, которые удалось полностью формализовать.

Получаемые варианты проектных решений обрабатываются программным модулем подготовки данных для оценки решений и передаются модулю визуализации. Анализируя результаты проектно-конструкторского процесса, инженер должен иметь возможность просмотра выходных данных на АЦПУ, дисплее и графопостроителе, например, в виде таблиц, схем и чертежей.

Допустимо существование нескольких версий проектных решений, которые хранятся на магнитном диске и могут быть представлены в требуемом виде с помощью программного модуля документирования проектных решений.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

Связь между различными программными модулями проектной процедуры и взаимодействие данной проектной процедуры с другими происходит через общую память.

Это позволяет осуществлять интерактивный автоматизированный процесс проектирования с сохранением множества различных версий, как входных данных, так и проектных решений. Для выполнения требования принципа рациональной связи САПР с окружающей средой при проектировании программного обеспечения следует стремиться к тому, чтобы список входных данных был результатом предыдущих проектных процедур или модулей. Это достигается при разработке информационного обеспечения САПР [1].

### **1.3 Базы данных в системе информационного обеспечения**

Для надежного и удобного хранения и использования разнообразной информации, необходимой для проектирования, применяются базы данных.

База данных (БД) представляет собой совокупность структурированных данных, хранимых в памяти вычислительной системы и отображающих состояние объектов и их взаимосвязей в рассматриваемой предметной области.

Логическую структуру данных, хранимых в базе, называют моделью представления данных. К основным моделям представления данных (моделям данных) относятся иерархическая, сетевая, реляционная.

Система управления базами данных (СУБД) — это комплекс языковых и программных средств, предназначенный для создания, ведения и совместного использования БД многими пользователями. Обычно СУБД различают по используемой модели данных. Так, СУБД, основанные на использовании реляционной модели данных, называют реляционными СУБД.

Для работы с базой данных зачастую достаточно средств СУБД. Однако если требуется обеспечить удобство работы с БД неквалифицированным пользователям или интерфейс СУБД не устраивает пользователей, то могут быть разработаны приложения. Их создание требует программирования. Приложение представляет собой программу или комплекс программ, обеспечивающих автоматизацию решения какой-либо прикладной задачи. Приложения могут

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

создаваться в среде или вне среды СУБД — с помощью системы программирования, использующей средства доступа к БД, к примеру, Delphi или С++ Builder. Приложения, разработанные в среде СУБД, часто называют приложениями СУБД, а приложения, разработанные вне СУБД, — внешними приложениями.

Словарь данных представляет собой подсистему БД, предназначенную для централизованного хранения информации о структурах данных, взаимосвязях файлов БД друг с другом, типах данных и форматах их представления, принадлежности данных пользователям, кодах защиты и разграничения доступа и т. п.

Информационные системы, основанные на использовании БД, обычно функционируют в архитектуре клиент-сервер. В этом случае БД размещается на компьютере-сервере, и к ней осуществляется совместный доступ.

Сервером определенного ресурса в компьютерной сети называется компьютер (программа), управляющий этим ресурсом, клиентом — компьютер (программа), использующий этот ресурс. В качестве ресурса компьютерной сети могут выступать, к примеру, базы данных, файлы, службы печати, почтовые службы.

Достоинством организации информационной системы на архитектуре клиент-сервер является удачное сочетание централизованного хранения, обслуживания и коллективного доступа к общей корпоративной информации с индивидуальной работой пользователей.

Согласно основному принципу архитектуры клиент-сервер, данные обрабатываются только на сервере. Пользователь или приложение формируют запросы, которые поступают к серверу БД в виде инструкций языка SQL. Сервер базы данных обеспечивает поиск и извлечение нужных данных, которые затем передаются на компьютер пользователя. Достоинством такого подхода в сравнении предыдущим является заметно меньший объем передаваемых данных.

Выделяют следующие виды СУБД :

- полнофункциональные СУБД;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



- серверы БД;
- средства разработки программ работы с БД.

Полнофункциональные СУБД представляют собой традиционные СУБД. К ним относятся dBaseIV, MicrosoftAccess, MicrosoftFoxPro и др.

Серверы БД предназначены для организации центров обработки данных в сетях ЭВМ. Серверы БД обеспечивают обработку запросов клиентских программ обычно с помощью операторов SQL. Примерами серверов БД являются: MicrosoftSQLServer, InterBase и др.

В роли клиентских программ в общем случае могут использоваться СУБД, электронные таблицы, текстовые процессоры, программы электронной почты и др.

Средства разработки программ работы с БД могут использоваться для создания следующих программ:

- клиентских программ;
- серверов БД и их отдельных компонентов;
- пользовательских приложений.

По характеру использования СУБД делят на многопользовательские (промышленные) и локальные (персональные).

Промышленные, СУБД представляют собой программную основу для разработки автоматизированных систем управления крупными экономическими объектами. Промышленные СУБД должны удовлетворять следующим требованиям:

- возможность организации совместной параллельной работы многих пользователей;
- масштабируемость;
- переносимость на различные аппаратные и программные платформы;
- устойчивость по отношению к сбоям различного рода, в том числе наличие многоуровневой системы резервирования хранимой информации;
- обеспечение безопасности хранимых данных и развитой структурированной системы доступа к ним.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инд. № подл.

Персональные СУБД — это программное обеспечение, ориентированное на решение задач локального пользователя или небольшой группы пользователей и предназначенное для использования на персональном компьютере. Это объясняет и их второе название — настольные. Определяющими характеристиками настольных систем являются:

- относительная простота эксплуатации, позволяющая создавать на их основе работоспособные пользовательские приложения;
- относительно ограниченные требования к аппаратным ресурсам.

По используемой модели данных СУБД разделяют на иерархические, сетевые, реляционные, объектно-ориентированные и др. Некоторые СУБД могут одновременно поддерживать несколько моделей данных.

Для работы с данными, хранящимися в базе, используются следующие типы языков:

- язык описания данных — высокоуровневый непроецедурный язык декларативного типа, предназначенный для описания логической структуры данных;
- язык манипулирования данными — совокупность конструкций, обеспечивающих выполнение основных операций по работе с данными: ввод, модификацию и выборку данных по запросам.

Названные языки в различных СУБД могут иметь отличия. Наибольшее распространение получили два стандартизованных языка: QBE— язык запросов по образцу и SQL— структурированный язык запросов. QBE в основном обладает свойствами языка манипулирования данными, SQL сочетает в себе свойства языков обоих типов.

СУБД реализует следующие основные функции низкого уровня:

- управление данными во внешней памяти;
- управление буферами оперативной памяти;
- управление транзакциями;
- ведение журнала изменений в БД;
- обеспечение целостности и безопасности БД.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

Лист

Реализация функции управления данными во внешней памяти обеспечивает организацию управления ресурсами в файловой системе ОС.

Необходимость буферизации данных обусловлена тем, что объем оперативной памяти меньше объема внешней памяти. Буферы представляют собой области оперативной памяти, предназначенные для ускорения обмена между внешней и оперативной памятью. В буферах временно хранятся фрагменты БД, данные из которых предполагается использовать при обращении к СУБД или планируется записать в базу после обработки.

Механизм транзакций используется в СУБД для поддержания целостности данных в базе. Транзакцией называется некоторая неделимая последовательность операций над данными БД, которая отслеживается СУБД от начала и до завершения. Если по каким-либо причинам (сбои и отказы оборудования, ошибки в программном обеспечении, включая приложение) транзакция остается незавершенной, то она отменяется.

Транзакции присущи три основных свойства:

- атомарность (выполняются все входящие в транзакцию операции или ни одна);
- сериализуемость (отсутствует взаимное влияние выполняемых в одно и то же время транзакций);
- долговечность (даже крах системы не приводит к утрате результатов зафиксированной транзакции).

Примером транзакции является операция перевода денег с одного счета на другой в банковской системе. Сначала снимают деньги с одного счета, затем начисляют их на другой счет. Если хотя бы одно из действий не выполнится успешно, результат операции окажется неверным и будет нарушен баланс операции.

Ведение журнала изменений выполняется СУБД для обеспечения надежности хранения данных в базе при наличии аппаратных и программных сбоев.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

Обеспечение целостности БД составляет необходимое условие успешного функционирования БД, особенно при ее сетевом использовании. Целостность БД — это свойство базы данных, означающее, что в ней содержится полная, непротиворечивая и адекватно отражающая предметную область информация. Целостное состояние БД описывается с помощью ограничений целостности в виде условий, которым должны удовлетворять хранимые в базе данные.

Обеспечение безопасности достигается в СУБД шифрованием данных, парольной защитой, поддержкой уровней доступа к базе данных и отдельным ее элементам (таблицам, формам, отчетам и др.).

В проектных организациях базы данных по объектам хранятся на локальном диске, который доступен всем пользователям данной организации. Любой пользователь может в любое время вносить изменения или пополнять базу данных, копировать или изменять отдельные чертежи. Такое существование баз данных очень удобно и абсолютно не требует каких-либо дополнительных навыков работы с базами данных, есть открытый и простой доступ ко всем документам [3].

#### 1.4 Список задач проектирования электрических сетей

Проектирование электрической сети – задача комплексная, предполагающая решение технических и экономических вопросов применительно к исходным данным, определяемым техническим заданием на разработку проекта.

Задача проектирования энергосистем состоит в разработке и технико-экономическом обосновании решений, определяющих развитие энергосистем, обеспечивающих при наименьших затратах снабжение потребителей электрической и тепловой энергией при выполнении технических ограничений по надежности электроснабжения и качеству электроэнергии.

При различном составе и объёме задач, решаемых на отдельных этапах проектирования электрических сетей, указанные работы имеют следующее примерное содержание (рассмотрим решение этих задач с оценкой возможности их автоматизации):

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

											Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							

- анализ существующей сети рассматриваемой энергосистемы, включающей её рассмотрение с точки зрения загрузки, условий регулирования напряжения, выявления узких мест в работе;

Анализ существующей сети можно произвести в программной среде RastrWin3 или более упрощенной программе NetWORKS, что по сути можно считать элементом САПР, но до полной автоматизации этот процесс довести невозможно, так как инженер самостоятельно должен произвести наглядный анализ загрузки линий и допустимого уровня напряжений в узлах. Хотя время на расчет режима сети намного сокращается при машинном расчете, также уменьшается риск возможной случайной ошибки инженера при ручном расчете.

- определение электрических нагрузок потребителей и составление балансов активной мощности по отдельным подстанциям и энергоузлам, обоснование сооружения новых подстанций;

Электрические нагрузки потребителей берутся непосредственно инженером из служебных записок на проектирование. Балансы активной и реактивной мощности также рассчитываются в программной среде RastrWin3 или NetWORKS. Обоснование же сооружения новых подстанций также определяется из задания на проектирование.

- выбор расчётных режимов работы электростанций, и определение загрузки проектируемой электрической сети;

Выбор расчетных режимов работы электростанций выбирается непосредственно инженером-специалистом при наглядности результатов расчетов при наличии карт режимов, с указанием напряжений в узлах, загрузке линий, нагрузке.

- электрические расчёты различных режимов работы сети и обоснование схемы построения сети на рассматриваемые расчётные уровни; проверочные расчёты статической и динамической устойчивости параллельной работы электростанций, выявление основных требований к системной противоаварийной автоматике;

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист

Указанные выше расчёты также могут быть выполнены в специализированных программах, поэтому могут считаться автоматизированными, но конечную точку в выборе, как устройств противоаварийной автоматики, так и аппаратуры ставит инженер-проектировщик, основываясь на свой опыт и квалификацию, а также в некоторых случаях по требованию заказчика может отдаваться предпочтение тому или иному заводу изготовителю.

- составление баланса реактивной мощности и выявление условий регулирования напряжения в сети, обоснование пунктов размещения компенсирующих устройств, их типа и мощности;

Обоснование пунктов размещения компенсирующих устройств и вообще их необходимости также может быть выявлено после проведения машинных расчетов.

- расчёты токов короткого замыкания в проектируемой сети и установление требований к отключающей способности коммутационной аппаратуры, разработка предложений по ограничению токов короткого замыкания;

Расчеты токов короткого замыкания в проектируемой сети выполняется после расчета режима, и этот процесс также может быть практически полностью автоматизирован с помощью программ, таких как, например, программа Токо разработанная на кафедре ЮУрГУ. Установленные же требования по отключающей способности представлены в нормативных документах и ГОСТах, что служит также обоснованием считать эту часть проектирования автоматизированной, так как полученные в программе токи необходимо будет сравнивать с допустимыми при выборе аппаратуры.

- сводные данные по намеченному объёму развития электрической сети натуральные и стоимостные показатели, очередность развития.

В конце всех расчетов делаются сводные таблицы по намеченному объёму развития электрической сети, также высчитывается полная стоимость всего проекта по укрупненным показателям стоимости отдельных составляющих и работ. Также очень важно предусмотреть очередность развития новой

Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

											Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							

подстанции и сроки введения в эксплуатацию. Таблицы должны быть сделаны непосредственно инженером-проектировщиком.

Таким образом, мы видим, что на всех этапах проектирования необходимо непосредственное участие инженера-проектировщика, который анализирует результаты выполнения расчетов по отдельным блокам с целью учета неформализованных свойств объекта и принятия решений о дальнейших действиях. На рис. 1.2 показана возможная блок-схема алгоритма выбора варианта развития сетевого района.

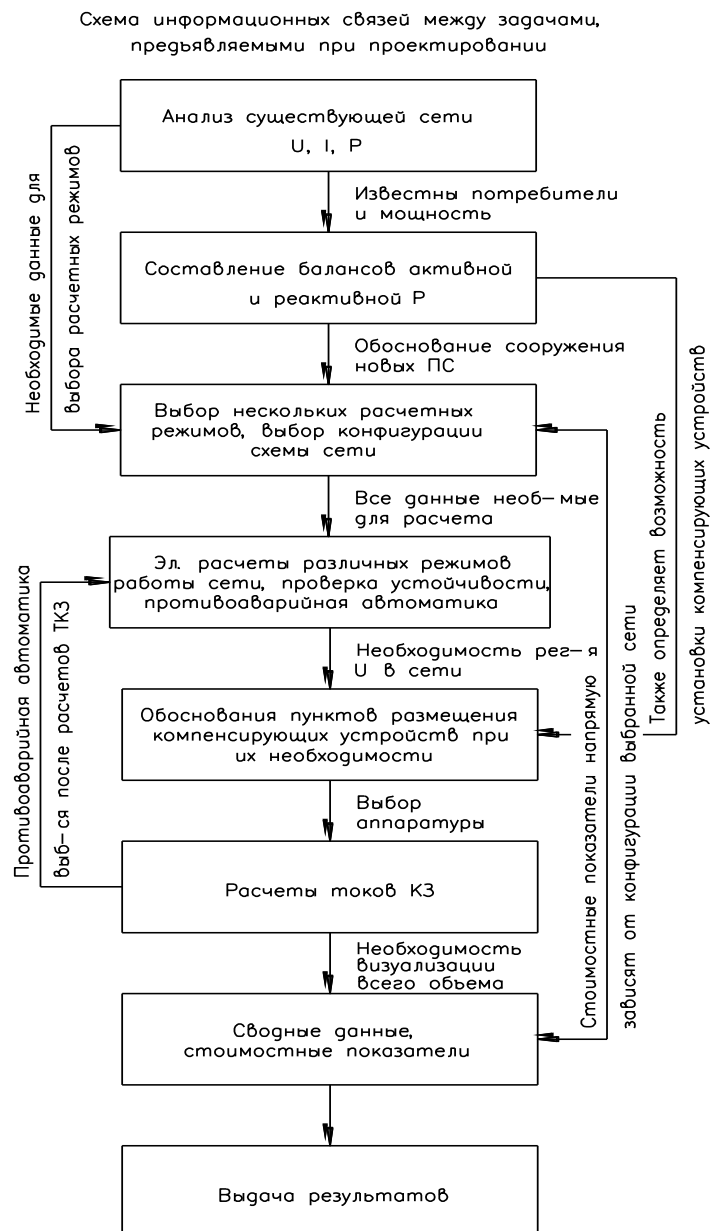


Рис. 1.2. Возможная блок-схема алгоритма выбора варианта развития сетевого района

Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

## 1.5 Прикладное ПО САПР электрических сетей

На момент прохождения производственной практики после 1 курса магистратуры я уже имела навыки работы с некоторыми элементами САПР. В принципе, к САПР можно отнести любое программное обеспечение, которым пользуются инженеры-проектировщики, выполняя свою работу. В организации ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» дирекция «Челябэнергосетьпроект» я начала обучение именно с программы AutoCAD. Полное ее название AutodeskAutoCAD – графическое ядро – система автоматизированного проектирования и черчения промышленных и гражданских объектов.

Современные графические пакеты, которые используются проектировщиками в проектных компаниях, имеют определенные особенности, облегчающие и ускоряющие процесс проектирования. Программа AutoCAD, программа которой пользуются сейчас уже почти все проектировщики, хороша и удобна тем, что на базе предыдущих работ (в нашем случае главных электрических схем подстанций) можно выполнять новые, используя предыдущие фрагменты электрических схем.

Это имеет огромный плюс в том, что проектировщикам не приходится тратить дополнительное время на воссоздание схемы с чистого листа, есть уже фрагменты схем предыдущих работ которыми можно воспользоваться. Ведь большинство электрических схем подстанций являются типовыми или могут легко быть преобразованы на нетиповые, всего лишь дополнительными присоединениями, которые также могут быть скопированы из одного места и вставлены в другое. Таким образом, можно предварительно в среде графического пакета AutoCAD разработать все типовые схемы подстанций из стандарта ОАО «ФСК ЕЭС» [4] и потом уже пользоваться ими как шаблонами.

На листе 1 приложения 1 представлена главная электрическая схема ПС 110 кВ Рудничная, выполнена как раз таким методом. Хочу отметить, что схема была выполнена в среднем за 2-3 рабочих дня, что в значительной мере сократило время по сравнению с неавтоматизированной работой.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

									Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					



Таким образом, использование таких графических пакетов как AutoCAD стало первым шагом в развитии САПР.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Хочется отметить, что в каждой организации имеется свой перечень прикладного программного обеспечения, причем, наряду с общим прикладным программным обеспечением есть еще и ряд таких, которые используют только в пределах своих отделов. Например, свой перечень программного обеспечения имеет отдел строителей, отдел релейной защиты и автоматики, отдел изысканий и генплана. В таблице 1 представлен перечень наиболее часто применяемого прикладного программного обеспечения для организации, где я проходила практику, а теперь занимаю должность инженера-проектировщика III категории.

Таблица 1 – Перечень прикладного программного обеспечения

Поз.	Программное обеспечение	Назначение
1	AutodeskAutoCAD	Графическое ядро – система автоматизированного проектирования и черчения промышленных и гражданских объектов
2	NormaCS	Информационно-поисковая система БД нормативной документации
3	AdobeReader	Чтение и печать документов в формате *.pdf
4	MathCad	Система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования
5	ANSYS	Универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа. Анализ множества задач, таких как: механика конструкций, прочность, теплообмен, гидроаэродинамика, гидравлика, электромагнитное поле (до 10 ГГц), акустика и т.д. Широкий спектр расчетных возможностей, которые позволяют учитывать, как физические нелинейности, такие как пластичность, упругость в виде кусочно-линейной зависимости “деформация-напряжения”, гиперупругость, вязкопластичность, ползучесть, набухание, вязкоупругость, так геометрические нелинейности (большие деформации, большие перемещения) и нелинейности самого элемента (общие поверхностные

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

		контактные элементы, элементы взаимодействия, и элементы с армированием). Богатые графические возможности для представления результатов исследования.
6	Лоцман	Ведение и хранение архива технической документации проектных организаций
7	GeoniCS Топоплан- Генплан- Сети- Трассы	<p>Решение всех частей генерального плана на базе ЦММ (ЦМР)</p> <p>GeoniCS Топоплан-Генплан-Сети-Трассы – работает на платформе AutoCAD Civil, а также AutoCAD – автоматизация проектно-изыскательских работ.</p> <p>Модуль «Топоплан» – создание топографических планов, карт и планшетов масштаба от 1:500 до 1:5000. Включает полную библиотеку топографических условных знаков (точечные, линейные, полосные, площадные), а также средства их отрисовки, редактирования и замены.</p> <p>Модуль «Генплан» состоит из нескольких функциональных разделов, каждый из которых соответствует строго определенным задачам проектирования генеральных планов (горизонтальная планировка, вертикальная планировка и благоустройство).</p> <p>Модуль «Сети» – автоматизация работ по выполнению трассировки в плане инженерных коммуникаций.</p> <p>Средства создания сводного плана инженерных сетей обеспечивают возможность с минимальными затратами времени и ресурсов выполнить разводку и совмещение инженерных сетей на проектируемой площадке, надписать их, быстро проставить все необходимые координаты и размеры.</p> <p>Модуль «Трассы» является ядром, на основе которого создается система проектирования конкретных видов линейно-протяженных объектов.</p>
8	GeoniCS Изыскания	Автоматизация процесса обработки полевых измерений

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Лист

	(RGS)	
9	ProjectStudioCS фундаменты	Проектирование и расчет фундаментов на свайном и естественном основаниях
10	ProjectStudioCS Конструкции	Проектирование железобетонных конструкций
11	ЛИРА САПР	Расчет строительных конструкций методом конечных элементов на статические и динамические воздействия по требованиям строительных норм
12	ЛЭП Модель расчета фундаментов	Расчет фундаментов для ЛЭП от 6 до 750 кВ
13	ElectriCSStorm	Проектирование молниезащиты и заземления зданий и сооружений, расчет молниезащит (PMЗ) и заземляющих устройств
14	ElectriCSLight	Светотехнические расчеты осветительных установок для наружного освещения
15	ОРУ-М	Расчет заземляющих устройств ОРУ, подстанций и других электроустановок
16	RastrWin	Расчет, анализ и оптимизация режимов электрических сетей и систем

Таким образом, на каждом этапе проектирования существуют свои элементы САПР, которые в своей совокупности способствуют рациональному использованию времени на проектирование по объекту.

Начиная с базовых программ для проектирования, таких как AutoCAD, я постепенно освоила такие программы как: NormaCS – информационно-поисковая система БД нормативной документации, ElectriCSStorm – проектирование молниезащиты и заземления зданий и сооружений, расчет молниезащит (PMЗ) и заземляющих устройств (PЗУ), ElectriCSLight – светотехнические расчеты осветительных установок для наружного освещения, ОРУ-М – расчет заземляющих устройств ОРУ, подстанций и других электроустановок, RastrWin – расчет, анализ и оптимизация режимов электрических сетей и систем. Все перечисленные выше программы считаются

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

необходимыми, для того, чтобы понимать основные процессы, происходящие в энергосистеме и уметь представлять и отражать это все на чертежах.

Дальнейшее развитие САПР должно идти по пути разработки комплексного алгоритма, который в состоянии заменить действующую до сих пор систему сопоставительного проектирования на новую, основанную на использовании экономико-математической модели. В условиях новых требований по электромагнитной совместимости нужно также осваивать программное обеспечение.

В связи с этим целью исследований в предлагаемой выпускной квалификационной работе является:

1. Анализ метода сопоставительного проектирования на примере конкретного сетевого объекта;
2. Исследование экономико-математических моделей развития сети;
3. Освоение программного обеспечения по электромагнитной совместимости (ЭМС) на подстанции.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

## Глава 2. Анализ метода сопоставительного проектирования

### 2.1 Характеристика сетевого района

В качестве сети, выбранной для рассмотрения, исследования и оптимизации в данной выпускной квалификационной работе, была выбрана сеть Оренбургской области, в качестве подстанции была выбрана новая планируемая к постройке ПС 110/6 кВ Рудничная.

В работе были рассмотрены варианты внешнего электроснабжения Юбилейного и Подольской группы месторождений на напряжении 110 кВ. По всем вариантам были определены капитальные затраты и проанализированы потери. Определен и рекомендован оптимальный вариант для дальнейшего осуществления.

Граф сетевого района представлен на рис. 2.1, где показана существующая сеть и намечено расположение новой подстанции.

Проектирование по методу сравнения вариантов предполагает рассмотрение нескольких конкретных вариантов с детальным анализом каждого. При этом сравнение происходит сразу по нескольким критериям:

- 1) По отклонению напряжения;
- 2) По нагрузке линий электропередач;
- 3) По суммарным потерям в ЛЭП;
- 4) По капитальным затратам.

Всего было намечено 4 варианта, далее рассмотрим их более подробно (рис. 2.2). Но для начала рассчитаем существующий режим сети до подключения ПС 110 кВ Рудничная и дадим краткий анализ. Схема существующих электрических сетей 110 кВ и выше на 01.12.2015 представлена на листе 2 приложения 1 в формате A1. Карта режима сети, рассчитанная в программной среде RastrWin3 также представлена на листе 3 приложения 1.

Анализируя карту режима существующей сети Оренбургской области, можно сказать, что напряжения не превышают наибольшего рабочего напряжения электрооборудования сети 110 кВ, а по [5] это 126 кВ. Узел с максимальным отклонением напряжения 123,31 кВ на Ириклинской ГРЭС 110 .

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Узел с минимальным отклонением напряжения 118,88 кВ на ПС Зилаир. Следовательно, есть возможность подключения новой ПС к существующей сети.

Оценка токовой нагрузки также показала, что значения плотности тока при заданном числе часов использования максимума нагрузок в год  $T_{н\acute{o}} = 6000$  ч не превышают допустимую экономическую плотность тока, так как в послеаварийных режимах для эксплуатируемых линий допускается превышение (вплоть до двукратного) нормативных значений плотности тока [6].

Суммарные потери в ЛЭП в существующей сети составляют: потери активной мощности  $\Delta P_{ЛЭП} = 15,35$  МВт, потери реактивной мощности  $\Delta Q_{ЛЭП} = 169,97$  МВАр.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		Лист

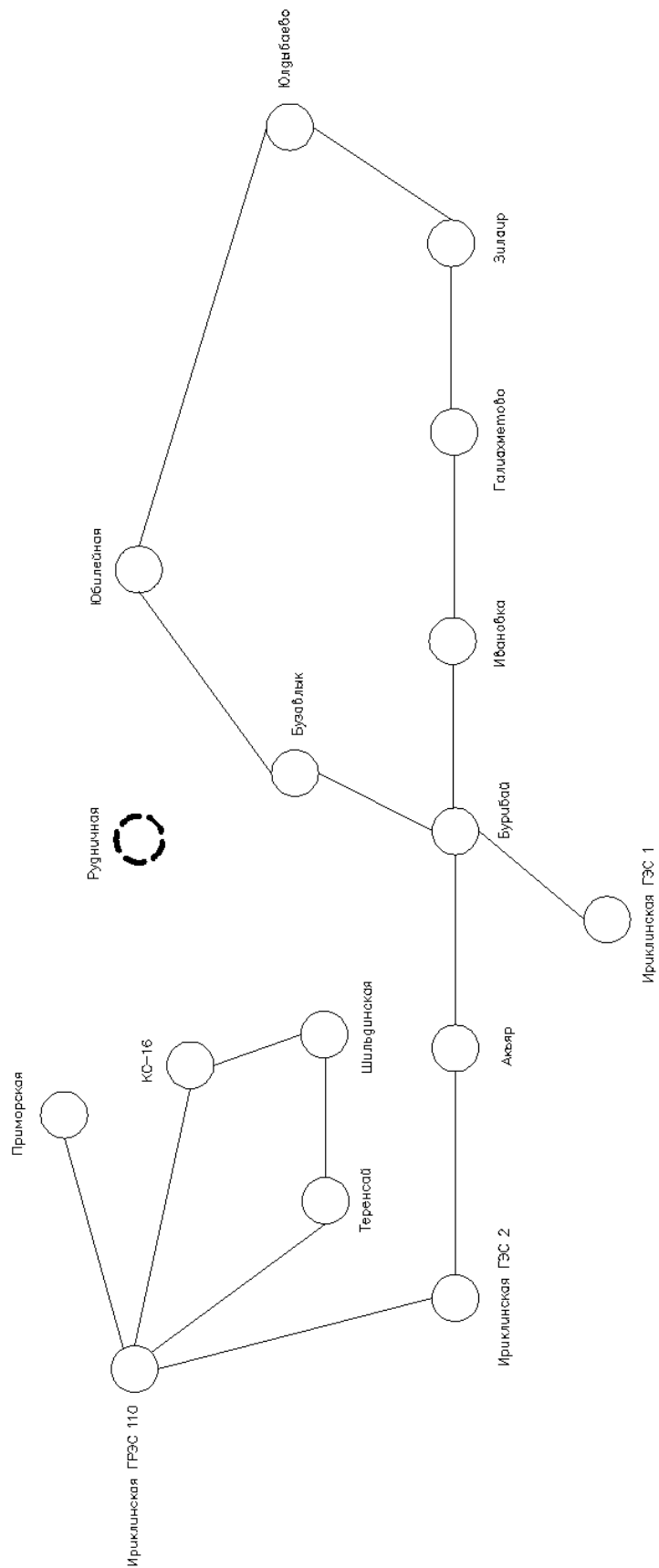
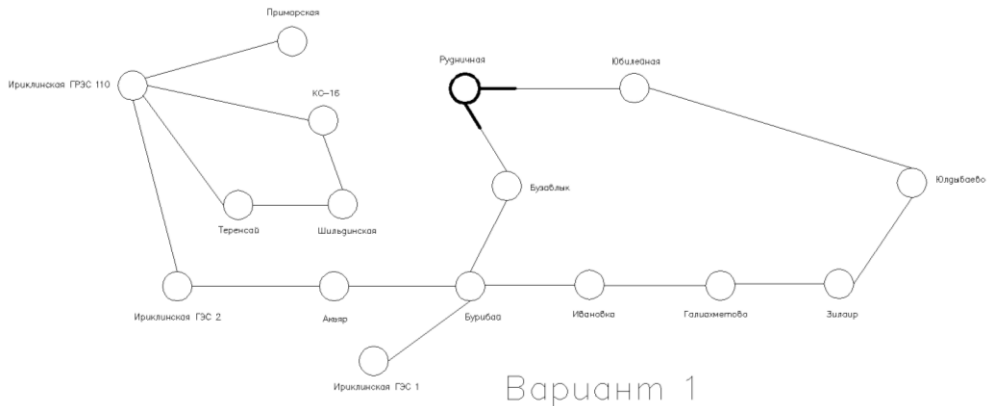


Рис. 2.1. Граф существующего сетевого района с намеченным расположением новой подстанции Рудничная

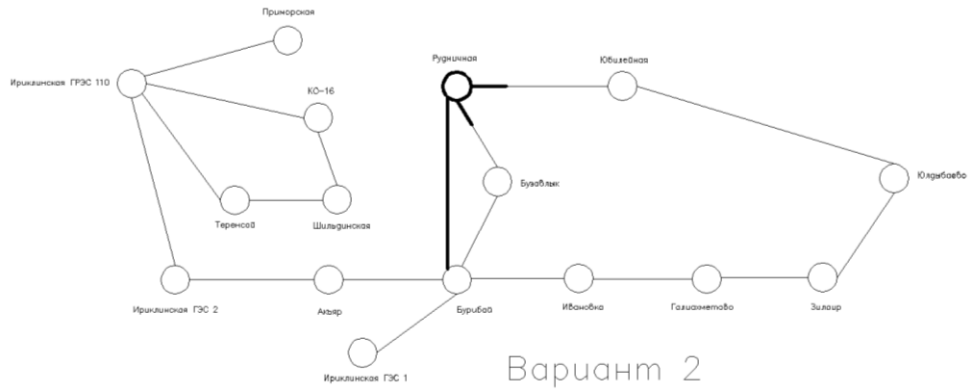
Инва. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

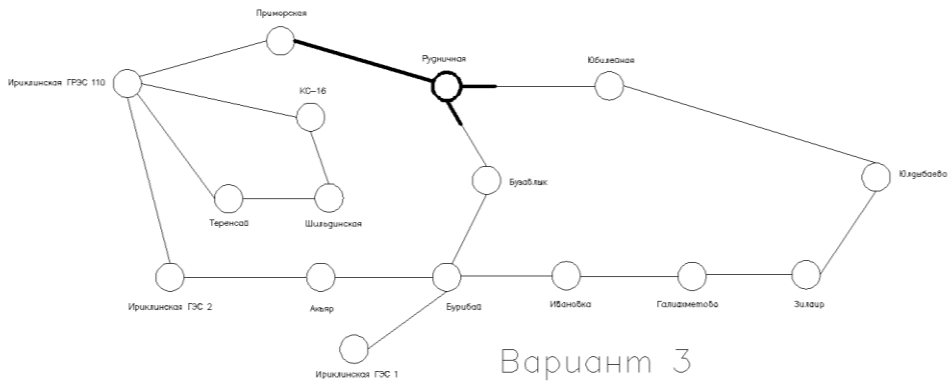




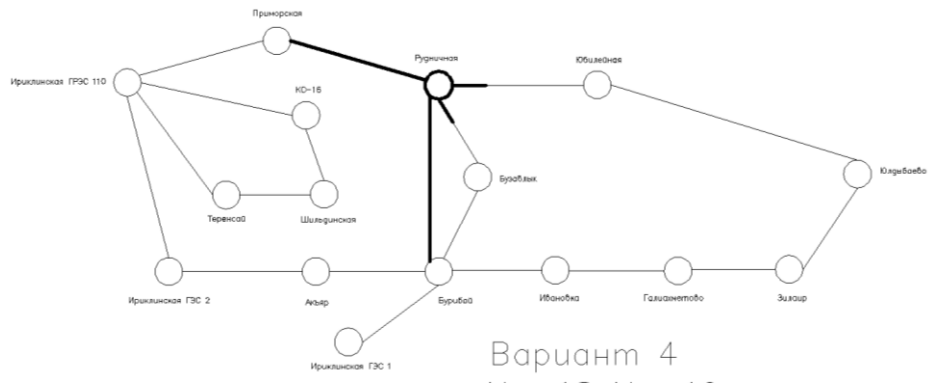
Вариант 1  
 $N_y = 16; N_B = 17$



Вариант 2  
 $N_y = 16; N_B = 18$



Вариант 3  
 $N_y = 16; N_B = 18$



Вариант 4  
 $N_y = 16; N_B = 19$

Рис. 2.2. Конфигурации намеченных 4-х вариантов

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## 2.2 Вариант 1

В этом варианте для электроснабжения «Юбилейного» месторождения предусматривается сооружение ПС 110/6 кВ Рудничная заходом ВЛ 110 кВ Бузавлык – Юбилейная. Врезка осуществляется на расстоянии 1,0 км от ПС Юбилейная и на 10,5 км от ПС Бузавлык. Также предусматривается сооружение следующих электросетевых объектов: дополнительного участка ВЛ 110 кВ от места существующей врезки в ВЛ 110 кВ Бузавлык – Юбилейная до самой ПС Рудничная двухцепной линией 2хАС-150 длиной 3,0 км.

Карта режима варианта 1 представлена на листе 4 приложения 1.

Анализируя карту режима, можно увидеть, что напряжения в сети значительно снизились, из-за подключения довольно крупного потребителя. Прогнозируемые активные и реактивные нагрузки на ПС Рудничная соответственно составляют  $P = 27,9 \text{ МВт}$  и  $Q = 13,9 \text{ МВАр}$ .

Отклонение напряжения на ПС Рудничная соответствуют [7] и составляет +4,55% от номинального напряжения сети, что находится в пределах  $\delta U_{\text{норм. доп.}} = \pm 5\%$  нормально допустимого значения установившегося отклонения напряжения.

Токовая нагрузка на ВЛ Юбилейная–Рудничная и ВЛ Рудничная–Бузавлык составляют соответственно 89 А и 190 А при допустимых значениях для провода АС-150 450 А. Таким образом, существующее сечение вполне подходит для таких нагрузок.

Суммарные потери в ЛЭП в данном варианте составили: потери активной мощности  $\Delta P_{\text{ЛЭП}} = 16,76 \text{ МВт}$ , потери реактивной мощности  $\Delta Q_{\text{ЛЭП}} = 174,03 \text{ МВАр}$ .

Теперь, приблизительно рассчитаем капитальные затраты по 1 варианту. Затраты определим по упрощенной формуле [8]:

$$Z_t = E_n \cdot k_t + I_t, \quad (1)$$

где  $Z_t$  – приведенные затраты;

$k_t$  – капитальные затраты в год  $t$  [9];

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

$I_t$  – эксплуатационные издержки.

Срок окупаемости примем 8 лет:  $E_n = \frac{1}{T_{ок}}$ ;  $E_n = 0,125$

Эксплуатационные издержки найдем по формуле [8]:

$$I_t = I_t' + \Delta I_t, \quad (2)$$

где  $I_t'$  – общие годовые эксплуатационные расходы по электросетевому объекту без учета затрат на амортизацию:

$$I_t' = \text{Затраты на обслуживание} + \text{Ремонты};$$

$\Delta I_t$  – затраты на возмещение потерь электроэнергии:

$$\Delta I_t = \Delta \mathcal{E}_t \cdot C, \quad (3)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_t$  – расчетные потери электроэнергии в сети, вызванные вводом объекта;

$C$  – тариф на электроэнергию;  $C = 2,68 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$  для Оренбургской области с 1 января 2017 года.

Результаты проведенных расчетов для варианта 1 сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Затраты в ВЛ по варианту 1

Линия	Тип	К <sub>0</sub> , тыс.руб	L, км	Затраты, тыс.руб	Обслуживание 3%, тыс.руб	Ремонт 2,9%, тыс.руб
Участок ВЛ 110 кВ от места врезки до ПС Рудничная	2хАС-150	2822,1	3,0	8466,3	253,989	245,523

Итого: 8965,812 тыс.руб

Затраты на саму подстанцию можно не учитывать, так как во всех вариантах они одинаковы.

Приведем к 2017 г. [10]:  $k_t^{2017z} = 8965,812 \cdot 7,94 = 71188,547 \text{ тыс.руб}$

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

Определим затраты на потери [8]:

$$Z_n = \Delta P \cdot \tau \cdot C \quad (4)$$

где  $\Delta P = 1,41 \text{ МВт}$  – потери мощности,

$\tau = 4000 \text{ ч}$  – число часов максимальной нагрузки,

$C$  – тариф на электроэнергию.

$$Z_n = 1,41 \cdot 4000 \cdot 2,68 = 15115,2 \text{ тыс.руб}$$

Приведенные затраты по варианту 1:

$$Z_t = 0,125 \cdot 71188,547 + 15115,2 = 24013,768 \text{ тыс.руб}$$

### 2.3 Вариант 2

Врезка ПС 110/6 кВ Рудничная осуществляется таким же образом, как и в первом варианте. Предусматривается сооружение следующих электросетевых объектов: 1) дополнительного участка ВЛ 110 кВ от места существующей врезки в ВЛ 110 кВ Бузавлык – Юбилейная до самой ПС Рудничная двухцепной линией 2хАС-150 длиной 3,0 км, что повторяет вариант 1; 2) ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай проводом марки АС-150 и длиной 31,0 км.

Карта режима варианта 2 представлена на листе 5 приложения 1.

Анализируя карту режима, можно увидеть, что напряжения в сети сравнительно повысились по сравнению с 1 вариантом, так как добавилась дополнительная связь по новой ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай. Напряжение на ПС Рудничная в данном варианте составляет 116,51 кВ, что соответствует [7].

Токовая нагрузка на ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай составляет 106 А при допустимых 450 А.

Суммарные потери в ЛЭП во втором варианте составили: потери активной мощности  $\Delta P_{\text{ЛЭП}} = 16,24 \text{ МВт}$ , потери реактивной мощности  $\Delta Q_{\text{ЛЭП}} = 172,94 \text{ МВАр}$ . Это меньше, чем в первом варианте.

Теперь, рассчитаем капитальные затраты по 2 варианту и сведем их в таблицу 3. Пользоваться будем теми же формулами, что и для первого варианта.

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Таблица 3 – Затраты в ВЛ по варианту 2

Линия	Тип	К <sub>0</sub> , тыс.руб	L, км	Затраты, тыс.руб	Обслуживание 3%, тыс.руб	Ремонт 2,9%, тыс.руб
Участок ВЛ 110 кВ от места врезки до ПС Рудничная	2хАС-150	2822,1	3,0	8466,3	2440,605	2359,252
ВЛ 110 кВ Рудничная –Бурибай	АС-150	2351,2	31,0	72887,2		

Итого: 86153,357 тыс.руб

Приведем к 2017 г. [10]:  $k_t^{2017z} = 86153,357 \cdot 7,94 = 684057,655$  тыс.руб

Определим затраты на потери [8]:

$$Z_n = \Delta P \cdot \tau \cdot Ц \quad (5)$$

где  $\Delta P = 0,89$  МВт – потери мощности,

$\tau = 4000$  ч – число часов максимальной нагрузки,

$Ц$  – тариф на электроэнергию.

$$Z_n = 0,89 \cdot 4000 \cdot 2,68 = 9540,8 \text{ тыс.руб}$$

Приведенные затраты по варианту №2:

$$Z_i = 0,125 \cdot 684057,655 + 9540,8 = 95048,007 \text{ тыс.руб}$$

### 2.4 Вариант 3

Врезка ПС 110/6 кВ Рудничная осуществляется аналогично предыдущим вариантам. В отличие от второго варианта в третьем варианте предусматривается сооружение ВЛ 110 кВ Рудничная–Приморская проводом марки АС-150 длиной 77 км, вместо предложенной во втором варианте ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай.

Карта режима варианта №3 представлена на листе 6 приложения 1.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

Анализируя карту режима, можно увидеть, что напряжения в сети повысились по сравнению со 2 вариантом, произошло это за счет близкой связи к объектам генерации на Ириклинской ГРЭС 220 кВ посредством предусмотренной в этом варианте ВЛ 110 кВ Рудничная–Приморская. Напряжение на ПС Рудничная в данном варианте составляет 117,73 кВ, что соответствует [7].

Токовая нагрузка на ВЛ 110 кВ Рудничная–Приморская составляет 95 А при допустимых 450 А, перегрузок других линий сети также не наблюдается.

Суммарные потери в ЛЭП в третьем варианте составили: потери активной мощности  $\Delta P_{ЛЭП} = 15,82 \text{ MВт}$ , потери реактивной мощности  $\Delta Q_{ЛЭП} = 171,13 \text{ МВАр}$ .

Теперь, рассчитаем капитальные затраты по варианту и сведем их в таблицу 4.

Таблица 4 – Затраты в ВЛ по варианту 3

Линия	Тип	К <sub>0</sub> , тыс.руб	L, км	Затраты, тыс.руб	Обслуживание 3%, тыс.руб	Ремонт 2,9%, тыс.руб
Участок ВЛ 110 кВ от места врезки до ПС Рудничная	2хАС-150	2822,1	3,0	8466,3	5685,261	5495,752
ВЛ 110 кВ Рудничная – Приморская	АС-150	2351,2	77,0	181042,4		

Итого: 200689,713 тыс.руб

Приведем к 2017 г. [10]:  $k_t^{2017z} = 200689,713 \cdot 7,94 = 1593476,32 \text{ тыс.руб}$

Приведенные затраты по варианту №3:

Взам. инв. №  
Подл. и дата  
Инв. № подл.

$$Z_i = 0,125 \cdot 1593476,32 + 5038,4 = 204222,94 \text{ тыс.руб}$$

## 2.5 Вариант 4

Врезка ПС 110/6 кВ Рудничная также осуществляется аналогично предыдущим вариантам. Данный вариант с избытком предусматривает возможные варианты сооружений новых ВЛ это ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай проводом марки АС-150 длиной 31,0 км и ВЛ 110 кВ Рудничная–Приморская проводом марки АС-185 длиной 77 км. Марка провода для ВЛ 110 кВ Рудничная–Приморская была выбрана в этом варианте АС-185, для того, чтобы проанализировать возможное уменьшение потерь за счет увеличения сечения провода.

Карта режима варианта №4 представлена на листе 7 приложения 1.

Анализируя карту режима, можно увидеть, что напряжения в этом варианте самые высокие. Напряжение на ПС Рудничная в данном варианте составляет 118,52 кВ, что согласно [7] соответствует предельно допустимому значению установившегося отклонения напряжения  $\delta U_{у.пред} = \pm 10\%$  и составляет +7,75%.

Токовая нагрузка на ВЛ 110 кВ Рудничная–Приморская составляет 88 А при допустимых 510 А, и 65 А на ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай при допустимых 450 А, что не очень хорошо с точки зрения плотности тока [6].

Суммарные потери в ЛЭП в четвертом варианте составили: потери активной мощности  $\Delta P_{ЛЭП} = 15,52 \text{ MWт}$ , потери реактивной мощности  $\Delta Q_{ЛЭП} = 170,75 \text{ MВАр}$ . Самые наименьшие потери из всех предложенных вариантов.

Теперь, рассчитаем капитальные затраты по варианту и сведем их в таблицу 5.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

								Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				

Таблица 5 – Затраты в ВЛ по варианту 4

Линия	Тип	К <sub>0</sub> , тыс.руб	L, км	Затраты, тыс.руб	Обслуживание 3%, тыс.руб	Ремонт 2,9%, тыс.руб
Участок ВЛ 110 кВ от места врезки до ПС Рудничная	2хАС-150	2822,1	3,0	8466,3	5905,836	5708,975
ВЛ 110 кВ Рудничная – Приморская	АС-185	1500,1	77,0	115507,7		
ВЛ 110 кВ Рудничная–Бурибай	АС-150	2351,2	31,0	72887,2		

Итого: 208476,011 тыс.руб

Приведем к 2017 г. [10]:  $k_t^{2017z} = 208476,011 \cdot 7,94 = 1655299,53$  тыс.руб

Приведенные затраты по варианту №4:

$$Z_t = 0,125 \cdot 1655299,53 + 1822,4 = 208734,841 \text{ тыс.руб}$$

### 2.6 Выбор оптимального варианта

После проделанного сравнения всех предложенных вариантов, была составлена итоговая таблица (табл. 6), по которой можно выявить наиболее оптимальный вариант. Причем, так как задача рассматривалась как многокритериальная, то варианты отбирались сразу по нескольким критериям. Поэтому выбранный оптимальный вариант нельзя считать полностью

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
-----	------	----------	---------	------	------



ОПТИМАЛЬНЫМ.

Таблица 6 – Итоговая таблица по вариантам

№ варианта	L, км	Клэп, тыс. руб	$\Delta P$ , МВт	$Z_{np}$ , тыс. руб
1	3	67222,422	1,41	24013,768
2	34	645946,79	0,89	95048,007
3	80	1504699,08	0,47	204222,94
4	111	1563077,93	0,17	208734,841

Так как, при строительстве новых ВЛ очень важен экономический критерий, первоочередную роль в выборе варианта играют затраты. Важно понимать, что при увеличении количества предложенных к постройке линий увеличивается и стоимость проекта. Но, не стоит забывать, что уровень отклонения напряжения также играет в сети немаловажную роль, так как от величины напряжения зависит качество электроэнергии. Необходимо также обращать внимание на потери, так как за недоотпуск выработанной энергии также приходится платить.

Таким образом, учитывая все критерии, а главное их градацию по важности стоит выбрать вариант №1 с величиной затрат  $Z_1 = 24013,768$  тыс.руб, предполагающий строительство дополнительного участка ВЛ 110 кВ от места существующей врезки в ВЛ 110 кВ Бузавлык – Юбилейная до самой ПС Рудничная двухцепной линией 2хАС-150 длиной 3,0 км. Второй вариант с относительно небольшими затратами по сравнению с остальными имел бы преимущество, рассматривая критерий надежности, допустим, при учёте аварийного отключения ВЛ 110 кВ Бурибай–Бузавлык или ВЛ 110 кВ Бурибай–Ивановка, когда бы вся нагрузка пошла по кольцу по одной ветви. Но данная

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

									Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

сеть предусматривает в таком аварийном отключении этих ВЛ включение ВЛ 110 кВ Баймак(2)–Юлдыбаево, которая в нормальном режиме отключена, тем самым кольцо получает подпитку с другой стороны.

Если рассматривать потери, то самые минимальные потери получились в варианте №4, что объясняется и самыми высокими напряжениями при данной конфигурации сети. В выбранном варианте №1 потери составляют  $\Delta P = 1,41 \text{ MВт}$ , что является нормальным показателем.

Оценка токовой нагрузки во всех вариантах показала, что значения плотности тока при заданном числе использования максимума нагрузок не превышают допустимую норму. А в варианте №4 линии наоборот нагружены слабо и возникает вопрос о их целесообразности.

Таким образом, выбранный вариант №1 можно считать оптимальным, так как оценка по большинству критериев является положительной и наилучшей.

## 2.7 Методика составления математической модели

Под математической моделью (ММ) понимают систему математических соотношений, описывающих с требуемой точностью изучаемый объект и его поведение в производственных условиях. При построении математических моделей используют различные математические средства описания объекта – теорию множеств, теорию графов, теорию вероятностей, математическую логику, математическое программирование, дифференциальные или интегральные уравнения и т. д.

Выполнение проектных операций и процедур в САПР основано на оперировании ММ. С их помощью прогнозируются характеристики и оцениваются возможности предложенных вариантов схем и конструкций, проверяется их соответствие предъявляемым требованиям, проводится оптимизация параметров, разрабатывается техническая документация.

В САПР для каждого иерархического уровня сформулированы основные положения математического моделирования – выбран и развит соответствующий математический аппарат, получены типовые ММ элементов проектируемых объектов, формализованы методы получения и анализа

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

математических моделей систем. Сложность задач проектирования и противоречивость требований высокой точности, полноты и малой трудоемкости анализа обуславливают целесообразность компромиссного удовлетворения этих требований с помощью соответствующего выбора моделей. Это обстоятельство приводит к расширению множества используемых моделей и развитию алгоритмов адаптивного моделирования.

Формирование модели планирования развития электрической сети начинают с составления расчетной схемы, где показываются существующие узлы и ветви, новые узлы и возможные дополнительные трассы линий, связывающих объекты в систему. Здесь должны учитываться и те линии, которые были найдены в результате анализа модели по выбору структуры генерирующих мощностей. Расчетная схема должна быть разумно избыточной и включать дополнительные линии, так чтобы не пропустить возможные оптимальные связи [11].

Для рассмотренной выше сети избыточная расчетная схема может быть представлена графом (рис. 2.3).

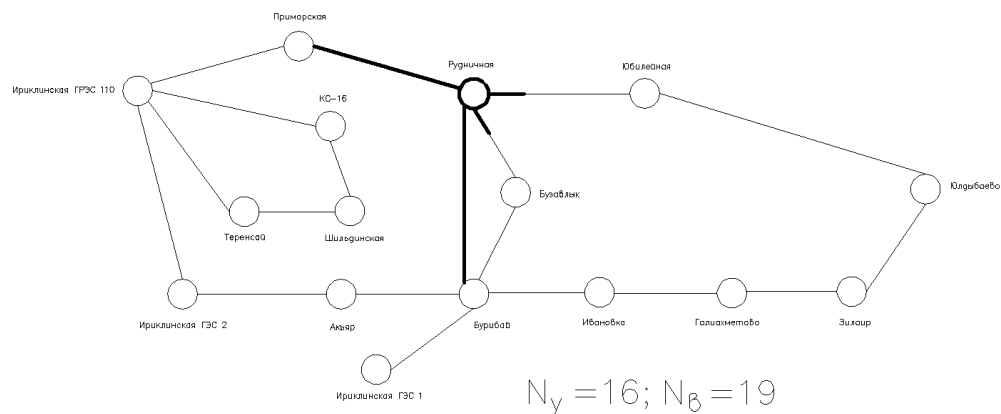


Рис. 2.3. Граф рассмотренной сети

Для узлов должны быть заданы прогнозируемые нагрузки и мощности вводимых блоков. Таким образом, расчетная схема будет иметь  $J$  расчетных узлов, из них  $J_0$  – существующих; т.е. индекс узлов  $j = 1, \dots, J_0, J_0+1, \dots, J$ . Число ветвей в расчетной схеме  $S$ , из которых  $S_0$  – существующих.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

В качестве неизвестных можно принять потоки активной мощности по ветвям  $P = \{P_1, \dots, P_s, \dots, P_S\}$ .

В качестве целевой функции могут быть рассмотрены затраты в существующие линии, пропорциональные потерям энергии, и в новые линии, для которых сечение не выбрано, определяемые в соответствии с аппроксимирующими выражениями для затрат:

$$F(P) = \sum_{(s)}^{S_0} b_s P_s^2 + \sum_{s \in S_{\text{нов}}} 3_i(P_s) l_s \rightarrow \min, \quad (6)$$

где 
$$b_s = \frac{r_0 l_s}{U_{\text{ном}}^2 \cos^2 \varphi} \tau \beta. \quad (7)$$

На неизвестные потоки мощности по ветвям накладывается условие баланса мощностей в узлах, которое может быть записано в матричной форме:

$$P = M \cdot P_{\text{вн}}. \quad (8)$$

$M$  – прямоугольная матрица соединений узлы-ветви, причем ее элементы для узла и ветви  $s$  обозначаются  $m_{js}$  и могут принимать значения, равные 1, если ветвь выходит из узла; +1, если ветвь входит в узел и 0, если она не связана с узлом.

Уравнение баланса для узла на рис.2.4 будет выглядеть так:

$$1 \cdot P_1 + 0 \cdot P_2 - 1 \cdot P_3 + 1 \cdot P_4 + P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = 0.$$

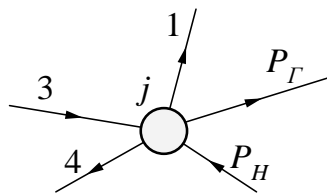


Рис. 2.4

В общем виде уравнение баланса для любого  $j$ -ого узла можно записать:

$$\sum_S m_{jS} P_S = P_{\text{H}} - P_{\Gamma} = P_{\text{вн}}. \quad (9)$$

Таким образом, задача выбора оптимальной схемы сети заключается в поиске минимума некоторой нелинейной функции  $F(P) \rightarrow \min$  при соблюдении линейного ограничения в форме равенства  $G(P) = M P - P_{вн} = 0$ .

Сформулированная таким образом задача планирования развития сети сводится к задаче нелинейного программирования. Эта задача, как правило, имеет один экстремум [11]. Для решения её могут использоваться различные методы нелинейного программирования, например, метод проектирования градиента или контурный метод, которые и будут рассмотрены далее в главе 3.

Зависимость затрат новых ЛЭП от потоков  $P$  может определяться на основе известного метода экономических интервалов, рассмотренного также в главе 3.

### **Глава 3. Исследование методов формализации затрат в сетевую часть развивающейся электрической сети в экономико-математических моделях развития энергосистем**

#### **3.1 Выбор схемы сети методом проектирования градиента**

##### **3.1.1 Оптимизационная модель планирования развития электрических сетей**

Планирование развития сети проводится после выбора структуры электростанций, типа блоков и сроков их ввода. Задача определения схемы электрической сети гораздо сложнее из-за большого числа вариантов связи ЭС с узлами нагрузки. Применяемый метод сравнения требует значительных затрат на расчеты вариантов. Выбор для сравнения двух, трех вариантов с последующим расчетом не гарантирует поиска действительно наилучшего варианта.

В проведенном выборе схемы развития сети 110 кВ и 4-х предложенных вариантов, выбранный первый может и не являться самым хорошим. Поэтому сегодня актуальна разработка оптимизационных моделей для выбора наилучших схем развития сетей путем анализа всего допустимого множества вариантов.

При выборе новой сети, расчетная схема с избытком учитывает все разумно возможные связи нагрузочных узлов, в которых заданы максимальные нагрузки с генерирующими и существующими узлами или центром питания. В качестве

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

целевой функции используются затраты в ветви  $s$ :  $F = \sum Z_s(P_s)$ , зависящие от неизвестных потоков  $P_s$  ветвей. Допустимая область определяется условиями баланса в узлах сети:  $G(P) = M \cdot P - P_{BH} = 0$ ,

где  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_s, \dots, P_n\}$  – вектор неизвестных потоков по ветвям;

$P_{BH} = \{P_{BH1}, P_{BH2}, \dots, P_{BHn}\}$  – вектор узловых мощностей;

$M$  – матрица соединений узлы-ветви.

Для определения затрат  $Z_s(P_s)$  в таких ветвях, сложность учета затрат для возможных новых определяется тем, что для них неизвестны еще сечения, поэтому, как известно, используется метод экономических интервалов.

Рассмотрим эту методику для учета затрат в кабельные линии.

Затраты в кабельные линии определяются сечением и передаваемой мощностью. При планировании заранее не известно сечение кабельной линии, следовательно, затраты необходимо представить функцией только от мощности, исключив сечение, но сохранив возможность определения сечения по найденному в результате решения потоку. Для этого может использоваться известный метод экономических интервалов.

Затраты на 1 км кабельной линии определенного типа и  $i$ -го сечения  $S_i$  определяются как приведенные затраты [11]:

$$Z_i = k_{0i} (E_H + a) + \frac{P^2}{U_{ном}^2 \cos^2 \varphi} r_{0i} \tau \beta, \quad (10)$$

где  $k_{0i}$  – удельные затраты;

$E_H$  – нормативный коэффициент;

$a$  – коэффициент амортизационных отчислений;

$\beta$  – стоимость потерянной электроэнергии,

$\tau$  – число часов наибольших потерь.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

Для нашего случая рассмотрим кабельные линии АСБУ: А – алюминиевая жила, С – бумажная пропитанная изоляция, Б – свинцовая броня, У – усовершенствованный.

Рассмотрим допустимые для принятого напряжения  $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$  сечения 10-240 мм<sup>2</sup>.

Пример расчета зависимости удельных затрат от мощности Р покажем на примере кабельной линии сечением 120 мм<sup>2</sup> при  $P = 1 \text{ МВт}$ . Примем следующие значения технико-экономических показателей:

$$k_0^{1991z} = 15,4 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{км}},$$

где  $k_0^{1991z}$  – стоимость кабельной линии 10 кВ сечением 120 мм<sup>2</sup> в 1991 году [8].

Приведем к ценам 2015г. [10]:  $k_0^{2015z} = 15,4 \cdot 24,98 \cdot 7,94 = 3054,45 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{км}},$

$\beta = 1,76 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$  – по состоянию на 1 января 2015 года;

$a = 5\%$  – из справочника [8];

Срок окупаемости примем 8 лет:  $E_H = \frac{1}{T_{ок}}; E_H = 0,125;$

$\tau = 4000 \text{ ч}; \cos \phi = 0,9; r_0 = 0,258 \text{ Ом} / \text{км}$  – для одножильного кабеля АСБУ [8].

Получим:

$$Z_0 = 3054,45 \cdot (0,125 + 0,05) + \frac{1^2}{10^2 \cdot 0,9^2} \cdot 0,258 \cdot 4000 \cdot 1,76 = 556,952 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{км} \cdot \text{год}}$$

Результаты расчета сведены в табл. 7:

Таблица 7 – Затраты в тыс.руб/км

Р, МВт	0	1	2	3	4	5
	S, мм <sup>2</sup>					

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
-----	------	----------	---------	------	------

АСБУ 50	426,929	480,8	642,475	911,907	1289	1774
АСБУ 70	454,697	493,2	608,708	801,222	1071	1417
АСБУ 95	496,349	524,7	609,684	751,353	949,69	1205
АСБУ 120	534,529	557	624,224	736,342	893,308	1095
АСБУ 185	628,246	642,8	686,304	758,877	860,479	991,11
АСБУ 240	708,078	719,3	752,925	808,985	887,468	988,374

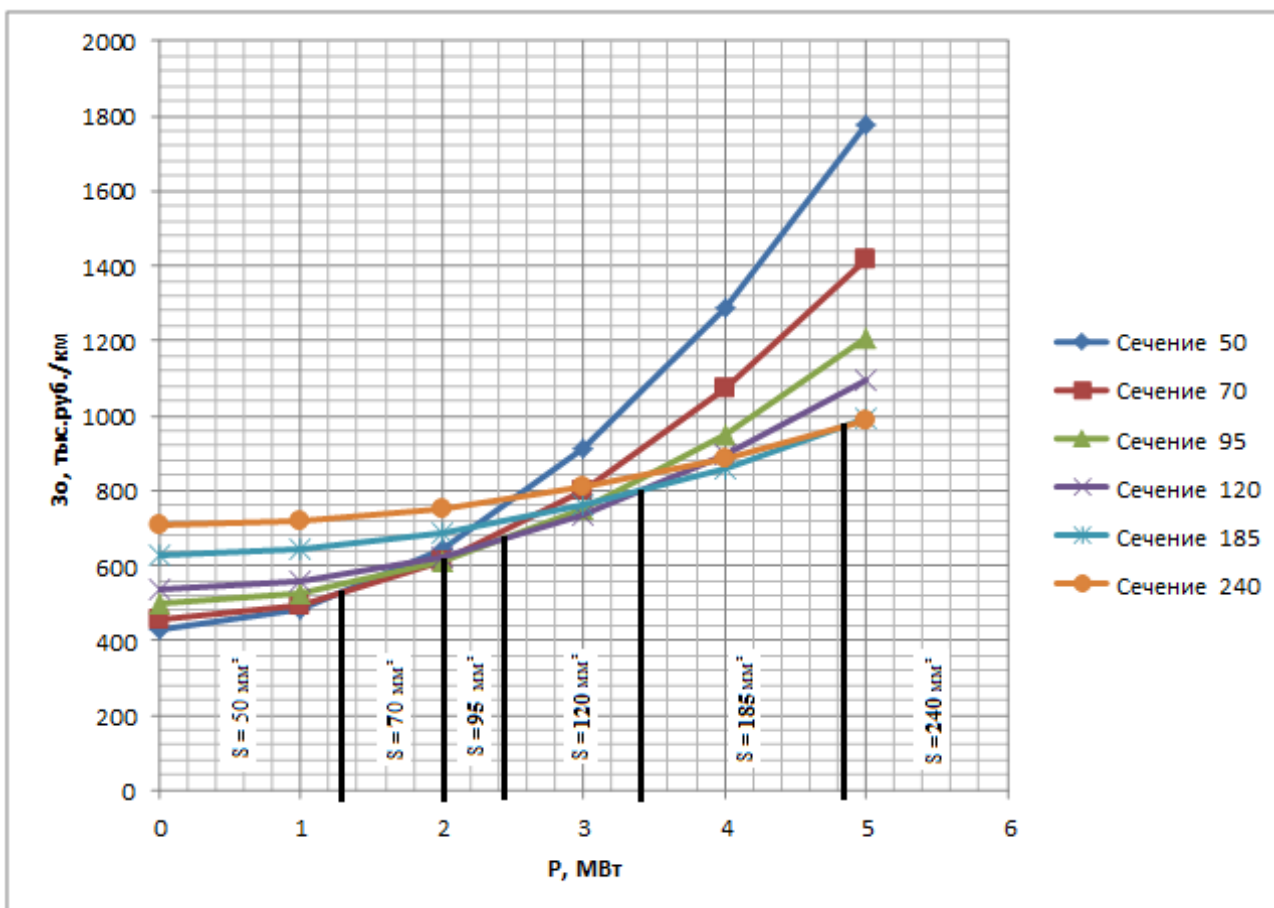


Рис. 3.1. Семейство пересекающихся парабол

Точки пересечения на рис. 3.1 определяют границы экономических интервалов по мощности P, которые целесообразны для каждого сечения.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата



Таблица интервалов может использоваться для определения сечений по найденным потокам  $P_s$  ветвей.

Функция минимальных затрат от  $P$  определяется нижней огибающей затрат для разных сечений. Она неудобна для использования в моделях, т.к. на границах интервалов кривая меняет изгиб, и производные имеют разрыв. Поэтому нижнюю огибающую аппроксимируют плавной зависимостью.

В качестве предиктора могут использоваться разные функции  $z_0(P) = a + bP + cP^2$ ,  $z_0(P) = \begin{cases} a + b|P|, & P > 0; \\ 0, & P = 0. \end{cases}$ ,  $z_0(P) = bP$ ,  $z_0(P) = cP^2$ .

Целью исследования является проверка алгоритма минимизации нелинейной целевой функции методом приведенного градиента. Поэтому определим с помощью метода наименьших квадратов коэффициент  $C_0$  простейшего нелинейного предиктора  $cP^2$ .

С этой целью из нижней огибающей составим выборку из 5-6 точек в рабочем диапазоне мощностей [11].

$$F(c_0) = \frac{1}{n} \sum_{(i)} (z_i - c_0 P_i^2)^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Условие равенства нулю производной:

$$\frac{dF}{dc_0} = -2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{(i)} (z_i - c_0 P_i^2) P_i^2 = 0 \quad (12)$$

С учетом обозначений:

$$\overline{Pz} = \frac{1}{n} \sum_{(i)} P_i^2 z_i \quad \text{и} \quad \overline{P^4} = \frac{1}{n} \sum_{(i)} P_i^4 \quad (13)$$

Выборка из 6 точек (табл. 8).

Таблица 8 – Выборка по нижней огибающей

Р, МВт	0,5	0,8	1	1,2	1,5	2
З <sub>0</sub> , тыс.руб/км	440,401	461,417	480,816	504,526	541,328	608,708

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

						Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\overline{P_3} = \frac{1}{6} \cdot 4044 = 674 \text{ и } \overline{P^2} = \frac{1}{6} \cdot 24,8 = 4,1$$

Преобразуем к виду:  $\overline{P_3} - \overline{P^2} \cdot c_0 = 0$ , откуда найдем  $c_0 = \frac{\overline{P_3}}{\overline{P^2}}$ ;

$$c_0 = \frac{674}{4,1} = 163 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{МВт} \cdot \text{км}}$$

### 3.1.2 Метод приведенного градиента

Таким образом, математическая модель выбора сети рассматривается как нелинейная:  $F(P) = \sum_{(s)} c_0 \cdot P_s^2$

$$F(P) \rightarrow \min \text{ при } G(P) = M \cdot P - P_{BH} = 0.$$

Основным методом безусловной оптимизации является градиентный метод, основное уравнение которого:

$$P^{(k+1)} = P^{(k)} - \nabla F(P^{(k)}) \cdot t, \quad (14)$$

где  $\nabla F(P^{(k)})$  – градиент на k-ой итерации

t – шаг.

Для учета ограничений  $G(P)$  рассмотрим простейший пример, в котором необходимо выбрать сеть для питания только одного узла (рис. 3.2). Полагаем, что затраты представлены квадратичными зависимостями. В качестве исходной точки примем  $P_0 = (0, P_n)$ .

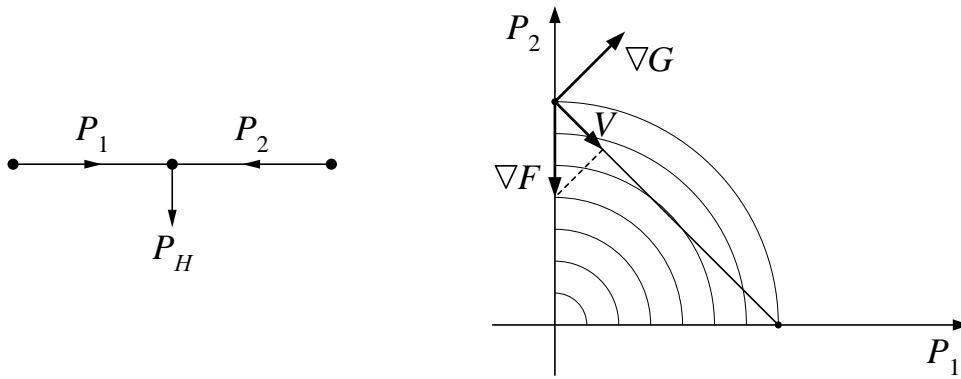


Рис. 3.2. Пример сети для питания только одного узла

В любой точке должно выполняться ограничение:

$$G(P) = P_1 + P_2 - P_H = 0 \quad (15)$$

При учете ограничений движение к минимуму должно осуществляться по проекции градиента на поверхность ограничений, т.е. вдоль вектора  $V$ . Вектор  $V$  можно получить путем исключения из  $\nabla F$  составляющих, перпендикулярных поверхности ограничений. Эти составляющие образуют градиент ограничений  $\nabla G$ .

Таким образом, вектор  $V$  определяется по выражению:

$$V = -\nabla F + \lambda \nabla G. \quad (16)$$

Для определения неопределенных множителей  $\lambda$ , образующих вектор  $V$ , используется условие равенства нулю скалярного произведения:

$$(V, \nabla G) = 0. \quad (17)$$

Из этого условия, приняв для линейного ограничения в общем виде  $G(P) = M \cdot P - P_{BH}$  градиент равным  $\nabla G = M$ , можно найти  $\lambda$ . Действительно, из преобразования

$$(\nabla G, V) = (M, (-\nabla F + M^T \lambda)) = -M \nabla F + M M^T \lambda = 0 \quad (18)$$

можно получить следующее матричное выражение для множителей  $\lambda$

$$\lambda = (M M^T)^{-1} M \nabla F. \quad (19)$$

Составляющие вектора множителей  $\lambda$  позволяют определить все составляющие вектора  $V$ :

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
-----	------	----------	---------	------	------

$$v_s = -\frac{\partial F}{\partial P_s} + \sum_{(j)} \lambda_j m_{js}, \quad (20)$$

и использовать их в процедуре градиентного метода

$$P_s^{(k+1)} = P_s^{(k)} - v_s \cdot t. \quad (21)$$

Однако, найти проекцию градиента можно проще, если провести несложное преобразование:

$$V = -\nabla F + M^T (MM^T)^{-1} M \nabla F = -\nabla F (1 - M^T (MM^T)^{-1} M) = -\nabla F \cdot \Pi, \quad (22)$$

где  $\Pi = 1 - M^T (MM^T)^{-1} M$  – матрица проектирования.

На рис. 3.3 показан алгоритм градиентного метода с выбором оптимального шага.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не выполнится условие требуемой точности для всех составляющих  $v_s \leq eps$  [11].

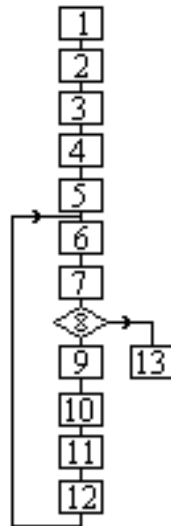


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма с выбором оптимального шага

Назначение блоков:

1. Формирование расчетной схемы.
2. Определение типа функций для расчета затрат и их производных для всех ветвей.
3. Формирование матрицы инцидентий  $M$ .
4. Определение матрицы проектирования градиента  $\Pi$ .

5. Исходное приближение потоков  $P = P_0$ .
6. Вычисление градиента  $\nabla F$  в точке  $P$ .
7. Определение проекции  $V$  градиента.
8. Проверка условия окончания  $|V| \leq eps$ .
9. Организация пробного шага  $P_1 = P - V \cdot t_0$ .
10. Вычисление градиента и проекции  $V_1$  в конце шага.
11. Определение оптимального шага  $t_* = t_0 \frac{(V,V)}{(V,V)-(V,V_1)}$ .
12. Рабочий шаг  $P = P - V \cdot t_*$ .
13. Вывод результатов.

### 3.1.3 Пример оптимизации тестовой сети градиентным методом

В качестве тестовой сформируем произвольную сеть 10 кВ, планируемую для системы электроснабжения пригородного района.

Общая прогнозируемая нагрузка сети 8,0 МВт при  $tg\phi = 0,5$ .

Граф сети приведен на рис. 3.4, на котором показано размещение ТП, указаны длины возможных к прокладке кабельных линий в км и нагрузки в МВт.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Лист

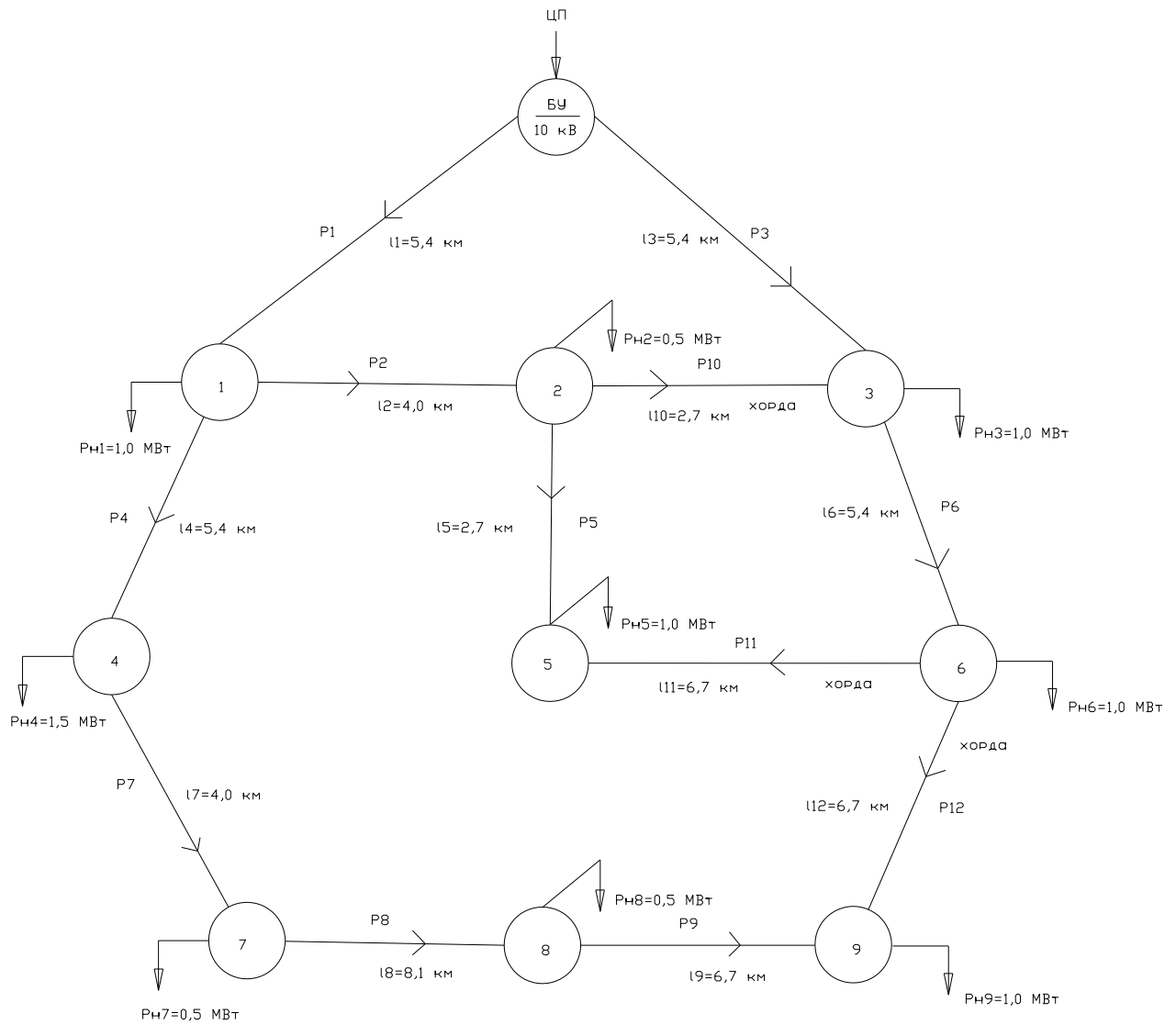


Рис. 3.4. Схема распределительной сети 10/0,4 кВ

Для подготовки исходных данных в схеме пронумерованы узлы и ветви. Общее число независимых узлов  $m=9$ , ветвей  $n=12$ . Для ветвей определены положительные направления. Матрица соединений узлы-ветви:

$$M := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

Вектор  $C$  – коэффициент целевой функции, элементы которого определяются как  $C_i = C_0 \cdot l_i$ :

$$C^T = |892, 669, 892, 892, 446, 892, 669, 1338, 1115, 446, 1115, 1115|$$

Вектор узловых активных мощностей  $P$ :

$$P_{BH}^T = |1,0; 0,5; 1,0; 1,5; 1,0; 1,0; 0,5; 0,5; 1,0|$$

В методе проектирования градиента в качестве неизвестных приняты потоки в ветвях:

$$P^T = |P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}|$$

В качестве исходного приближения потокораспределения примем потоки в хордах равными  $P_x = 0$ .

Рассмотрим балансовое ограничение  $MP = P_{BH}$ . Все потоки по ветвям можно разделить на две составляющие:

$$P = \{P_\partial, P_x\}, \quad (23)$$

где  $P_\partial$  – потоки в дереве, ветви которого связывают все узлы с балансирующим без образования контуров;

$P_x$  – потоки в хордах, т.е. в ветвях, образующих контуры.

Основное ограничение  $MP = P_{BH}$  можно представить разделенным на блочные матрицы, как показано на рис. 3.5.

$$\begin{array}{c} \text{У} \\ \text{З} \\ \text{Л} \\ \text{Ы} \end{array} \begin{array}{c} \text{ВЕТВИ} \\ \hline \begin{array}{|c|c|} \hline M_\partial & M_x \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline P_\partial \\ \hline P_x \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline P_{BH} \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Рис. 3.5. Блочные матрицы для метода покоординатной оптимизации

Разделим матрицу соединений на блочные матрицы согласно методике описанной выше.

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
-----	------	----------	---------	------	------

$$M_d := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad M_h := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Рис. 3.6. Блочные матрицы ветвей дерева  $M_d$  и хорд  $M_h$

Потоки в ветвях дерева однозначно определяются потоками в хордах, что следует из соотношений, полученных на основе операций с блочными матрицами, и представленных ниже:

$$\begin{aligned} M_\partial P_\partial + M_x P_x &= P_{вн}, \\ M_\partial P_\partial &= P_{вн} - M_x P_x, \\ P_\partial &= M_\partial^{-1} (P_{вн} - M_x P_x). \end{aligned} \quad (24)$$

В качестве исходного приближения можно принять:

$$P_x^{(0)} = 0. \quad (25)$$

Тогда потоки в деревьях:

$$P_\partial^{(0)} = M_\partial^{-1} P_{ВН}. \quad (26)$$

Далее рассмотрим результаты выполнения блоков алгоритма. Блок 4 – определение матрицы проектирования:  $\Pi = 1 - M^T (MM^T)^{-1} M$  [11].

В результате последовательного выполнения матричных операций получим:

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0	0.292	0.229	-0.292	0.063	0.042	-0.104	0.063	0.063	0.062	0.187	-0.042	-0.062	
1	0.229	0.323	-0.229	-0.094	0.104	-0.01	-0.094	-0.094	-0.094	0.219	-0.104	0.094	
2	-0.292	-0.229	0.292	-0.062	-0.042	0.104	-0.062	-0.063	-0.063	-0.188	0.042	0.063	
3	0.063	-0.094	-0.062	0.156	-0.062	-0.094	0.156	0.156	0.156	-0.031	0.063	-0.156	
4	0.042	0.104	-0.042	-0.062	0.292	-0.229	-0.063	-0.063	-0.063	-0.188	-0.292	0.063	
$\Pi =$	5	-0.104	-0.01	0.104	-0.094	-0.229	0.323	-0.094	-0.094	-0.094	0.219	0.229	0.094
	6	0.063	-0.094	-0.062	0.156	-0.063	-0.094	0.156	0.156	0.156	-0.031	0.063	-0.156
	7	0.063	-0.094	-0.063	0.156	-0.063	-0.094	0.156	0.156	0.156	-0.031	0.063	-0.156
	8	0.062	-0.094	-0.063	0.156	-0.063	-0.094	0.156	0.156	0.156	-0.031	0.063	-0.156
	9	0.187	0.219	-0.188	-0.031	-0.188	0.219	-0.031	-0.031	-0.031	0.406	0.187	0.031
	10	-0.042	-0.104	0.042	0.063	-0.292	0.229	0.063	0.063	0.063	0.187	0.292	-0.062
	11	-0.062	0.094	0.063	-0.156	0.063	0.094	-0.156	-0.156	-0.156	0.031	-0.062	0.156

Итерационный расчет начинается с принятия исходного приближения  $P_0$ , определения величины градиента и проекции его на поверхность ограничений.

$$P_{0d} = M_d^{-1} P_{0n}; P_0 = |P_{0d}, P_{0x}|; \nabla F = 2 \cdot C \cdot P_0; V = \Pi \cdot \nabla F; \quad (27)$$

$$P_{0d} = M_d^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ -0.5 \\ -1 \\ -1.5 \\ -1 \\ -1 \\ -0.5 \\ -0.5 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 1.5 \\ 2 \\ 3.5 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1.5 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad P_0 = \begin{pmatrix} 6 \\ 1.5 \\ 2 \\ 3.5 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1.5 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \nabla F = \begin{pmatrix} 10704 \\ 2007 \\ 3568 \\ 6244 \\ 892 \\ 1784 \\ 2676 \\ 4014 \\ 2230 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad V = \Pi \cdot \nabla F = \begin{pmatrix} 0 \\ 3.34 \cdot 10^3 \\ 936.135 \\ -3.34 \cdot 10^3 \\ 2.404 \cdot 10^3 \\ -590.021 \\ -1.814 \cdot 10^3 \\ 2.404 \cdot 10^3 \\ 2.404 \cdot 10^3 \\ 2.404 \cdot 10^3 \\ 1.526 \cdot 10^3 \\ 590.021 \\ -2.404 \cdot 10^3 \end{pmatrix}$$

Следующий шаг, рассчитаем целевую функцию в исходной точке:

$$F(P_0) = 892 \cdot 6^2 + 669 \cdot 1,5^2 + 892 \cdot 2^2 + 892 \cdot 3,5^2 + 446 \cdot 1^2 + 892 \cdot 1^2 + 669 \cdot 2^2 + 1338 \cdot 1,5^2 + 1115 \cdot 1^2 + 446 \cdot 0^2 + 1115 \cdot 0^2 + 1115 \cdot 0^2 = 56251,75$$

Проверка модуля  $|V|$  на достижение условия окончания дает отрицательный результат.

Затем в направлении проекции делается пробный шаг  $t_0 = 0,0005$  и определяются потоки по ветвям  $P_1$  в конце этого шага, градиент и его проекция.

$$t_0 := 0.0005$$

	0		0				
$P := P_0 - V \cdot t_0 =$	0	4.33	$\nabla F_1 :=$	7724.72	$V_1 := \Pi \cdot \nabla F_1 =$	0	687.23
	1	1.032		1380.816		1	530.824
	2	3.67		6547.28		2	-687.23
	3	2.298		4099.632		3	156.407
	4	1.295		1155.14		4	-802.744
	5	1.907		3402.088		5	646.338
	6	0.798		1067.724		6	156.407
	7	0.298		797.448		7	156.407
	8	-0.202		450.46		8	156.407
	9	-0.763		680.596		9	$1.334 \cdot 10^3$
	10	-0.295		657.85		10	802.744
	11	1.202		2680.46		11	-156.407

После чего определим шаг близкий к оптимальному:

$$t_* = t_0 \frac{(V, V)}{(V, V) - (V, V_1)} \quad (28)$$

$$t_{opt} := 0.0005 \cdot \frac{(5.84 \times 10^7)}{(5.84 \times 10^7) - 2.488 \times 10^6} = 5.222 \times 10^{-4}$$

$$t_{opt} = 5.222 \times 10^{-4}$$

	0		0				
$P := P_0 - V \cdot t_{opt} =$	0	4.256	$\nabla F :=$	7592.704	$V := \Pi \cdot \nabla F =$	0	301.022
	1	1.011		1352.718		1	433.777
	2	3.744		6679.296		2	-301.022
	3	2.244		4003.296		3	-132.755
	4	1.308		1166.736		4	-85.604
	5	1.947		3473.448		5	218.359
	6	0.744		995.472		6	-132.755
	7	0.244		652.944		7	-132.755
	8	-0.256		-570.88		8	-132.755
	9	-0.797		-710.924		9	519.381
	10	-0.308		-686.84		10	85.604
	11	1.256		2800.88		11	132.755

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Полученное значение  $V$  значительно меньше предыдущего, поэтому закончим итерационный процесс.

Теперь рассчитаем целевую функцию после применения метода градиента:

$$F(P) = 892 \cdot 4,256^2 + 669 \cdot 1,011^2 + 892 \cdot 3,744^2 + 892 \cdot 2,244^2 + 446 \cdot 1,308^2 + 892 \cdot 1,947^2 + 669 \cdot 0,744^2 + 1338 \cdot 0,244^2 + 1115 \cdot (-0,256)^2 + 446 \cdot (-0,797)^2 + 1115 \cdot (-0,308)^2 + 1115 \cdot 1,256^2 = 40651,895$$

По результатам расчета целевой функции  $F(P)$  видно, что она стала меньше по сравнению с исходной  $F(P_0)$ :

$$\delta F = 56251,75 - 40651,895 = 15599,855$$

Разница составляет 27,7%.

Следовательно, экономия составляет 27,7% по сравнению с исходным вариантом.

Полученные оптимальные потоки в ветвях  $P$  показаны на схеме (рис. 3.7).

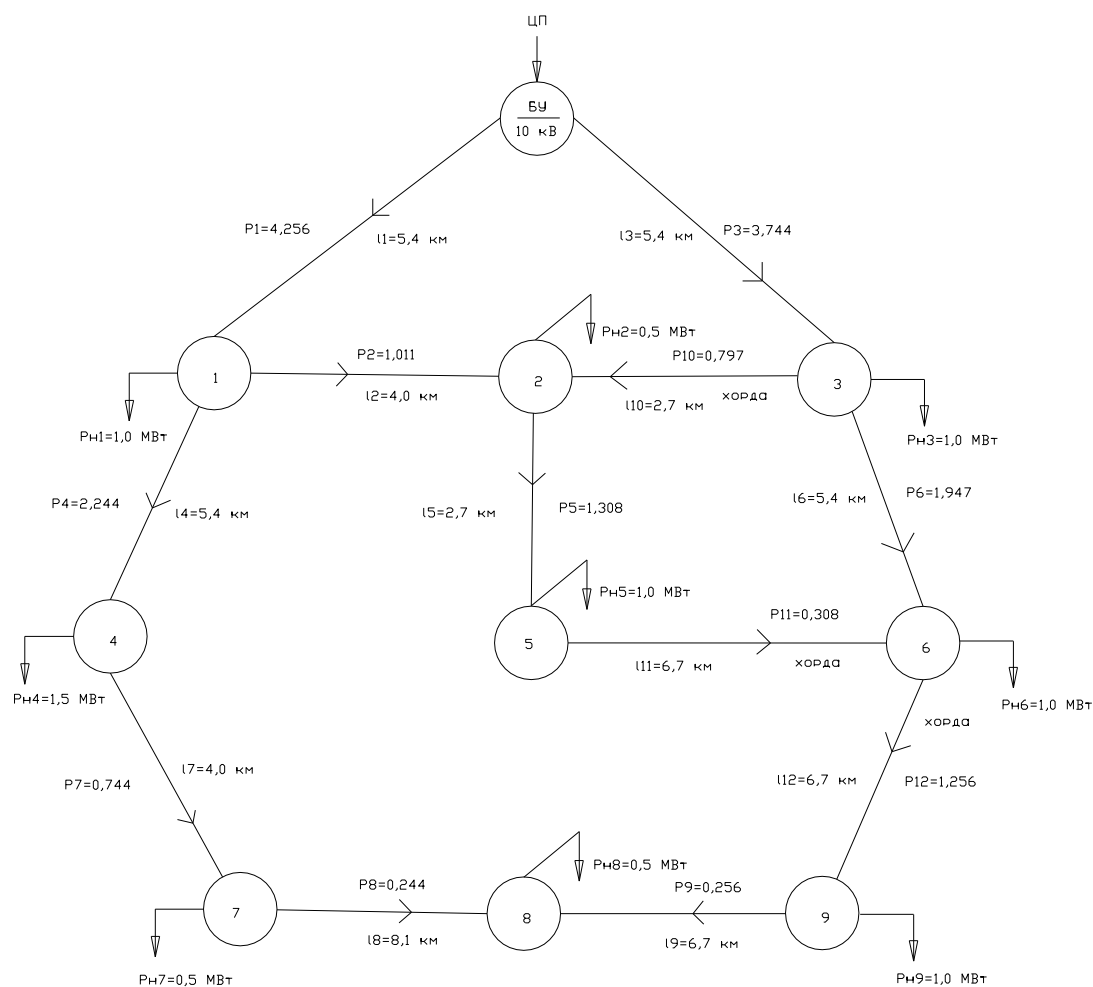


Рис. 3.7. Схема сети с оптимальными потоками в ветвях

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Лист

Найденные потоки можно считать оптимальными. Итерационный процесс можно завершить и по найденным потокам можно выбирать сечение кабельных линий (табл. 9).

Таблица 9 – таблица для выбора сечений кабельных линий

№ ветви	$P_0$ , МВт	$P_{opt}$ , МВт	Сечение, мм <sup>2</sup>
1	6	4,256	185
2	1,5	1,011	50
3	2	3,744	185
4	3,5	2,244	95
5	1	1,308	70
6	1	1,947	70
7	2	0,744	50
8	1,5	0,244	20
9	1	0,256	50
10	0	0,797	50
11	0	0,308	50
12	0	1,256	50

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

### 3.2 Выбор схемы сети контурным методом

В рассмотренном методе число неизвестных равно числу ветвей расчетной схемы, что приводит к увеличению размерности оптимизационной модели. В электрических сетях соотношение между количеством ветвей  $n$  и узлов  $m$  определяет число контуров  $k = n - m$ , которое всегда значительно меньше числа ветвей. Поэтому интерес представляет применение контурного метода оптимизации, что существенно сокращает размерность задачи оптимизации. Алгоритм контурной оптимизации рассмотрим на примере сети  $U_{ном} = 110$  кВ, выполненной воздушными ЛЭП, имеющей такую же конфигурацию.

Таким образом, задача оптимизации будет также заключаться в выборе оптимальной схемы сети. В качестве метода будет рассмотрен контурный метод. При этом используем и другой предиктор для учета затрат в виде  $Z(P) = a + bP$ .

Затраты в воздушные линии, так же как и в кабельные линии, определяются сечением и передаваемой мощностью аналогично предыдущему методу [11].

$$Z_i = k_{0i} (E_H + a) + \frac{P^2}{U_{ном}^2 \cos^2 \varphi} r_{0i} \tau \beta \cdot \quad (29)$$

Для анализа выберем провод марки АС – провод из алюминиевых проволок и стального сердечника.

Рассмотрим допустимые для принятого напряжения  $U_{ном} = 110$  кВ сечения 70-240 мм<sup>2</sup>. Пример расчета зависимости удельных затрат от мощности  $P$  покажем на примере ВЛ сечением 150 мм<sup>2</sup> при  $P = 10$  МВт. Примем следующие значения технико-экономических показателей [8]:

$$K_0^{1991z} = 42,0 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{км}} - \text{для ВЛ до } 150 \text{ мм}^2;$$

$$K_0^{1991z} = 47,0 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{км}} - \text{для ВЛ } 185\text{-}240 \text{ мм}^2$$

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

Приведем к ценам на 2017 г. [10]:  $K_0^{2017} = 42 \cdot 24,98 \cdot 7,94 = 8330,33 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{км}}$

$\beta = 3,54 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$  – с 1 января 2017 года.

$a = 10\%$  – коэффициент амортизации для ВЛ на металлических опорах [8].

Срок окупаемости примем 8 лет:  $E_n = \frac{1}{T_{ок}}$ ;  $E_n = 0,125$

$\tau = 4000 \text{ ч}$ ;  $\cos \varphi = 0,9$ ;  $r_0 = 0,204 \text{ Ом/км}$  – для ВЛ проводом АС-150/24 [8].

Получим:

$$Z_0 = 8330,33 \cdot (0,125 + 0,10) + \frac{10^2}{110^2 \cdot 0,9^2} \cdot 0,204 \cdot 4000 \cdot 3,54 = 1903,784$$

Результаты сведем в таблицу 10.

Таблица 10 – Затраты в тыс.руб/км

Р,МВт ВЛ	0	5	10	15	20	25	30
АС 70/11	1874,32	1889,564	1935,270	2011,518	2118,181	2255,379	2423,052
АС 95/16	1874,32	1885,193	1917,794	1972,179	2048,259	2146,118	2265,714
АС 120/19	1874,32	1883,134	1909,56	1953,648	2015,32	2094,648	2191,596
АС 150/24	1874,32	1881,689	1903,784	1940,643	1992,205	2058,529	2139,584
АС 185/29	2097,459	2103,202	2120,424	2149,152	2189,340	2241,033	2304,209
АС 240/32	2097,459	2101,721	2114,502	2135,822	2165,648	2204,011	2250,896

Принятые значения  $k_0$ , не отражающие зависимость от сечения в диапазонах 70-150 мм<sup>2</sup> и 185-240 мм<sup>2</sup> затрудняют математический анализ и вносят неопределенность в определение границ экономических интервалов (рис. 3.8).

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

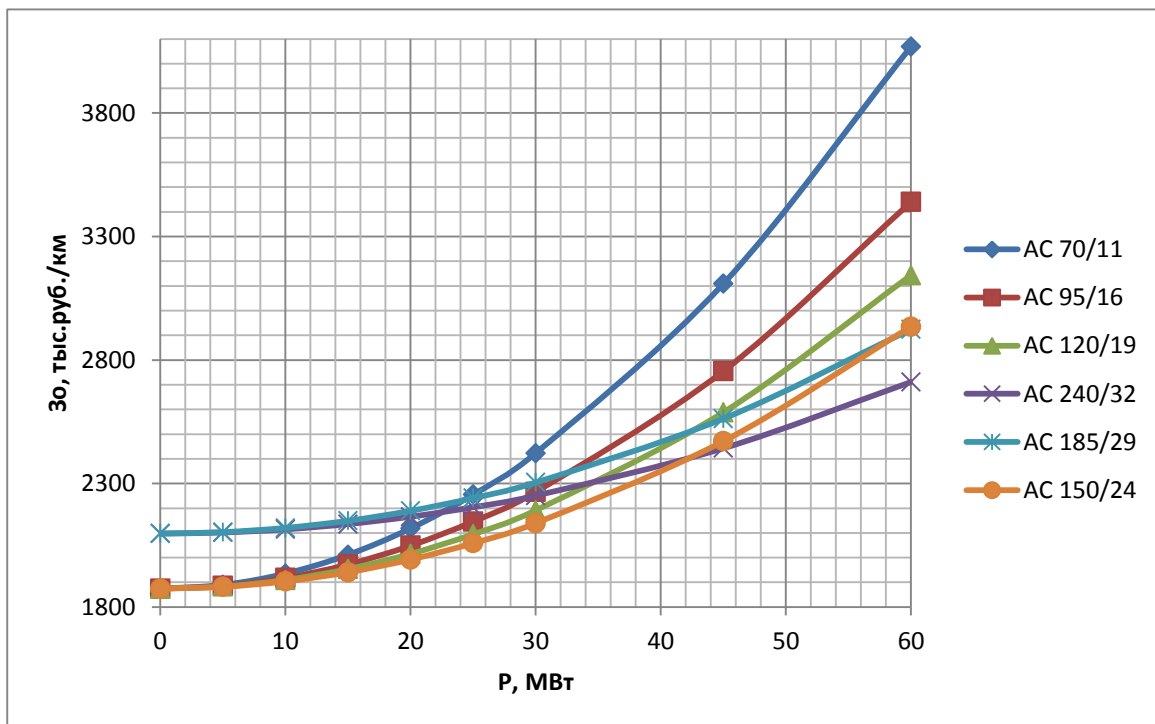


Рис. 3.8. Семейство пересекающихся парабол

Точки пересечения на рис. 3.8 определяют лишь границу перехода от AC-150/24 к AC-185/29.

Функция минимальных затрат от  $P$  определяется нижней огибающей затрат, которая в этом случае имеет только одну точку изменяющую наклон.

В качестве предиктора выберем функцию  $z_0(P) = \begin{cases} a + b|P|, & P > 0; \\ 0, & P = 0. \end{cases}$  которая

имеет большую точность, при малых нагрузках, чем выбранная в методе градиента функция  $z_0(P) = cP^2$ .

Неизвестные коэффициенты  $a, b$  для принятого предиктора подбираются так, чтобы квадрат среднеквадратической ошибки в точках выборки был минимальным. То есть, необходимо сформировать целевую функцию, которая будет зависеть только от коэффициентов  $a$  и  $b$ . Здесь подробнее рассмотрим метод наименьших квадратов (МНК) [11].

$$f(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b)]^2 \rightarrow \min. \quad (30)$$

Чтобы найти  $\min$ , достаточно взять производные по неизвестным коэффициентам:

$$\frac{\partial f}{\partial a} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b)] \left[ -\frac{\partial F}{\partial a} \right] = 0. \quad (31)$$

Таким образом для рассматриваемого предиктора:

$$F(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \rightarrow \min. \quad (32)$$

Производные по  $a$  и  $b$  образуют систему из 2-х уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) x_i = 0. \end{cases} \quad (33)$$

Введем следующие обозначения для средних значений:

$$\frac{1}{n} \sum y_i = \bar{y}; \quad \frac{1}{n} \sum x_i = \bar{x}; \quad \frac{1}{n} \sum y_i x_i = \overline{yx}; \quad \frac{1}{n} \sum x_i^2 = \overline{x^2}, \quad (34)$$

с учетом которых система приводится к виду

$$\begin{cases} a + b\bar{x} = \bar{y} \\ a\bar{x} + b\overline{x^2} = \overline{yx}, \end{cases} \quad (35)$$

решение которой и определяет искомые коэффициенты:

$$a = \frac{\bar{y} \cdot \overline{x^2} - \overline{yx} \cdot \bar{x}}{x^2 - \bar{x} \cdot \bar{x}}; \quad b = \frac{\overline{yx} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{x^2 - \bar{x} \cdot \bar{x}}. \quad (36)$$

Теперь, после того, как рассчитаны и сведены в таблицу затраты по маркам сечений и мощности, рассчитаем коэффициенты  $a$  и  $b$  для нижней огибающей затрат (табл. 11).

Таблица 11 – Точки на нижней огибающей затрат:

$P=x$	0	5	10	15	20	25
$3_0=y$	1874,32	1881,689	1903,784	1940,643	1992,205	2058,529
30	35	40	45	50	55	60
2139,584	2146,947	2191,157	2306,279	2331,849	2357,419	2382,0989



$$\bar{y} = \frac{1}{13} \cdot (1874,32 + 1881,689 + 1903,784 + 1940,643 + 1992,205 + 2058,529 + 2139,584 + 2146,947 + 2191,157 + 2306,279 + 2331,849 + 2357,419 + 2382,989) = 2115,953$$

$$\bar{x} = \frac{1}{13} \cdot (0 + 5 + 10 + 15 + 20 + 25 + 30 + 35 + 40 + 45 + 50 + 55 + 60) = 30$$

$$\overline{yx} = \frac{1}{13} \cdot (1874,32 \cdot 0 + 1881,689 \cdot 5 + 1903,784 \cdot 10 + 1940,643 \cdot 15 + 1992,205 \cdot 20 + 2058,529 \cdot 25 + 2139,584 \cdot 30 + 2146,947 \cdot 35 + 2191,157 \cdot 40 + 2306,279 \cdot 45 + 2331,849 \cdot 50 + 2357,419 \cdot 55 + 2382,989 \cdot 60) = 66834,815$$

$$\bar{x}^2 = \frac{1}{13} \cdot (0^2 + 5^2 + 10^2 + 15^2 + 20^2 + 25^2 + 30^2 + 35^2 + 40^2 + 45^2 + 50^2 + 55^2 + 60^2) = 1250$$

$$a = \frac{2115,953 \cdot 1250 - 66834,815 \cdot 30}{1250 - 30 \cdot 30} = 1825,319$$

$$b = \frac{66834,815 - 30 \cdot 2115,953}{1250 - 30 \cdot 30} = 9,589$$

Таким образом нижняя огибающая затрат описывается выражением:

$$Z_0(P) = 1825,319 + 9,589 \cdot P$$

Одной из задач, решаемых контурным методом, является определение базовой сети, называемой деревом минимальных затрат.

Эта задача заключается в выборе оптимального дерева из большого множества деревьев, определяемых с помощью определителя Трента для схемы (рис. 3.9).

Дерево состоит из ветвей, образующих разомкнутую часть расчетной схемы, обеспечивающих связи всех узлов с центром питания. Остальные ветви, образующие контура схемы, называются хордами.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

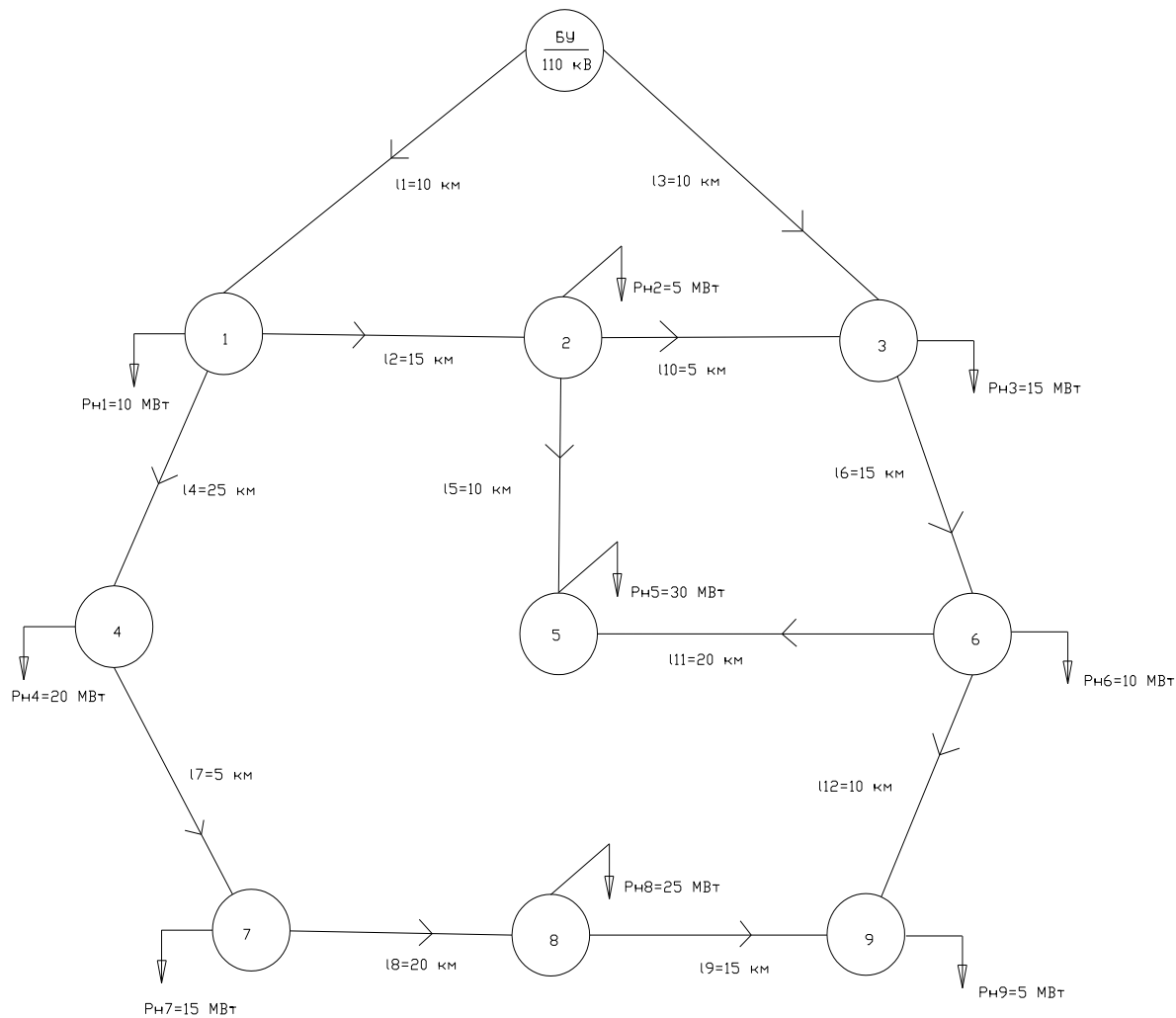


Рис. 3.9. Расчетная схема сети 110 кВ

В качестве хорд могут быть выбраны разные ветви исходной схемы, дополняющие выделенное дерево с образованием контуров. Число комбинаций определяется возможным количеством деревьев, рассчитываемых с помощью определителя Трента [11], формируемого для независимых узлов:

$$N_{\delta} = \det \begin{vmatrix} t_{11} & -t_{12} & \dots \\ -t_{21} & t_{22} & \dots \\ \dots & \dots & t_{33} \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix}, \quad (37)$$

где  $t_{ii}$  – число ветвей, связанных с узлом  $i$ ;  $t_{ij}$  – число ветвей, связывающих узлы  $i$  и  $j$ .

$$N_{\varphi} = \det \begin{vmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 3 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 2 \end{vmatrix} = 96$$

Таким образом, число деревьев для данной схемы равно 96.

Также из [6] выпишем допустимый длительный ток для неизолированных проводов марки АС для того, чтобы проверять может ли тот или иной провод пропускать ток, который будет течь по нему при разных конфигурациях сети.

АС-70/11  $I_{дон} = 265$  А; АС-95/16  $I_{дон} = 330$  А; АС-120/19  $I_{дон} = 390$  А;

АС-150/24  $I_{дон} = 450$  А; АС-185/29  $I_{дон} = 510$  А; АС-240/32  $I_{дон} = 605$  А;

Далее контурная оптимизация осуществляется по следующему алгоритму [11]:

1) Составляется расчетная схема.

2) Определяются зависимости для учета затрат в линии расчетной схемы. Для этого могут использоваться любые аппроксимирующие функции вплоть до точной нижней огибающей затрат в новые линии.

3) Выбираются и нумеруются хорды, для которых принимается исходное приближение потоков  $P_x^{(0)} = 0$ , и считаются потоки в ветвях дерева.

4) Организуется цикл по хордам, в котором последовательно выполняются следующие операции:

- для текущей хорды просматривается контур, который она замыкает;
- по принятому потоку в хорде определяются потоки в ветвях контура;
- по потокам в ветвях контура считаются затраты в каждую ветвь и общие затраты во все ветви контура;

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

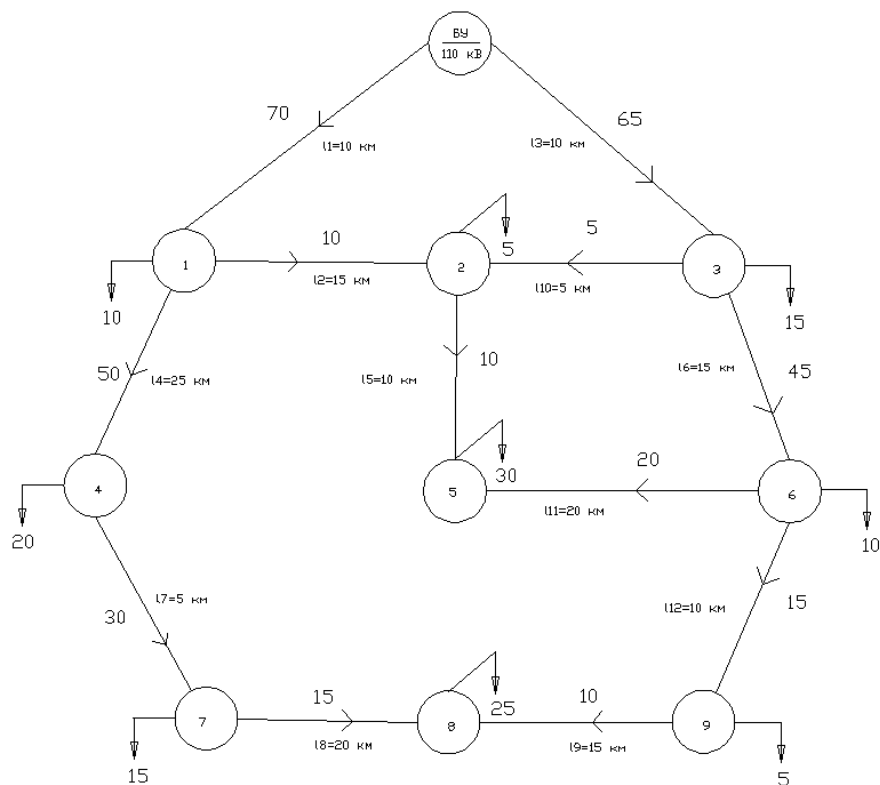
– последовательно изменяя значение потоков хорды в сторону возрастания или убывания, при этом определяются новые потоки в ветвях контура и новые затраты, которые сравниваются с предыдущими до поиска минимума.

Таким образом, проводится оптимизация. Если затраты считаются по аппроксимации  $Z = a + bP$ , то можно рассматривать такие потоки в хорде, при которых в контуре появляется ветвь с нулевой мощностью, что обеспечивает минимум затрат. После этого текущая хорда переносится в эту ветвь.

5) После выхода из цикла новое положение хорд сравнивается с предыдущим. Если оно не совпадает, то осуществляется очередной цикл оптимизации. При совпадении расчет заканчивается. Обычно достаточно двух-трех циклов.

По расчетной схеме, представленной ниже, (рис. 3.10) рассчитаем общие затраты во все существующие ветви до начала оптимизации:

$$\begin{aligned}
 Z_{нач. без. опт.} &= (1825,319 + 9,589 \cdot 70) \cdot 10 + (1825,319 + 9,589 \cdot 65) \cdot 10 + (1825,319 + 9,589 \cdot 10) \cdot 15 + \\
 &+ (1825,319 + 9,589 \cdot 5) \cdot 5 + (1825,319 + 9,589 \cdot 50) \cdot 25 + (1825,319 + 9,589 \cdot 10) \cdot 10 + \\
 &+ (1825,319 + 9,589 \cdot 45) \cdot 15 + (1825,319 + 9,589 \cdot 20) \cdot 20 + (1825,319 + 9,589 \cdot 30) \cdot 5 + \\
 &+ (1825,319 + 9,589 \cdot 15) \cdot 10 + (1825,319 + 9,589 \cdot 15) \cdot 20 + (1825,319 + 9,589 \cdot 10) \cdot 15 = 337119,34
 \end{aligned}$$



Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист

Рис. 3.10. Расчетная схема до начала оптимизации

Теперь, следуя алгоритму, проведем оптимизацию, расчеты затрат по ветвям при разных расположениях хорд (рис. 3.11-3.13) сведем в таблицы 12-14.

1. Исходное положение хорд 8-9, 6-5, 1-2.  $P_x=0$ . Внешний I контур.
2. Положение хорд №2 7-8, 6-5, 1-2.  $P_x=0$ . Внешний I контур.
3. Положение хорд №3 7-4, 6-5, 1-2.  $P_x=0$ . Внешний I контур.

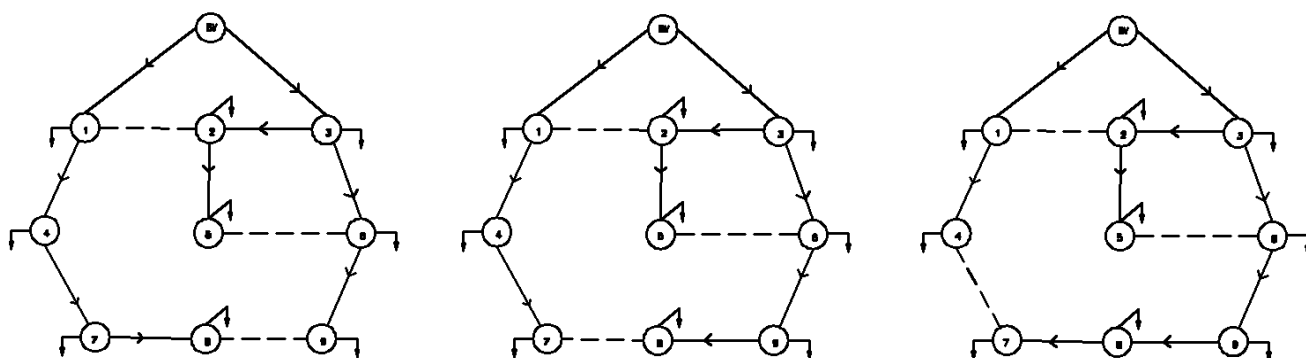


Рис. 3.11. Расчетные схемы при изменении хорд во внешнем I контуре

Таблица 12 – Внешний I контур

	Хорда 8-9, 6-5, 1-2; $P_x=0$		Хорда 7-8, 6-5, 1-2; $P_x=0$		Хорда 7-4, 6-5, 1-2; $P_x=0$	
	$P_s$ , МВт	$3_s$	$P_s$ , МВт	$3_s$	$P_s$ , МВт	$3_s$
БУ-1	70	24965,49	45	22568,24	30	21129,89
БУ-3	65	24486,04	90	26883,29	105	28321,64
1-2	0	0	0	0	0	0
3-2	35	10804,67	35	10804,67	35	10804,67
1-4	60	60016,475	35	54023,35	20	50427,475
2-5	30	21129,89	30	21129,89	30	21129,89
3-6	15	29537,31	40	33133,185	55	35290,71
6-5	0	0	0	0	0	0
4-7	40	11044,395	15	9845,77	0	0
6-9	5	18732,64	30	21129,89	45	22568,24
7-8	25	41300,88	0	0	-15	39383,08
9-8	0	0	25	30975,66	40	33133,185
		$\Sigma=242017,79$		$\Sigma=230493,945$		$\Sigma=262188,78$

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

1. Исходное положение хорд 7-8, 2-5, 1-2.  $P_x=0$ . II контур.

2. Положение хорд №2 7-8, 3-6, 1-2.  $P_x=0$ . II контур.

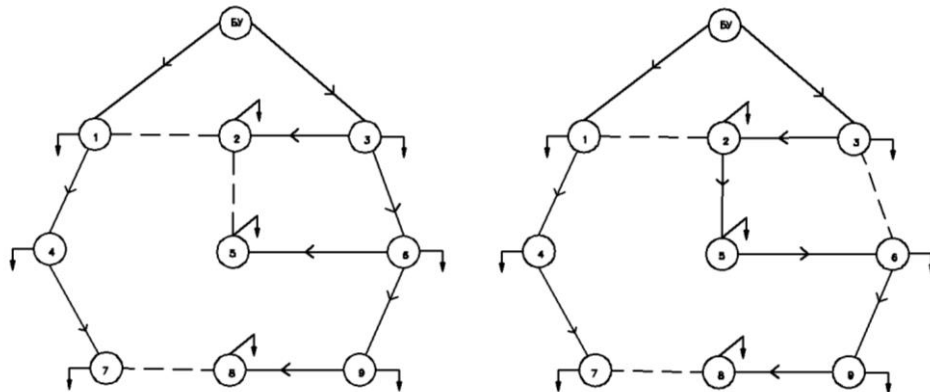


Рис. 3.12. Расчетные схемы при изменении хорд во II контуре

Таблица 13 – II контур

	Хорда 7-8, 2-5, 1-2; $P_x=0$		Хорда 7-8, 3-6, 1-2; $P_x=0$	
	$P_s$ , МВт	$z_s$	$P_s$ , МВт	$z_s$
БУ-1	45	22568,24	45	22568,24
БУ-3	90	26883,29	90	26883,29
1-2	0	0	0	0
3-2	5	9366,32	75	12722,47
1-4	35	54023,35	35	54023,35
2-5	0	0	70	24965,49
3-6	70	37448,235	0	0
6-5	30	42259,78	-40	44177,58
4-7	15	9845,77	15	9845,77
6-9	30	21129,89	30	21129,89
7-8	0	0	0	0
9-8	25	30975,66	25	30975,66
		$\Sigma=254500,535$		$\Sigma=247291,74$

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм Лист № докум. Подпись Дата

1. Исходное положение хорд 7-8, 6-5, 2-3.  $P_x=0$ . III контур.
2. Положение хорд №2 7-8, 6-5, БУ-1.  $P_x=0$ . III контур.

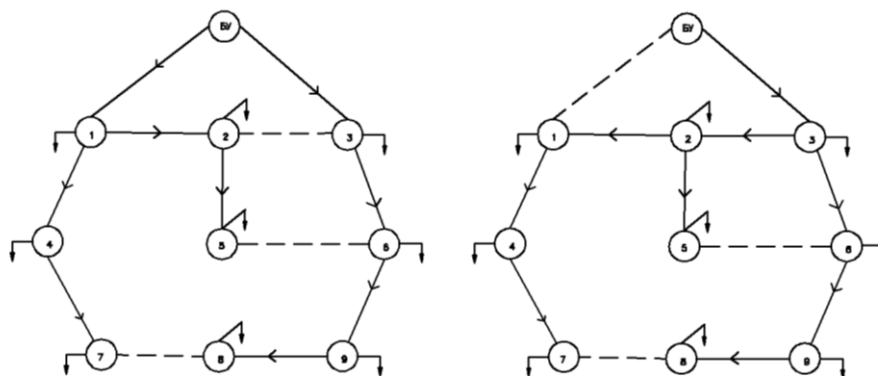


Рис. 3.13. Расчетные схемы при изменении хорд в III контуре

Таблица 14 – III контур

	Хорда 7-8, 6-5, 2-3; $P_x=0$		Хорда 7-8, 6-5, БУ-1; $P_x=0$	
	$P_s$ , МВт	$3_s$	$P_s$ , МВт	$3_s$
БУ-1	80	25924,39	0	0
БУ-3	55	23527,14	135	-
1-2	35	32414,01	-45	-
3-2	0	0	80	-
1-4	35	54023,35	35	-
2-5	30	21129,89	30	-
3-6	40	33133,185	40	-
6-5	0	0	0	0
4-7	15	9845,77	15	-
6-9	30	21129,89	30	-
7-8	0	0	0	0
9-8	25	30975,66	25	-
		$\Sigma=252103,285$		$\Sigma=$ -

Хорду в ветви БУ-1 принять не можем, так как поток по ветви БУ-3 будет не допустим по максимально допустимому току для провода марки АС-240/32

$I_{дон} = 605$  А. В нашем случае ток будет протекать  $I = \frac{135}{\sqrt{3} \cdot 110} = 709,4$  А.

После проведенной оптимизации, оптимальное расположение хорд 7-8, 6-5, 1-2, при этом общие затраты снизились на  $\Delta Z = Z_{нач. без. опт.} - Z_{опт.} = 337119,34 - 230493,945 = 106625,395$ , что составляет 31,6%.

#### **Глава 4. Оценка распределения потенциалов на поверхности грунта на территории открытого распределительного устройства при ударах молнии в различных грунтово-климатических условиях**

В последнее время исследованию импульсных характеристик заземляющих устройств и вопросам электромагнитной совместимости на подстанциях (ЭМС ПС) уделяется большое внимание на этапах проектирования объектов энергетики. Наряду с традиционными требованиями к защитному заземлению и заземлению молниезащиты, возникают вопросы выноса потенциала на цепи вторичной коммутации и на саму поверхность грунта.

При исследовании импульсных характеристик заземляющих устройств необходимо принимать во внимание ряд дополнительных факторов, связанных с большими величинами токов молнии и их быстрым изменением во времени. Для выявления опасных зон на ОРУ, оценки напряжения шага и прикосновения при ударе молнии в рамках данного исследования была использована программа «ОРУ-М» (лицензия №2002611768 ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» Дирекция «Челябэнергосетьпроект») [12]. Программа одобрена ФСК ЕЭС [13] и предназначена для моделирования переходных процессов в разветвленной 3-мерной схеме заземления, включающей систему шин в воздухе, сеть проводников в грунте и объемные заглубленные тела.

Несмотря на то, что при проектировании и строительстве открытых распределительных устройств (ОРУ) в обязательном порядке используется система выравнивания потенциалов в виде токопроводящей сетки, на подстанции вероятны опасные зоны как шагового напряжения для человека, так и опасные зоны влияния тока молнии на оборудование. Именно поэтому, на ОРУ необходимо заранее выявлять такие опасные зоны, в которых лучше не находиться рабочему персоналу при обходе подстанции в повышенную грозовую активность, а также размещать дорогостоящее микропроцессорное оборудование.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

							Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			



#### 4.1. Задачи и методика исследования

Задачей исследования было поставлено выявление данных опасных зон на ОРУ. Для исследования была выбрана типовая подстанция 110/6 кВ. Исследование рассмотрено на примере одного участка размером 18x27 м, который представлен на рис. 4.1 прямоугольником. В процессе моделирования учтено оборудование, установленное на участке и элементы контура заземления.

Для исследования был разработан следующий алгоритм:

1. Оценка проекта контура заземления согласно плану подстанции;
2. Моделирование в программе участка контура заземления;
3. Выбор наиболее вероятных точек удара молнии по ретроспективным статистическим данным [14];

4. Анализ результатов выявления опасных зон шагового напряжения и напряжения прикосновения для человека, а также опасных зон влияния тока молнии на оборудование (опасная зона – зона в которой наблюдается превышение потенциала от нормативных значений) и сравнение их с нормативами [15]. Получение зависимости ширины опасной зоны от потенциалов на поверхности и аппроксимация ее полиномом для каждого из случаев удара молнии.

5. Исследование снижения напряжения шага за счет применения насыпных грунтов на территории ОРУ.

6. Разработка рекомендаций при проектировании ОРУ по критерию снижения шагового напряжения и минимизации выноса потенциала на цепи вторичной коммутации.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

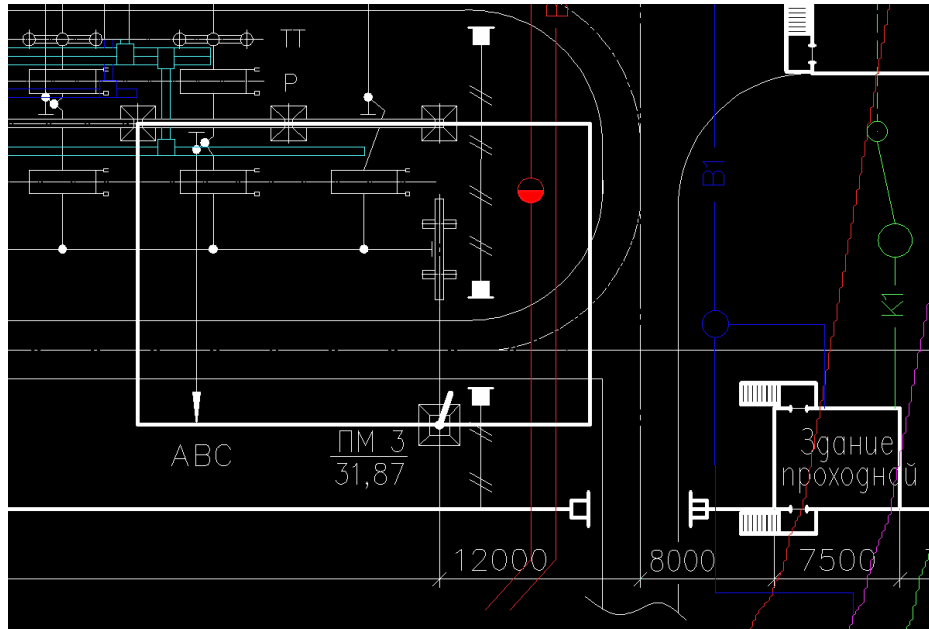


Рис. 4.1. Участок 18x27 м на плане подстанции, выбранный для исследования

Модель контура заземления (рис. 4.2) была составлена в программе «ОРУ-М».

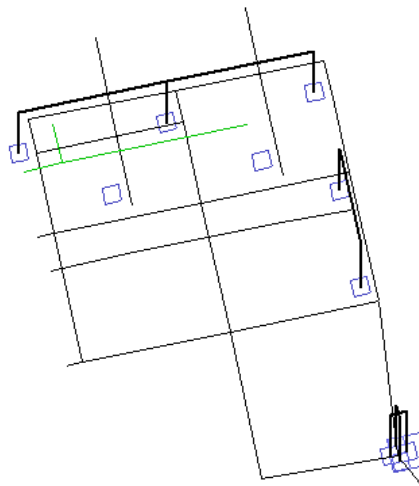


Рис. 4.2. Схема контура заземления с порталами ОРУ

В ходе исследования были рассмотрены несколько возможных вариантов удара молнии в объекты. Первый случай: удар в прожекторную мачту, второй – удар молнии в ячейковый портал (стойка справа).

При принятых допущениях, заложенных программой, для отыскания

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

эквивалентных параметров элементов заземляющего устройства достаточно вычислить их сопротивления токам растекания. Задача решается путем сведения к решению уравнения Лапласа и использованию аналогии между электростатическим полем и полем растекания стационарных токов в однородной проводящей среде. Электростатическая задача решается относительно зарядов при заданных потенциалах. Для ее решения используется метод эквивалентных потенциалов [16, 17].

В процессе моделирования и анализа, было принято удельное сопротивление грунта на подстанции для нижнего слоя глины –  $\rho_2 = 40 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ . Удельное сопротивление грунта верхнего слоя было пересчитано с помощью сезонного коэффициента, который учитывает промерзание почвы для зимнего периода [6]:

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot a, \quad (38)$$

где  $a$  – сезонный коэффициент, равный 3 для глины.

Пространство в воздухе и грунте было условно разбито на горизонтальные слои. Были выбраны слои, отвечающие высотам расположения контура заземления, порталов и ЛЭП, соответственно, расчетные уровни: -0,7 м – контур заземления; 7,85 м – шинные порталы; 11,35 м – ячейковые порталы.

При построении модели контура заземления (рис. 4.2) были учтены все необходимые диаметры и материалы шин, проложены контрольные кабели в лотках, намечено расположение оборудования на подстанции (два разъединителя и молниеотвод).

Электрические параметры шин заземлителя и оборудования на ПС (сопротивление и индуктивность) вычислялись автоматически с учетом параметров источника молнии. В качестве источника молнии был выбран импульсный апериодический источник тока как более стабильный (параметры внешней цепи не влияют на ток источника). Параметры импульса, а именно, амплитуда, длительность фронта, спад и задержка (100 кА 8/20 мкс) были взяты для стандартного грозового импульса по [18].

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
-----	------	----------	---------	------	------

## 4.2. Анализ полученных результатов исследования

После проведения расчетов получены следующие результаты для двух видов удара молнии, это удары молнии в молниеотвод и в ячейковый портал (стойка справа):

1. Карты экстремальных потенциалов в узлах (рис. 4.3);
2. Диаграммы потенциалов на поверхности грунта (рис. 4.4);
3. Распределение шаговых напряжений;
4. Диаграммы напряжений прикосновения.

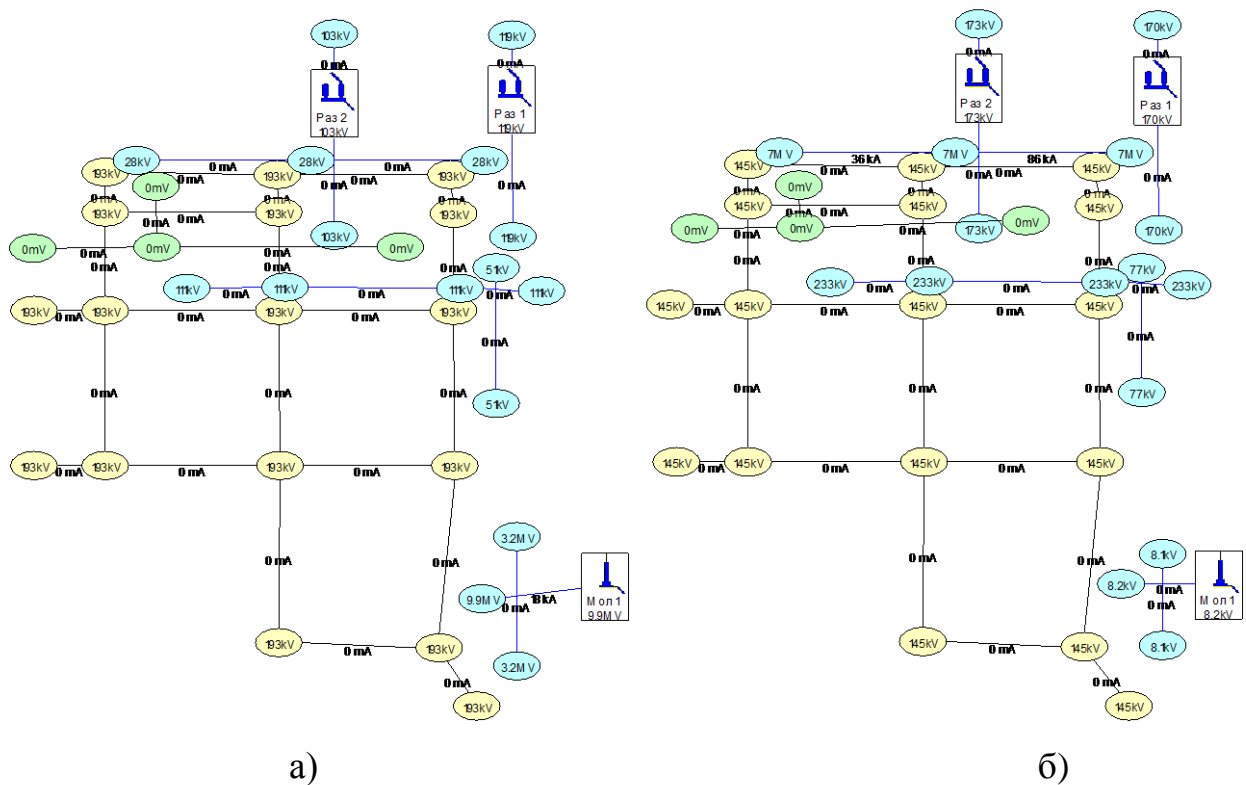


Рис. 3. Карты экстремальных потенциалов в узлах при ударах молнии:  
а) – в молниеотвод при полном сопротивлении растеканию 99,2 Ом;  
б) – в ячейковый портал (крайняя правая стойка) при полном сопротивлении растеканию 69,83 Ом

По результатам исследования и сопоставления полученных карт распределения потенциалов были сделаны выводы:

- 1) При ударе молнии в молниеотвод максимальная напряженность сосредотачивается вблизи молниеотвода. В данном случае, оборудование и

персонал на подстанции будут в безопасности, так как путь растекания тока молнии достаточный, с точки зрения ЭМС (не менее 5 метров от здания ОПУ) [6].

2) При ударе молнии в ячейковый портал (крайнюю правую стойку), наблюдалась иная картина, более опасная. Предполагая, что обход на подстанции осуществляется вблизи оборудования, имеющего не только автоматическое, но и ручное управление, к которым относятся, например, разъединители, нужно предусматривать безопасность при возможном расположении персонала вблизи оказавшегося под ударом молнии оборудования. Тем самым, при ударе молнии в ячейковый портал (крайнюю правую стойку) персонал имеет большую вероятность быть пораженным электрическим током.

На рис. 4.4 представлены характерные диаграммы потенциалов на поверхности в 3D виде для обоих случаев.

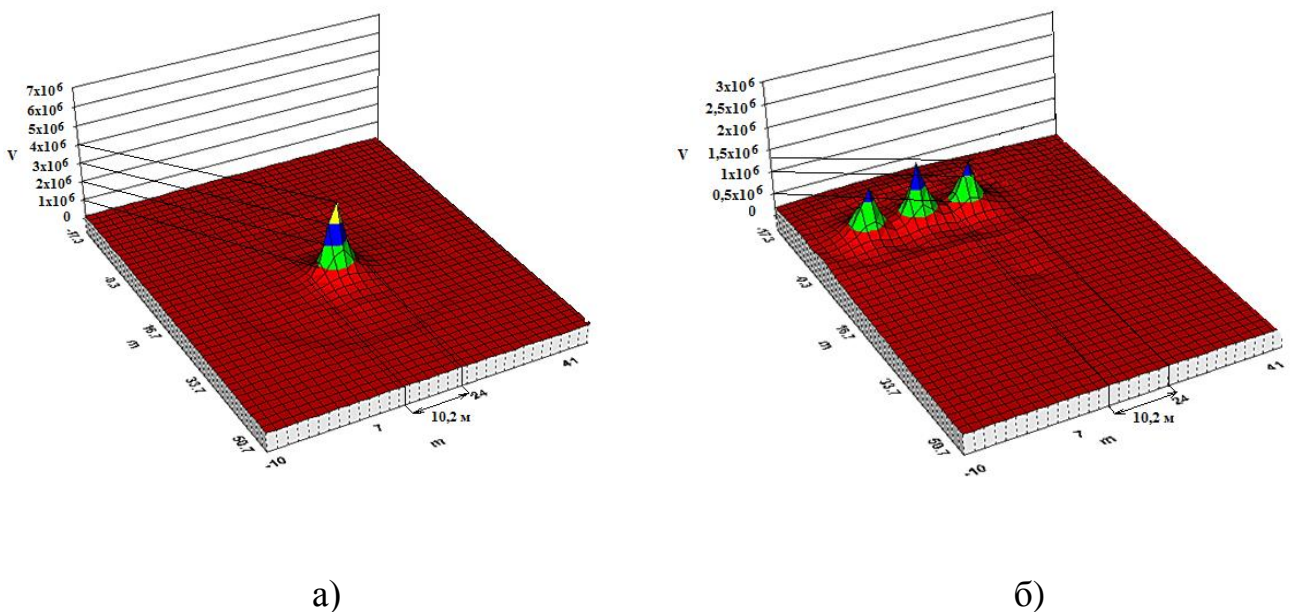


Рис. 4.4. Диаграммы потенциалов на поверхности:  
 а) – при ударе в молниеотвод;  
 б) – при ударе в ячейковый портал (крайняя правая стойка)

Анализируя полученные результаты, было установлено:

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------

1) При ударе в молниеотвод потенциал сосредотачивается в одной точке, в точке прямого удара молнии.

2) При ударе в ячейковый портал (крайнюю правую стойку) распределение потенциалов распространяется и на стоящие в один ряд порталы, причем значения потенциалов достигают больших значений на этих стойках. Таким образом, вероятность поражения увеличивается не только за счет близкого возможного нахождения человека вблизи от стойки портала, попавшего под прямой удар молнии, но и в других близких точках, так как на них также наводится потенциал.

В результате обработки данных по потенциалам на поверхности грунта при ударах молнии были получены зависимости, в условиях принятых допущений, ширины опасной зоны от потенциалов на поверхности рис. 4.5. Каждая из зависимостей была аппроксимирована квадратичным полиномом.

Аппроксимация зависимости при ударе молнии в молниеотвод:

$$\varphi = 10,001L^2 - 488,61L + 3935,2. \quad (39)$$

Аппроксимация зависимости при ударе молнии в ячейковый портал (крайняя правая стойка):

$$\varphi = 0,5109L^2 - 125,98L + 1236. \quad (40)$$

На рис. 4.5 по оси абсцисс отложено расстояние в метрах, на котором молния еще оказывает влияние на оборудование и человека, по оси ординат – потенциалы в кВ.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Лист

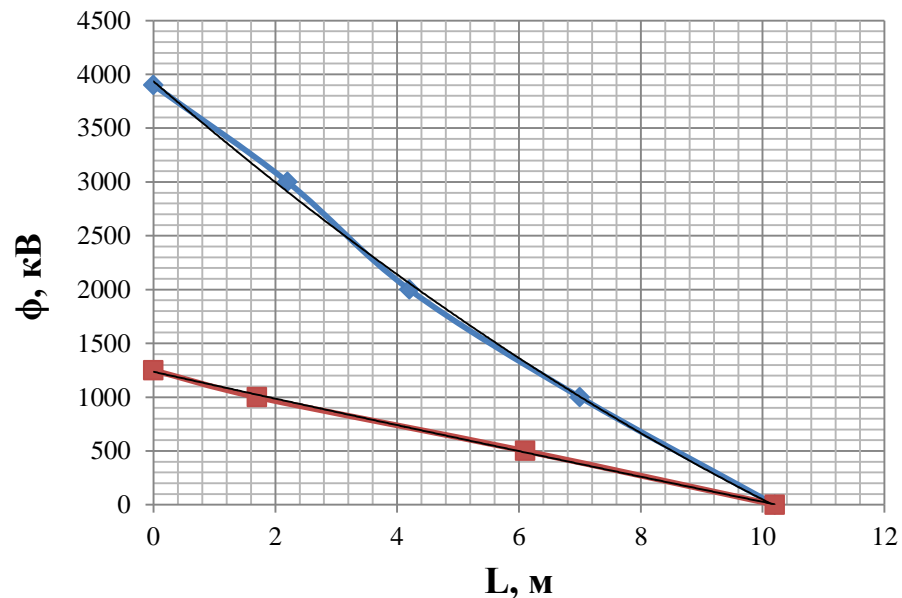


Рис. 4.5. График потенциалов на поверхности при ударе молнии

Таким образом, можно сделать вывод о том, что молния имеет опасное влияние только в некоторой опасной зоне (зона растекания тока молнии), которая составляет в среднем 10 метров.

В результате расчета было также проведено сравнение полученных значений распределения шагового напряжения и диаграмм распределения напряжений прикосновения в обоих случаях. После проведения их сравнение с наиболее подходящими нормативами. Согласно [15] для человека рекомендуемая норма допустимого напряжения прикосновения при продолжительности воздействия 0,1 с составляет 500 В. Рекомендуемая норма допустимого напряжения шага составляет 600 В при продолжительности воздействия 0,2 с. Следует отметить, что действие молнии составляет всего лишь 8 мкс, что намного меньше нормируемых значений.

Если же сравнивать импульсные напряжения, которые могут приходиться при ударе молнии в помещение панелей в ОПУ или наводиться на цепи микропроцессорных защит с нормативными значениями, то по [18] допустимый уровень воздействия не должен превышать 6 кВ приложенного к кабелю и 4 кВ ко входам аппаратуры.

#### 4.3. Рекомендации по снижению шагового напряжения и минимизации

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## выноса потенциала при проектировании ОРУ

На втором этапе исследований нами были проанализированы возможные рекомендации при проектировании ОРУ по критерию снижения шагового напряжения и минимизации выноса потенциала на цепи вторичной коммутации за счет изменения параметров грунта.

Ток, проходящий через заземлитель в землю, преодолевает сопротивление, называемое сопротивлением заземлителя растеканию тока или просто сопротивлением растекания. Оно имеет три слагаемых: сопротивление самого заземлителя; переходное сопротивление между заземлителем и грунтом (т. е. контактное сопротивление между поверхностью заземлителя и прилегающими к ней частицами земли) и сопротивление грунта.

Два первых слагаемых по сравнению с третьим малы, поэтому под сопротивлением заземлителя растеканию тока понимают сопротивление грунта растеканию тока [19].

Таким образом, рассчитанное в программе полное сопротивление растеканию при ударе в молниеотвод – 99,2 Ом, а при ударе в ячейковый портал (крайнюю правую стойку) – 69,83 Ом, еще раз доказывает тот факт, что при ударе молнии в молниеотвод возможность поражения током обслуживающего персонала на подстанции и воздействие на микропроцессорную аппаратуру уменьшается.

Проведенный анализ растекания тока молнии показывает, что защиту мест расположения дорогостоящего оборудования можно обеспечить выравниванием потенциалов по контуру заземления. Данную процедуру можно произвести путем искусственного изменения удельного сопротивления грунта (табл. 15).

Таблица 15 – Величины удельного сопротивления грунта

Грунт	Удельное сопротивление, Ом×м
-------	------------------------------

Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						



Песок (при температуре выше 0°C): сильно увлажненный грунтовыми водами умеренно увлажненный влажный слегка влажный сухой	10 — 60 60 — 130 130 — 400 400 — 1500 1500 — 4200
Суглинок: сильно увлажненный грунтовыми водами (при температуре выше 0°C) промерзший слой (при температуре — 5°C)	10 — 60 60 — 190
Глина (при температуре выше 0°C)	20 — 60
Торф: при температуре около 0°C при температуре выше 0°C	40 — 50 10 — 40
Солончаковые почвы (при температуре выше 0°C)	15 — 25
Щебень: сухой мокрый	Не менее 5000 Не менее 3000
Дресва (при температуре выше 0°C)	5500
Гранитное основание (при температуре выше 0°C)	22 500

Рассматривая отдельные величины удельного сопротивления грунта, характерные для подстанций (табл. 15) можно отметить, что применение песка в сухую погоду повышает вероятность прохождения тока через тело человека по сравнению, например, с картиной при повышенной влажности.

Также, проведя дополнительные исследования, было выявлено, что при применении подсыпки щебнем на подстанции толщиной 0,1 м можно искусственно уменьшить ширину опасной зоны растекания тока. Результаты показали, что ширина опасной зоны с 10,2 м (при применении глины в качестве верхнего слоя грунта) уменьшилась до 8,32 м (при подсыпке щебня).

Таким образом, для обеспечения безопасности персонала на подстанции верхний слой грунта должен иметь как можно меньшее удельное сопротивление, для обеспечения лучшего стекания тока в землю в контур заземления. Однако

Взам. инв. №
Подл. и дата
Инв. № подл.

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

также необходимо учитывать, что в необходимых случаях может быть выполнена подсыпка щебня слоем толщиной 0,1-0,2 м [6]. Подсыпка щебня служит дополнительным изолятором между металлоконструкцией и человеком, и более того, способствует уменьшению ширины опасной зоны. Поэтому в качестве возможного мероприятия при проектировании ОРУ можно рекомендовать выполнять подсыпку щебня, а в качестве грунта выбирать грунт с низким удельным сопротивлением, например, ту же самую глину.

### **Выводы:**

1. На любой подстанции при ударе молнии возникают опасные зоны как шагового напряжения для человека, так и опасные зоны влияния тока молнии на оборудование. Проведение исследований и анализ результатов при изменении удельного сопротивления грунта показал, что с помощью подсыпки щебня толщиной 0,1-0,2 м можно уменьшить ширину этой опасной зоны с 10,2 м до 8,32 м.

2. Таким образом, проведенные исследования и применение при проектировании программы ОРУ-М имеют практическое значение в вопросе обеспечения электробезопасности при ударах молнии. Исследуемый вопрос является актуальным и неоднозначным еще и потому что в ПУЭ и других нормативных документах в настоящее время не рассматривается. Отсутствуют нормы на допустимое шаговое напряжение и допустимый ток по пути «нога-нога» при микросекундных воздействиях. Изучение данного вопроса целесообразно в свете общей тенденции повышения уровня безопасности на объектах энергетики, что указывает на необходимость дальнейших исследований в данной области.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

									Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации был рассмотрен вопрос о повышении качества труда инженеров-проектировщиков и минимизации времени на подготовку проектной документации с помощью современных элементов САПР электрических сетей. Произведен обзор элементов САПР, на примере программ, которые используются сейчас в проектных институтах. Рассмотрены как общие, наиболее известные программы, созданные лишь в качестве графического ядра для черчения промышленных объектов, так и специализированные для решения более конкретных задач при проектировании. После анализа моделей, на основе которых созданы современные элементы САПР, установлено, что дальнейшее развитие САПР должно идти по пути комплексного алгоритма, который в состоянии заменить действующую до сих пор систему сопоставительного проектирования на новую, основанную на использовании экономико-математической модели. Для этого, во второй главе был рассмотрен традиционный метод сопоставительного проектирования, а в третьей главе – методы с применением экономико-математических моделей. Также, в качестве специального вопроса

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

Лист

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

был рассмотрен вопрос электромагнитной совместимости на подстанции, который сейчас является актуальным при появлении новых микропроцессорных защит, и соответственно с появлением для них новых требований. В программной среде «ОРУ-М» была произведена оценка распределения потенциалов на поверхности грунта на территории открытого распределительного устройства при ударах молнии в различных грунтово-климатических условиях. Проведение исследований и анализ результатов при изменении удельного сопротивления грунта показал, что с помощью подсыпки щебня можно уменьшить ширину опасной зоны на подстанции.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корячко, В.П. Теоретические основы САПР / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
2. Норенков, И.П. Разработка систем автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. – 336 с.
3. Симонович, С.В. Информатика: Базовый курс: учебное пособие / Под ред. С.В. Симоновича. – СПб.: Изд-во Питер, 2009. – 640 с.
4. СТО 56947007-29.240.30.010-2010. «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ» – Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС».
5. ГОСТ 721-77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В. – введ. 1978-07-01 Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 27.05.77 N 1376.
6. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) 7-ое издание (утв.

Взам. инв. №

Подл. и дата

Инв. № подл.

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. N 204)

7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – введ. 1999-01-01 Постановлением Государственного Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 28 августа 1998 г. N 338.

8. Файбисович, Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Под редакцией Д. Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

9. Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35–750 кВ, 2013 г. – включен в реестр Раздел 2 «Отраслевые сметные нормативы» федерального реестра сметных нормативов приказом N 597/пр от 06.10.14 Министерством РФ.

10. Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексы изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ для строительства – материал ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» Дирекции «Челябэнергосетьпроект».

11. Булатов, Б.Г. Модели оптимального развития энергосистем и САПР: Конспект лекций / Б.Г.Булатов, В.В.Тарасенко. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 101 с.

12. Петров С.Р. Программа «ОРУ-М» для анализа заземляющих устройств с многоуровневой структурой. Версия 2.3.0. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611768, 2003 г.

13. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. С. 32, приложение Г.

14. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Госэнергонадзор, 1995 г. – 46с.

15. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

прикосновения и токов. – введ. 1983-07-01 Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30.07.82 N 2987.

16. Демирчан, К.С. Машинные расчеты электромагнитных полей / К.С. Демирчан, В.Л. Чечурин. – М: Высш.школа., 1986, 240 с.

17. Колечицкий, Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е.С. Колечицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

18. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. – введ. 2001-01-01 Техническим комитетом по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств (ТК 30).

19. Привалов, Е. Е. Электробезопасность : Учеб. Пособие / Е.Е. Привалов – Ставрополь: СтГАУ, 2008. – 29с.

Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инв. № подл.	

									Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					