

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емец Валерий Сергеевич  
Должность: Директор филиала  
Дата подписания: 19.10.2023 15:20:06  
Уникальный программный ключ:  
f2b8a1573c931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

4

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Рязанский институт (филиал)

федерального государственного бюджетного образовательного учрежде-

ния высшего образования

«Московский политехнический университет»

Кафедра «Механико-технологические дисциплины»

**Лопатин Е.И. Мельников А.Ю.**

**НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Методичное указание по выполнению курсового проекта

**Рязань  
2020**

УДК 621.002(075.8)  
ББК 34.5Я73

**Е.И. Лопатин, А.Ю. Мельников**

«Надежность электроэнергетических систем»: методические указания / Е.И. Лопатин., А.Ю. Мельников Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2020. – 42 с.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения специальностей 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

*Печатается по решению методического совета Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.*

УДК 621.002(075.8)  
ББК 34.5Я73

© Рязанский институт (филиал)  
Московского политехнического  
университета, 2020

## Содержание

<b>Введение</b> .....	5
<b>1. Основные термины и определения теории надежности электроэнергетических систем</b> .....	6
<b>2. Цели и задачи выполнения курсового проекта</b> .....	8
<b>3. Тематика курсового проектирования</b> .....	9
<b>4. Организация проектирования</b> .....	10
<b>5. Оформление курсового проекта</b> .....	13
5.1. Структура курсового проекта.....	13
5.2. Оформление пояснительной записки.....	14
5.3. Оформление графической части.....	17
<b>6. Расчетная часть</b> .....	17
6.1. Методика выполнения расчётной части КП.....	18
6.2. Аналитический метод расчёта надёжности электроустановок.....	19
6.3. Логико-вероятностный метод расчета надежности электроснабжения.....	26
6.4. Количественная оценка надежности электроснабжения Определение ущерба.....	39
6.5. Расчет сложных схем.....	39
6.5.1. Метод анализа вероятностей состояний системы .....	42
6.5.2. Метод с использованием формулы полной вероятности.....	43
6.5.3. Методы структурного анализа сложных схем и использование их для оценки надежности.....	47
6.5.4. Сопоставление расчетных схем и особенности расчетов Надежности сложных схем электрических соединений.....	58
<b>Список литературы</b> .....	70
<b>Приложение А (справочное). Данные для расчёта надежности электроснабжения потребителей</b> .....	72

## ВВЕДЕНИЕ

Энергокомпании и пользователи электрической энергии становятся все более заинтересованными в надежности электроснабжения, а решение проблем надежного электроснабжения потребителей является актуальной научно-технической задачей [1,2].

Задание на курсовое проектирование, включает в себя: вопросы обзора и оценки существующих моделей надежности систем электроснабжения потребителей, «слабых звеньев» элементов электроэнергетических систем, анализ повреждаемости электроэнергетического оборудования электростанций и сетей, анализ методов повышения надежности ЭЭС, экономические вопросы надежности ЭЭС и т.д.; расчет показателей надежности схемы электроснабжения потребителей аналитическим и логико-вероятностным методами и т.д. Методические указания содержат основные разделы:

- основные термины и определения теории надежности электроэнергетических систем;
- цели и задачи выполнения курсового проекта;
- основные организационные требования при выполнении курсового проекта;
- методику расчёта показателей надежности электроснабжения потребителей аналитическим и логико-вероятностным методами с примерами расчёта;
- методику расчёта сложных схем электроснабжения, которые могут быть использованы при дипломном проектировании и при работе над индивидуальными темами курсового проектирования;
- методику расчёта ущербов при нарушении электроснабжения;
- индивидуальные задания на курсовое проектирование.

Индивидуальные задания представляют собой варианты схем питания упрощенных подстанций 110 кВ и 220 кВ, предназначенных для глубокого ввода на территорию промышленных предприятий. Варианты отличаются способами секционирования питающей сети при возникновении коротких замыканий на линиях и оборудовании.

Приложение А содержит справочный материал по показателям надежности оборудования электрических сетей.

В приложении Б приведен пример оформления титульного листа, соответствующего требованиям ЕСКД, ЕСТД.

В приложении В приведен пример оформления листа задания.

# 1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Основные термины и определения теории надежности ЭЭС подробно даны в [3-9], здесь приводятся термины, наиболее часто используемые в ходе курсового проектирования.

*Надежность* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значение всех параметров, установленных нормативно-технической документацией, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования [4].

Надёжность технической системы является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний свойств: *безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости, живучести* и т.д.

*Безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

*Долговечность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Кроме того, все ЭЭС и её составные части делятся на ремонтируемые и неремонтируемые. Ремонтируемым называется тот объект, исправность и работоспособность которого в случае возникновения отказа или повреждения подлежит восстановлению. Объект, у которого исправность и работоспособность не подлежат восстановлению называют неремонтируемым.

*Ремонтпригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов (повреждений), к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонтов.

*Сохраняемость* – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортировки.

*Живучесть энергосистемы* – способность энергосистемы противостоять цепочечному развитию аварийных режимов.

*Показатель надежности* – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта.

*Нормируемый показатель надежности* – показатель надежности, величина которого регламентирована нормативно-технической документацией.

Энергетическая система представляет собой большую сложную систему кибернетического типа. Она состоит из множества элементов, каждый из которых, в свою очередь, также является сложной системой (электростанции, линии электропередач и т.д.). В этих условиях возникновение отказов большого числа элементов или существенное отклонение параметров режима (частота, уровень напряжения и т.д.) могут привести не к полному прекращению электроснабжения потребителей, а к ухудшению его качества, выраженному в пониженных запасах статистической и динамической устойчивости, несоответствие показателей качества электроэнергии (ПКЭ) нормативным значениям, повышению вероятности отключения части нагрузки при действии противоаварийной автоматики и т.д. Поэтому традиционные понятия, определяющие характеристики надежности в других отраслях производства, для описания поведения энергосистем необходимо использовать с осторожностью.

Учитывая вышесказанное согласно *надежность работы энергосистемы* – это способность энергосистемы обеспечивать бесперебойность электроснабжения потребителей и поддержание в допустимых пределах показателей качества электрической энергии и тепла.

*Надежность электроснабжения потребителя* – это способность (свойство) электроэнергетической системы, в составе которой работает система электроснабжения потребителя, обеспечивать без ограничений поставку заявленной потребителем в соответствии с договором электрической энергии (мощности) при выполнении им всех договорных обязательств (в том числе и по оплате электроэнергии), а также при соблюдении уполномоченными субъектами электроэнергетики качественных и количественных показателей надежности функционирования электроэнергетической системы и показателей качества электрической энергии.

*Надежность динамическая* – свойство объекта энергетики сохранять заданные режимы функционирования при внезапных возмущениях.

## **2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Курсовой проект по теме: «Расчет показателей надежности электроснабжения потребителей» – учебный проект, ограниченный предметной областью учебной дисциплины «Надежность электроэнергетической системы» и дисциплин, логически предшествующих ей, направленный на решение задач, связанных с обеспечением надежности электроэнергетических систем, предполагающий анализ проблемной ситуации, генерацию возможных путей ее разрешения, обоснование рационального варианта решения, выполнения расчетных, исследовательских и других задач [10].

Цель курсового проектирования по дисциплине «Надежность электроэнергетических систем» формирование у обучающихся опыта решения комплексных задач в области обеспечения надежности электроэнергетических систем

Учебные задачи курсового проектирования:

- углубление, закрепление, расширение и систематизация знаний, полученных при изучении дисциплин: «Надежность электроэнергетических систем» и других, предшествовавших ей;
- формирование умений применять теоретические знания при решении поставленных практических задач в области надежности технических систем;
- приобретение опыта аналитической, расчетной работы и формирование соответствующих умений;
- приобретение инженерных навыков расчёта показателей надежности электроснабжения потребителей;
- формирование умений работать со справочной, нормативной, правовой документацией, периодическими изданиями и другими информационными источниками;
- приобретение опыта научно-исследовательской работы, формирование соответствующих умений и творческих способностей студента при решении конкретных научно-технических задач;
- формирование практических умений в области проектирования электроэнергетических систем (далее ЭЭС), с учетом вопросов их надежности;
- формирование умений грамотно оформить и подготовить презентацию защищаемого проекта;

- формирование умений выступать перед аудиторией с докладом при защите проекта, компетентно отвечать на вопросы, вести профессиональную дискуссию; убеждать оппонентов в правильности принятых решений.

При этом решаются воспитательные и развивающие задачи. Работа над курсовым проектом *воспитывает* у студента:

- уверенность в своих творческих и коммуникационных способностях;
- самостоятельность, организованность и ответственность за принимаемые решения;
- навыки планомерной регулярной работы над решением поставленной задачи.

Работа над курсовым проектом способствует *развитию* у студентов:

- системного мышления и творческой инициативы;
- интеллектуального творческого потенциала;
- профессиональной терминологии, письменной и устной речи.

### 3. ТЕМАТИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.1. Задание выдается в первые две недели семестра. Задание на курсовое проектирование содержит данные достаточные для постановки задач проектирования, формулировки проблемной ситуации и составления технического задания.

3.2. Задание предусматривает необходимость учитывать экономические, социально-политические, этические, экологические аспекты и аспекты безопасности труда.

3.3. Допускаются «групповые задания», предусматривающие работу нескольких студентов над одним проектом. Подобные задания формируют у студентов умение работать в команде.

3.4. Возможна работа студентов по темами, выбранным самостоятельно. Тема может быть предложена студентом при условии обоснования ее целесообразности. Тема может быть связана с производственной (профессиональной) практикой студента или с непосредственной работой (при заочной форме обучения). КП может стать составной частью (разделом, главой) выпускной квалификационной работы.



3.5. Задание на проектирование оформляется по форме приложения В, при получении задания студент обязан удостоверить факт получения задания подписью в журнале, указанном преподавателем.

3.6. Продолжительность проектирования по дисциплине составляет 10 недель. Целесообразно начать выполнение проекта в первые недели семестра, когда студенты менее загружены домашними заданиями и лабораторными работами по другим дисциплинам.

3.7. Поскольку одной из важнейших задач проектирования является воспитание дисциплины и навыков ритмичной работы, выполнение графика проектирования является строго обязательным и должно быть отражено консультантом на титульном листе пояснительной записки (см. прил. Б).

3.8. Первая консультация по курсовому проекту является групповой. В ее ходе преподаватель разъясняет студентам задачи проектирования по дисциплине «Надежность электроэнергетических систем», требования, предъявляемые к проекту в части содержания и оформления, сущность выданных заданий, освещает связь заданий с соответствующими разделами учебных дисциплин, рекомендует основную литературу, дает общие указания по выполнению курсового проекта, сообщает порядок организации проектирования и защиты, критерии оценки курсового проекта.

## **4. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

4.1. Общее руководство и контроль за ходом выполнения КП осуществляет преподаватель соответствующей дисциплины.

4.2. На время выполнения проекта планируются индивидуальные и групповые консультации за счёт объема времени, отведенного в учебном плане. В ходе консультаций преподаватель разъясняет назначение и задачи, структуру и объем, принципы разработки и оформления, распределение времени курсового проекта, отвечает на вопросы.

4.3. Ответственность за результаты проектирования при их защите полностью несет студент.

4.4. В случаях: неявки студента в установленный срок для получения задания, пропуска студентом консультаций в течении двух плановых консультаций подряд, безосновательного отсутствия сдвигов в работе в течении двух плановых консультаций подряд руководитель проектирования письменно сообщает заведующему кафедрой. Заведующий кафедрой сообщает о данных фактах в деканат факультета.

4.5. За пределами сроков консультаций, определенных утвержденным графиком, консультации руководителем проектирования не проводятся.

4.6. По завершении проекта студент подписывает пояснительную записку, графические материалы и электронную версию проекта руководителю проектирования. Если проект, по мнению, руководителя удовлетворяет предъявляемым требованиям, в процессе проектирования удовлетворительно решены все поставленные задачи, текст пояснительной записки не содержит прямых заимствований, не оформленных в виде цитат, отсутствуют прямые заимствования в расчетах, графическом материале, то руководитель подписывает пояснительную записку. Если проект, по мнению, руководителя не соответствует требованиям, то он письменно на титульном листе пояснительной записки обосновывает свое решение.

4.7. Дата последнего дня подписания курсовых проектов устанавливается кафедрой ЭМ. Студенты, не подписавшие проект по истечении указанной даты, считаются не выполнившими учебный план.

4.8. Если студент не представил завершённый проект в установленный срок по неуважительной причине, то руководитель не проверяет материалы проектирования. Студент имеет право представить материалы проектирования за своей подписью непосредственно комиссии в соответствии с графиком защит.

4.9. Защита курсовых проектов является обязательной и проводится за счёт объема времени, предусмотренного на изучение дисциплины, в установленные кафедрой дни.

4.10. Оценка по четырехбальной системе. Защита проводится в присутствии специальной комиссии по защитах курсовых проектов, состав которой утверждается на кафедре. На защите проверяется понимание теоретического и практического материала, поэтому при ответах на вопросы студенту *предоставляется возможность пользоваться ПЗ и графическим материалом.*

Общая оценка работы является комплексной. В ПЗ должны быть график работы над КП и оценка консультанта, характеризующие степень самостоятельности и ритмичность работы студента, а также качество графического материала и ПЗ. *Если оценка за ритмичность является неудовлетворительной, общая оценка может быть снижена на один балл, а простановка отличной оценки исключается,* такой подход имеет воспитательное значение и прививает умение ритмично работать.

4.11. Повторная защита курсового проекта допускается не более двух раз.

4.12. В табл. 4.1 представлен график работы над курсовым проектом с разбивкой всего объема работы на этапы с указанием сроков выполнения каждого из этапов и с указанием примерной трудоемкости этапа в процентах.

4.13. Итоги проектирования; качество проектов, недостатки, выявленные в содержании заданий, типичные ошибки, студентов и промахи консультантов, недостатки в организации работы обсуждаются на заседании кафедры в конце каждого семестра.

Таблица 4.1

График работы над курсовым проектом

Наименование этапа работ	Процент к общей трудоемкости выполнения	Срок предъявления консультанту
1. Теоретическая разработка мер по повышению надежности ЭЭС	20	3 неделя
2. Модернизация схемы электроснабжения потребителей с учетом требований надежности	5	6 неделя
3. Составление схем замещения при кратковременных и длительных режимах работы	30	8 неделя
4. Расчёт показателей надежности электроснабжения потребителей аналитическим методом	15	10 неделя

Продолжение таблицы 4.1		
5. Расчёт показателей надежности электроснабжения потребителей логико-вероятностным методом	20	12 неделя
6. Расчёт ущербов от нарушения электроснабжения потребителей	10	14 неделя
Итого	100	-

## **5. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Перед началом выполнения КП необходимо тщательно ознакомиться с настоящими методическими указаниями и уяснить содержание индивидуального задания. Прежде, чем начать расчеты, следует повторить соответствующий теоретический материал и просмотреть решенные задачи, связанные с тематикой проекта.

### **5.1. Структура курсового проекта**

По структуре КП состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка КП содержит [11]:

- титульный лист;
- лист технического задания;
- аннотацию, в которой дается краткая характеристика каждого раздела пояснительной записки;
- содержание;
- введение, в котором раскрывается актуальность темы, формируется цель и задачи работы. Следует отразить основные задачи и направления развития теории надежности ЭЭС, целесообразны ссылки на действующие в данный момент, руководящие документы (постановления), отражающие состояние вопросов надежности ЭЭС, от материала общего назначения перейти к значимости вопросов, решаемых в КП (объем около 1 страницы);
- теоретическую часть, в которой излагаются технические, конструкционные и технологические особенности надежности ЭЭС и принятых решений по оценке и повышению надежности электроснабжения потребителей (объемом не менее 10 страниц). При разработке теоретической части необходимо использование НТД (ГОСТов, ОСТов, руководящих указаний), и других информационных источников (изданных не ранее 2005 года);

- расчётную часть, которая содержит: исходную схему; задачу расчёта (с указанием, что требуется определить при расчёте); заданные исходные данные; величины и параметры, принятые при расчёте; условия расчёта; расчётные формулы и подставленные в них числовые значения величин; результаты расчёта (сведенные в таблицу); выводы и заключение.
- заключение, в котором дается приблизительная оценка ущербов от ненадежного электроснабжения потребителей, а также выводы и рекомендации (не менее пяти) по повышению надежности ЭЭС и другие обоснования принятых решений;
- список литературы;
- дополнительные материалы, оформленные в виде приложений.

## 5.2. Оформление пояснительной записки

Оформление пояснительной записки необходимо выполнять по требованиям [11].

Каждый лист должен иметь рамку, основную надпись и дополнительные графы основной надписи.

Расстояние от рамки до границ текста в начале и в конце строк должно быть не менее 3 мм. Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней рамки должно быть не менее 10 мм. Абзацы в тексте начинают отступом 12,5 мм.

Разделы и подразделы должны иметь заголовки, кратко и четко отражающие содержание разделов и подразделов. Заголовки следует печатать с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

В конце текстового документа приводят список литературы, которая была использована при его составлении.

Изложение предпочтительно вести в настоящем времени. Не следует смешивать в одной фразе настоящее время с прошедшим или будущим.

В тексте документа, за исключением формул, таблиц и рисунков, не допускается применение математических знаков + (плюс), - (минус); знаков отношений > (больше), < (меньше) и т. д. без числовых значений. Если числовое значение отсутствует слово следует писать полностью (например, *минус*, *параграф*).

Не допускается применение обозначений ГОСТ без регистрационного номера.

В учебных документах допускаются ссылки на отдельные пункты и таблицы стандартов, на таблицы, чертежи, страницы и даже на отдельные формулы этого же текстового документа или других источников.

Ссылки на литературу следует указывать в порядке их упоминания в тексте документа и его приложений. В учебных документах разрешено указывать при ссылках на литературу номера таблиц, рисунков, формул, страниц ([3], *рисунок 5*).

На все рисунки и таблицы в основном тексте должна быть ссылка.

Каждую расчетную формулу располагают в отдельной строке симметрично относительно рамки и отделяют от текста интервалом, соответствующим одной строке текста.

Размерности всех исходных данных, выбираемых величин и коэффициентов должны быть указаны; эти указания целесообразно привести непосредственно после пояснения символа.

При компьютерном наборе формул рекомендуется использовать следующие размеры (кегли) шрифтов: основной – 16, крупный индекс – 12, мелкий индекс – 8, крупный символ – 20, мелкий символ – 14. Латинские обозначения, кроме устойчивых наименований типа  $\tan$ ,  $\min$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\lg$ ,  $\log$ ,  $\exp$ ,  $\det$  и т.д., набирают курсивом. Русские, греческие обозначения и цифры всегда набирают прямым шрифтом.

Числовые подстановки в формулу должны следовать непосредственно за формулой, в той же строке. Если формула была записана выше и сопровождалась пояснениями символов, перед подстановкой чисел формулу целесообразно повторить. Расположение чисел должно строго соответствовать расположению букв в формуле, т.е. должно быть четко видно, какое число заменяет какую букву. Промежуточные расчеты, преобразования и сокращения не показывают, приводят лишь конечный результат расчета.

Числа подставляют в формулу без указания размерностей; указывают размерность только результата расчета, не заключая ее в скобки.

Формулы (за исключением формул, помещаемых в приложении) нумеруют сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают в круглых скобках на уровне нижней строки формулы.

Формулы, помещаемые в приложении, нумеруют отдельно арабскими цифрами в пределах каждого приложения с добавлением перед каждой цифрой обозначения приложения (формула В.3).

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в круглых скобках. После каждой формулы следует ставить (или не ставить, где это не требуется) знаки препинания в соответствии с правилами русской пунктуации и содержанием последующего текста.

Таблицы нумеруют арабскими цифрами сквозной нумерацией в пределах всего текста, за исключением таблиц приложений. Если в документе одна таблица, то ее обозначают «Таблица 1», или «Таблица А.1», если таблица приведена в приложении А.

Таблицу помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице, а при необходимости – в приложении к документу. Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны листа документа.

Если строки или графы таблицы выходят за формат страницы, ее делят на части, помещая одну часть под другой или рядом, при этом в каждой части таблицы повторяют ее головку и боковик. Слово «Таблица» указывают один раз слева над первой частью таблицы, над другими частями пишут слова «*Продолжение таблицы*» или «*Окончание таблицы*» с указанием номера таблицы.

Все иллюстрации называют рисунками и нумеруют арабскими цифрами сквозной нумерацией по всему документу (*рисунок 20*) или в пределах раздела (*рисунок 6.8*). Если рисунок один, то его обозначают «Рисунок 1».

Иллюстрации можно располагать как по тексту документа, так и на отдельных листах. Иллюстрации на отдельных листах можно сводить в приложение, которое брошюруют отдельно или помещают в конце документа. Иллюстрации располагают так, чтобы их можно было читать без поворота документа или после поворота по часовой стрелке на 90°.

Все таблицы и рисунки по ходу текста нумеруются и именуется. Нумерация сквозная или в пределах раздела.

### 5.3. Оформление графической части

При выполнении графической части рекомендуется использовать средства компьютерного проектирования.

КП оформляется и разрабатывается в соответствии с требованиями [11].

Графический материал оформляется на двух форматах А1 (841×594). По ЕСКД графический материал, в данном КП не является техническим чертежом, поэтому рамка на форматах А1 соответствует рамке на листе Аннотации в ПЗ, и вся информация, которая выносится на форматы А1 должна содержаться в ПЗ. Нумерация рисунков и таблиц также должна соответствовать ПЗ.

- на первом графическом изображении в соответствии с заданием приводятся схемы: электроснабжения потребителей (заданная в индивидуальном задании) и доработанная (согласно варианту, с учетом требований надежности); графы надежности для всех трех подстанций при кратковременном и длительном аварийных отключениях (с учетом ремонтных режимов перемычек и шинных выключателей, при их наличии), а также результаты расчёта показателей надежности и оценки ущерба от ненадежности электроснабжении потребителей, сведенные в таблицу;

- на втором графическом изображении приводятся: «дерево отказов» системы электроснабжения потребителей при длительных и кратковременных отключениях (с учетом ремонтных режимов перемычек, шинных выключателей и *двухцепных линий*, при их наличии) и анализ надежности системы по методу минимальных сечений.

## 6. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

В первом пункте расчетной части студент должен привести:

- таблицу данных для расчета надежности, включая данные необходимые для модернизации схемы с обязательным указанием источника справочной информации по исходным данным для расчета;
- исходную схему и модернизированную схему, с обязательным указанием шинных разъединителей и ремонтных перемычек.

В приложение А даны показатели надежности оборудования электрических сетей [20].



Варианты заданий для модернизации схем питания упрощенных подстанций 110 кВ и 220 кВ, предназначенных для глубокого ввода на территорию промышленных предприятий, с точки зрения надежности, приведены в табл. 6.1, упрощенные схемы электроснабжения потребителей приведены в конце раздела 6.

Варианты отличаются способами секционирования питающей сети при возникновении коротких замыканий на линиях и оборудовании.

**Примечание:** номер варианта состоит из трех цифр – первые две цифры номер схемы, третья – номер варианта, например: вариант 011 (первая схема, первый вариант); 106 (схема 10, шестой вариант).

## 6.1. Методика выполнения расчётной части КП

6.1.1. Преобразовать схему питания упрощенных подстанций согласно правилам проектирования ЭЭС и требованиям к повышению надежности [1,2,15-19]. Для каждой схемы предлагаются пять вариантов заданий, которые приведены в табл.6.1. Каждый из вариантов предполагает разработку мер по повышению надежности, при этом **обязательна** сравнительная характеристика (по показателям надежности и ущербам) модернизированной и немодернизированной (с точки зрения надежности) схемы.

6.1.2. Составить расчётные схемы соединений элементов для каждой подстанции отдельно (с учетом ремонтных режимов переключателей и шинных выключателей, при их наличии): для кратковременного отключения; для длительного отключения.

6.1.3. Рассчитать показатели надежности аналитическим методом, согласно методике приведенной в разделе 6.2, данных методических указаний и в [2]. Результаты расчётов должны быть сведены в таблицу. *Сокращения в расчётах не допускаются, численные значения обязательны.*

6.1.4. Оценить надежность схемы логико-вероятностным методом с помощью «дерева отказов» (для кратковременных и длительных отключений), дать анализ минимальных сечений по методике, приведенной в п.6.3. и в [12,13].

6.1.5. Рассчитать количество электроэнергии, недоотпущенной потребителям за время отключения оборудования и определить

ущерб, получаемый при аварийном отключении оборудования. Пример расчёта приведен в п.6.4. и в [12].

Таблица 6.1

<b><u>Вариант № 1.</u></b>	Схема без изменений.
<b><u>Вариант № 2.</u></b>	Согласно правилам проектирования схем электроснабжения добавить (и/или заменить одноцепные) на схеме двухцепные воздушные линии.
<b><u>Вариант № 3.</u></b>	Согласно правилам проектирования схем электроснабжения добавить на схеме воздушные линии или кабельные линии.
<b><u>Вариант № 4.</u></b>	Согласно правилам проектирования схем электроснабжения заменить короткозамкатели и отделители на современное, с точки зрения надежности, оборудование (обосновать свой выбор).
<b><u>Вариант № 5</u></b>	Согласно правилам проектирования схем электроснабжения заменить короткозамкатели и отделители на современное, с точки зрения надежности, оборудование и добавить двухцепные ВЛ (и/или заменить одноцепные).

6.1.6. **Обязательно** дать сравнительную характеристику модернизированной и немодернизированной, с точки зрения надежности, схем электроснабжения потребителей. Задание составлено так, что студенты в пределах группы (одной схемы) могут коррелированно оценить надежность при переводе схемы на новую элементную базу.

6.1.7. Как отмечалось ранее возможно выполнение индивидуального задания, которое может включать схемы со структурой, которую нельзя привести к параллельно-последовательной. Методика расчёта таких схем по методу особого элемента приведена в [2], в п.6..

## **6.2. Аналитический метод расчёта надёжности электроустановок**

Перед расчетом надежности системы предварительно составляется расчетная схема, которая может отличаться от принципиальной электрической схемы. Иногда последовательно соединённые в электрической схеме элементы на логической схеме должны быть изображены параллельным соединением и наоборот. Например, параллельному включению генераторов на электростанции соответствует

их последовательное соединение в расчетной схеме по надежности, если возникает вопрос оценки надежности генерирования всей мощности электростанции. Или шинные разъединители всех параллельных по электрической схеме присоединений составляют, последовательную цепочку, если рассматривается погашение сборных шин.

Расчётная схема отражает логику связей элементов с точки зрения надёжности работы всей установки или с точки зрения отказа всей установки. Расчёт проводится путём замены параллельных и последовательных цепей эквивалентными элементами, для чего используются формулы, определяющие общее число аварийных отключений, длительность аварийных простоев для эквивалентного элемента.

***Сокращения в расчётных схемах не допускаются!***

В последовательные цепи расчетной схемы по надежности кроме элементов последовательной электрической цепи (линии, выключатель, трансформатор и т. д.) вводятся также смежные выключатели, отказ которых может привести к отказу рассматриваемой цепи (например, выключатели всех присоединений, секционные выключатели шин, к которым подключена анализируемая цепь). Если анализируется магистральная линия с ответвлениями, оборудованными автоматическими выключателями, то в последовательную цепь включается также показатели надежности ответвлений от этой линии, но вероятность их отказа определяется произведением параметра потока отказов ответвления на среднее время переключения (предполагается, что ответвления оборудованы разъединителями). Это положение справедливо для тех ответвлений, которые электрически включены параллельно относительно анализируемого узла нагрузки. Если определяются показатели надежности узла нагрузки, подключенного к ответвлению от магистрали, то это ответвление вводится в расчет средним временем восстановления.

Расчетная схема по надежности относительно узлов нагрузки должна отражать логику работы исходной электрической схемы. Поэтому разнообразие методов составления расчетных схем обуславливается разнообразие применяемых схем электроснабжения и общих рекомендаций для решения всех возможных задач надежности дать невозможно.

Следует только подчеркнуть, что особого внимания требуют схемы электроснабжения, в которых автоматическое отключение отдельных участков сочетается с ручным переключением при вводе резерва (например, петлевые схемы в сетях до 1000 В).

В этом случае средние вероятности отказов расчетных элементов определяются не только временем восстановления участков линий, но и средним временем переключения на резервное питание.

Обычно целью расчета является определение основных показателей надежности относительно узлов нагрузки или конкретных потребителей. Поэтому система расчленяется на отдельные элементы, характеристики надежности, которых сравнительно легко определяются.

Следующим этапом расчета является формулировка понятий отказа для всей системы и для отдельных элементов. Отказом системы с ограниченной пропускной способностью элементов можно считать, например, то или иное значение ограничения мощности потребителей, а для отдельных потребителей, например, сам факт отсутствия напряжения на шинах даже в течение долей секунды (если резервная цепь включается посредством АВР).

Метод расчета надежности выбирается в зависимости от конкретной постановки задачи и интервала времени, в течение которого определяются характеристики надежности. Расчеты выполняются по средним показателям или с учетом начальных состояний элементов на коротких интервалах времени (в последнем случае используется модель случайных процессов).

***Необходимо учесть:***

- длительность планового ремонта для каждого случая подсчитывается исходя из существующих закономерностей ремонтных работ;
- *одновременные отключения цепи из более чем двух параллельных элементов в плановый период не допускаются;*
- за время отключения элемента с большой длительностью ремонта может быть произведен ремонт других элементов (с относительно меньшей длительностью ремонта).

В зависимости от применяемой схемы соединения восстановление электроснабжения может заключаться:

- в замене отказавшего элемента;
- в ремонте поврежденного элемента;

- в операции автоматического секционирования;
- в работе автоматики АВР, АПВ;
- при производстве переключений вручную.

**Основные допущения аналитического расчета заключаются в следующем.**

1. Перерывы электроснабжения в зависимости от длительности делятся на кратковременные, ликвидируемые оперативными переключениями в системе и длительные, связанные с ремонтно-восстановительными работами.

2. Перерывы электроснабжения, ликвидируемые работой автоматики (АПВ, АВР), не учитываются. Устройства релейной защиты считаются действующими безотказно.

3. Расчётные схемы для кратковременных отключений должны содержать только те элементы, отказ которых вызывает немедленное автоматическое отключение потребителя. Длительность перерывов электроснабжения при кратковременных отключениях принимается 20...30 мин. Расчетная схема для кратковременных отключений должна содержать только элементы, соединенные последовательно; параллельные ветви учитывать не следует.

4. Для длительных отключений (ремонт элементов) рассматриваются также отказы параллельных цепей, вызванные наложением повреждений одного элемента на аварийное восстановление другого и аварийных повреждений на плановые отключения.

5. Расчетные схемы для всех видов отключений составляются отдельно для каждого потребителя или (и) групп потребителей.

6. Если параллельные цепи имеют переемычку (линии, переключательные посты дальних ЛЭП, секционные или шиносоединительные выключатели), расчетные схемы для кратковременных и длительных отключений приходится составлять для режимов с включенной переемычкой (считая её абсолютно надежной) и с отключённой переемычкой (считая её находящейся в плановом или аварийном ремонте).

7. Аналитические расчёты основываются на предположении, что поток отказов элементов на расчетном промежутке – простейший, пуассоновский, а закон распределения вероятности восстановления – экспоненциальный.

Показателями надежности питания являются частоты отключения двух трансформаторов каждой подстанции  $\lambda(1), \lambda(2), \lambda(3)$  и коэффициенты аварийного простоя  $q(1), q(2), q(3)$  этих подстанций.

Кроме того, надежность питания промышленного района характеризуется частотами аварийного погашения двух и трех подстанций глубокого ввода и соответствующими коэффициентами простоя. Определим эти показатели с помощью аналитического метода расчета

При сделанных допущениях для показателей надёжности элементов электроустановок справедливы следующие формулы теории надёжности. Для коэффициентов простоя

$$q_{ав} = \lambda \tau_{в}; q_{пл} = \eta \tau_{пл}. \quad (6.1)$$

где  $q_{ав}$  и  $q_{пл}$  – коэффициенты аварийного и планового простоя;  $\lambda$  – интенсивность случайного события (отказа);  $T_{в}$  – время восстановления системы;  $\tau_{пл}$  – удельная длительность планового ремонта (за 1 год);

Для последовательного соединения элементов

$$\lambda_{посл} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (6.2)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента.

$$T_{в.посл(авар)} = \frac{1}{\lambda_{посл}} \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{вi}, \quad (6.3)$$

где  $T_{вi}$  – время восстановления  $i$ -го элемента;

Тогда при последовательном соединении  $i$  элементов коэффициент аварийного простоя

$$q_{ав} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_{вi} \quad (6.4)$$

Среднее время одного планового ремонта последовательной цепи

$$T_{пл} = \frac{1}{m_{ц}} \sum_{j=1}^{m_{ц}} \tau_{плj}^{\max}, \quad (6.5)$$

где  $m_{ц}$  – количество плановых ремонтов в течение, ремонтного цикла;  $\tau_{плj}^{\max}$  – длительность планового ремонта элемента, максимальная из всех отключаемых в  $j$ -м простое.

Коэффициент планового простоя последовательной цепи

$$q_{\text{пл}} = \eta_{\text{посл}} \tau_{\text{пл}}, \quad (6.6)$$

где  $\eta_{\text{посл}}$  – частота плановых ремонтов последовательной цепи.

*Пример 6.1.* На рис.6.1 приведена схема питания упрощенных подстанций 110 кВ, предназначенных для глубокого ввода на территорию промышленного предприятия.

Расчётные значения показателей надёжности элементов этой схемы даны в таблице 6.2 [12].

Таблица 6.2

Элемент	№ на схеме	$\lambda$ , 1/год	$\tau_{\text{в}}$ , год	$q_{\text{пл}}$
Трансформатор	1-6	0,02	0,02	0.007
Короткозамыкатель с отделителем	7-12	0,04	0,0004	0.001
Участок одноцепной воздушной линии	13-16	0,5	0,001	0.005
Выключатель масляный	17-20	0,03	0,003	0.006

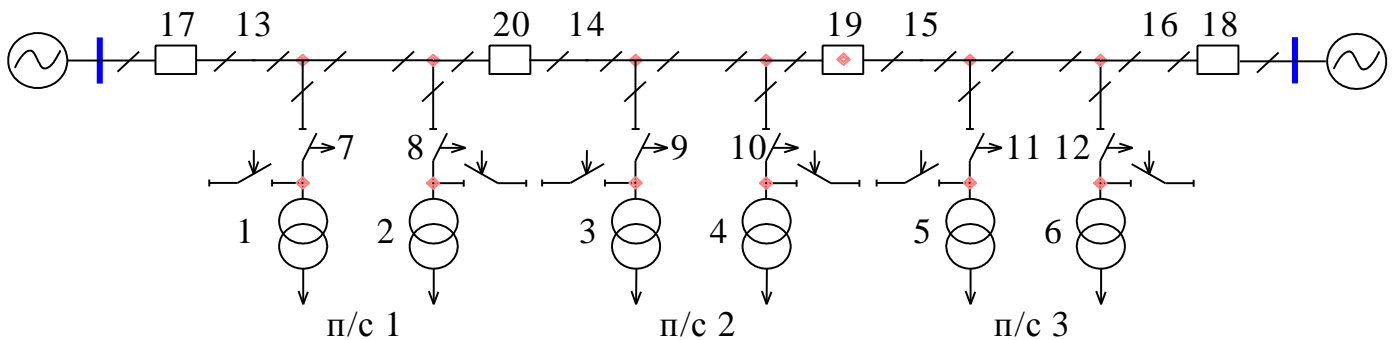


Рис.6.1. Схема питания упрощенных подстанций

**Показатель надёжности питания потребителей – частота аварийных отключений двух трансформаторов каждой подстанции  $\lambda_{\text{ав}}$ .**

Решение. Составим расчетные схемы (рис.6.2, рис.6.3) для кратковременных и длительных аварийных отключений.

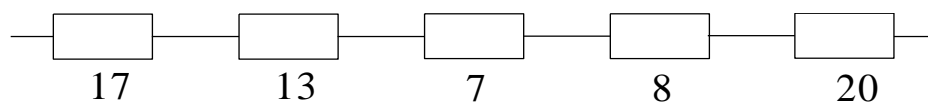


Рис. 6.2. Схема замещения при кратковременном отключении п/ст 1

В соответствии с расчетной схемой рис. 6.2 частота кратковременных отключений

$$\lambda_{\text{авкп/ст1}} = \lambda_{17} + \lambda_{13} + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_{20} = 0,02 + 0,5 + 0,05 + 0,05 + 0,02 = 0,64 \text{ откл/год}$$

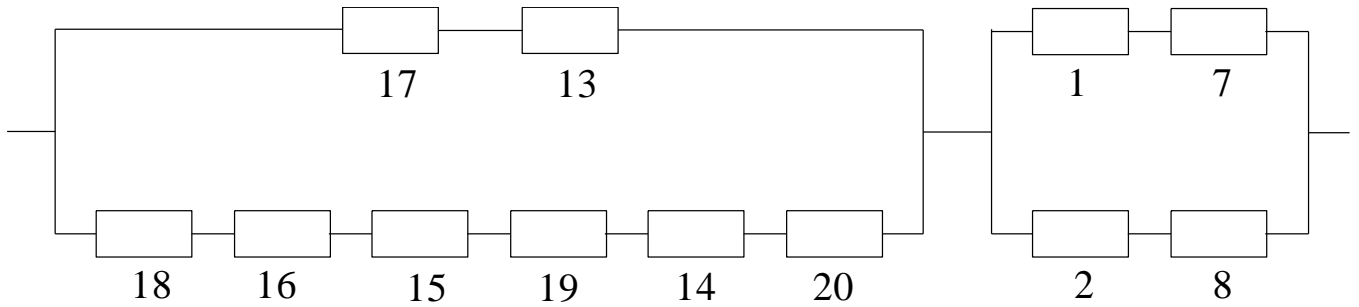


Рис. 6.3. Схема замещения при длительном отключении п/ст 1

В соответствии с расчетной схемой на рис. 6.3, частота длительных отключений с учетом совпадения отказов одной цепи с простоем другой

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{авп/ст1}} = & (\lambda_1 + \lambda_7) \cdot (q_2 + q_8) + (\lambda_2 + \lambda_8) \cdot (q_1 + q_7) + \\ & + (\lambda_{13} + \lambda_{17}) \cdot (q_{18} + q_{16} + q_{15} + q_{19} + q_{14} + q_{20}) + \\ & + (\lambda_{18} + \lambda_{16} + \lambda_{15} + \lambda_{19} + \lambda_{14} + \lambda_{20}) \cdot (q_{13} + q_{17}) = 0,0197 \end{aligned} \quad (6.7)$$

где  $q = q_{\text{ав}} + q_{\text{пл}}$ .

Основную составляющую в общем числе отключений дают аварийные отключения линий, поэтому можно принять время восстановления питания  $T_{\text{ав д}} = 8 \text{ ч} = T_{\text{авЛЭП д}}$  при длительных отключениях.

При кратковременных отключениях время перерыва питания составляет 0,25 часа, если переключения производит персонал подстанции, и 0,5 часа, если переключения производит выездная оперативная бригада.

Коэффициент аварийного простоя в первом случае

$$q_{\text{ав п/ст1}} = \frac{\lambda_{\text{ав к}} T_{\text{ав к}} + \lambda_{\text{ав д}} T_{\text{ав д}}}{T} = \frac{0,64 \cdot 0,25 + 0,0197 \cdot 8}{8760} = 0,000036$$

где  $T = 8760 \text{ ч}$  – длительность периода наблюдения

Суммарная частота отключений в этом варианте



$$\lambda_{\text{авд П/СТ1}} = 0,64 + 0,0197 = 0,6597 \text{ отк/год}$$

### 6.3. Логико-вероятностный метод расчета надежности электроснабжения

Качественный анализ надежности отдельной системы предусматривает следующие этапы: определение функций, выполняемых системой, характерных особенностей ее структуры, режимов работы, видов ее отказов; определение границ системы и перечня входящих в нее элементов, декомпозиция системы на крупные структурные части, функционально самостоятельные блоки; формулирование условий и критериев невыполнения функции, включая определение наличия и оценку резерва времени на выполнение функции; анализ регламента технического обслуживания и ремонтов системы; составление структурно-функциональной диаграммы системы на основе ее описания и структурных схем и чертежей для каждого характерного режима ее работы; анализ видов и последствий отказов элементов системы; выбор и построение структурно-логической модели надежности системы для каждого выделенного критерия ее отказа в виде деревьев отказов; определение набора минимальных сечений, их анализ для выявления слабых звеньев системы.

**Минимальным сечением** называется совокупность первичных событий в системе (отказов элементов объекта), обладающая следующими свойствами: совместная их реализация приводит к отказу системы; наступление любой комбинации меньшего числа событий не приводит к отказу системы.

**Построение «дерева отказов».** Построение «дерева отказов» – один из важных системных методов анализа надежности. При его построении исходят из определенного нежелательного события (так называемого вершинного события) и анализируют возможные причины его возникновения. При этом стремятся к разумной степени детализации. Готовое «дерево отказов» представляет в виде логической диаграммы все последовательности событий, которые могут привести к вершинному событию [13].

С помощью метода «дерева отказов» получают:

- систематизированное представление всех возможных причин вершинного события (отказа системы) и их взаимодействие;
- обозримый и доступный для изучения материал анализа причин отказа;

- показатели надежности объекта, рассчитываемые в результате количественного анализа «деревьев отказов».

Построение «дерева отказов» предполагает детальный анализ процесса функционирования системы. Одному и тому же вершинному событию, как правило, можно поставить в соответствие несколько различных «деревьев отказов». Для того чтобы получить сравнимые результаты и ограничить в определенной степени произвол при составлении «деревьев отказов», целесообразно формулировать нечто типа инструкции. Приведем возможный план изложения соответствующих правил. Чтобы начать построение «дерева отказов» необходимо:

1) иметь детальное описание нормального процесса работы рассматриваемой системы, а также технические характеристики (схемы, описание конструкции и т.д.), включая все существенные параметры элементов;

2) знать физические и химические свойства материалов, используемых в устройствах, соседствующих с системой. Во многих устройствах энерго- и водоснабжения, а также в других технических устройствах этот пункт играет второстепенную роль, однако в химической промышленности и в ядерной энергетике он очень важен;

3) иметь соответствующую удобную символику обозначений.

Исходным пунктом для построения «деревьев отказов» является установление вершинного события для исследуемой системы.

Это вершинное событие изображается на «дереве отказов» прямоугольником, в котором указывается рассматриваемое событие. Пример такого изображения представлен на рис. 6.4.

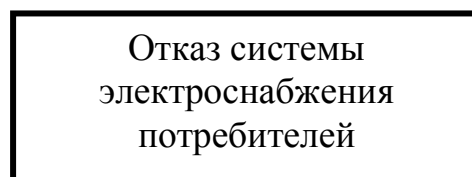


Рис.6.4. Пример изображения вершинного события на дереве отказов

Далее исследуется, можно ли представить вершинное событие как отказ одного из элементов системы. Если можно, то вершинное событие и отказ, который может инициировать это событие, соединяются звеном (оператором) И либо ИЛИ. Звенья (операторы) И и ИЛИ на «дереве событий» изображаются символами, приведенными на рис. 6.5 соответственно.

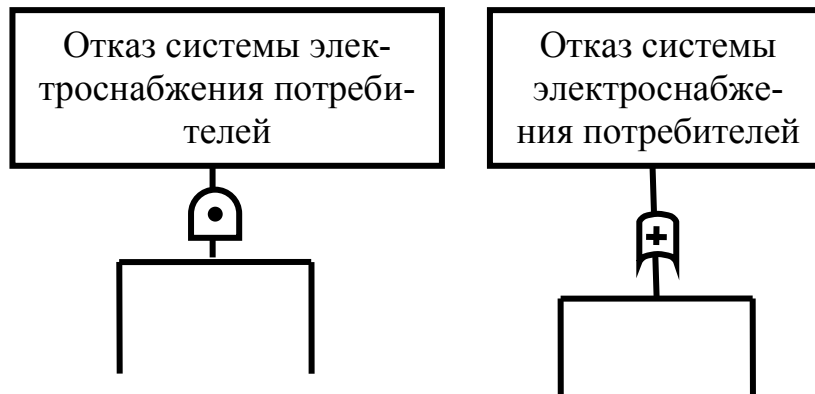


Рис. 6.5. Изображение символов И и ИЛИ на «дереве событий»

Отказ, который соединен с вершинным событием звеном И либо ИЛИ, далее классифицируется как «первичный отказ», «вторичный отказ» или «промежуточное событие».

*Первичный отказ*, под которым понимают событие, не подлежащее по тем или иным причинам дальнейшему анализу, на «дереве отказов» изображается в виде окружности (рис. 6.6). *Вторичный отказ* рассматривается как событие, которое не подлежит дальнейшему анализу из-за отсутствия необходимой информации для него, и изображается на «дереве отказов» в виде ромба (рис. 6.7).

*Промежуточные события – отказы*, как и вершинное событие, подвергаются дальнейшей детализации. Промежуточные события на «дереве отказов» изображаются в виде прямоугольника, как показано на рис. 6.8.



Рис. 6.6. Изображение события «первичный отказ»



Рис. 6.7. Изображение события «вторичный отказ»



Рис. 6.8. Изображение события «промежуточный отказ»

Если промежуточные события обусловлены причинами, выходящими за рамки рассматриваемой системы, то они дальше не изучаются. В противном случае их исследуют подобно вершинному событию. Из каждого такого промежуточного события развивается следующая «ветвь дерева», изображенного на рис. 6.9.

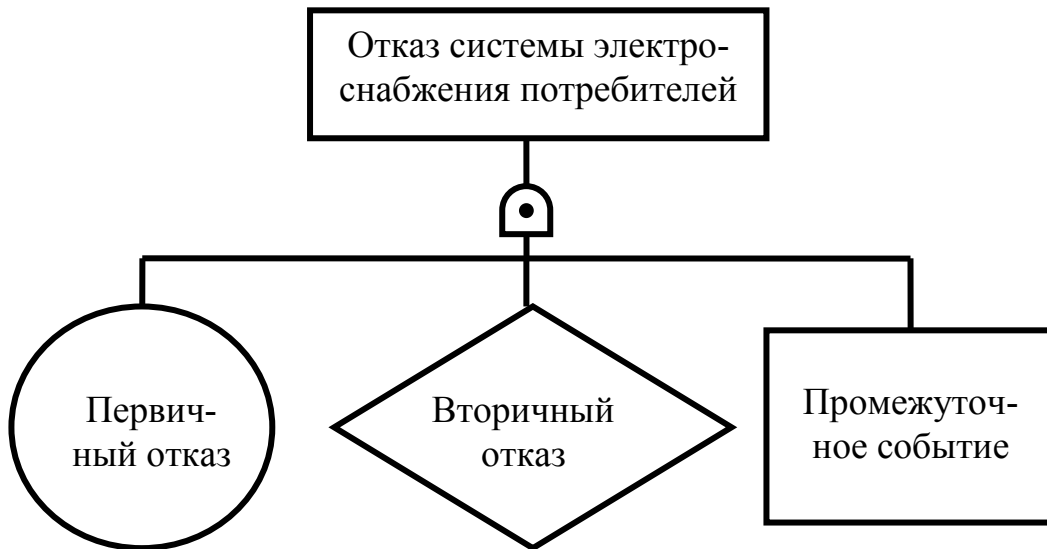


Рис. 6.9. Изображение трех основных событий

В качестве символов-указателей, с помощью которых, например, можно переносить части «дерева отказов» на другой лист, используются треугольники, содержащие внутри цифры.

Необходимо следить, чтобы список причин был полным, так как упущение возможных событий, приводящих к отказам, является основным источником погрешностей при построении «дерева отказов».

На рис. 6.10 представлена общая схема построения «дерева отказов» [13]. Следует также отметить ряд особенностей, связанных с учетом специфики систем при построении «деревьев отказов». Для учета особенностей отказов элементов систем в режиме ожидания требуется построение двух «деревьев отказов» – для режимов ожидания и выполнения функции. «Дерево отказов» позволяет в качественной форме проанализировать значимость отдельных элементов системы с помощью выделения минимальных сечений «дерева отказов», что очень полезно для инженерного проектирования. Подмножество элементов сечения для «дерева событий» есть подмножество основных событий, возникновение которых приводит к появлению вершинного события. Подмножество элементов сечения является минимальным, если оно не может быть уменьшено, но все еще приводит к появлению вершинного события.

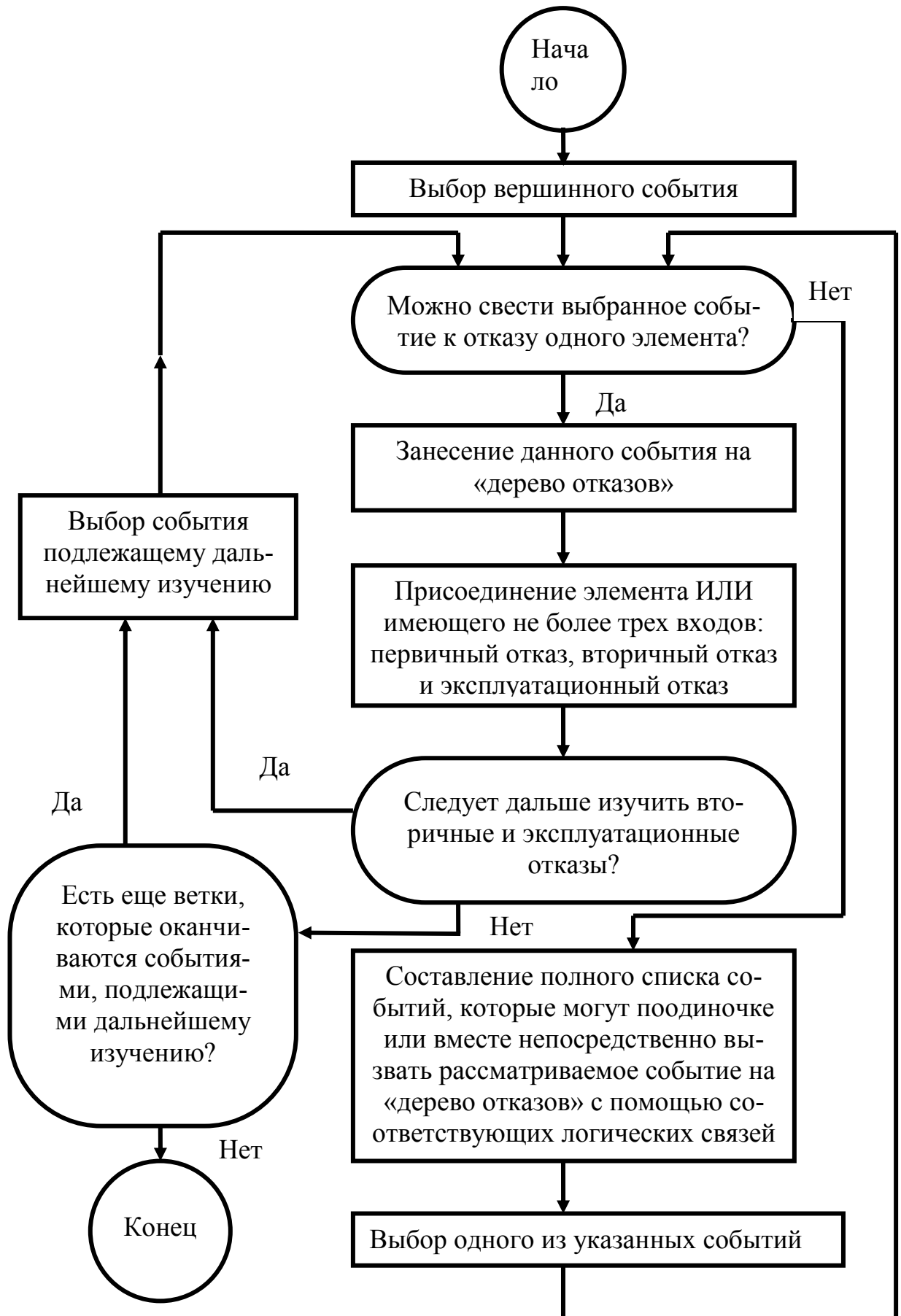


Рис. 6.10. Общая схема построения «дерева отказов»

Рассмотрим пример построения «деревьев отказов» с помощью данной схемы. Рассматривается система контроля за давлением в баке трансформатора. На рис. 6.11 представлена схема данной системы. Пусть вершинное событие, которое необходимо предотвратить, есть разрыв бака. Начало откачки осуществляется при помощи выключателя  $S_1$ , который создает поток в контрольную ветвь и приводит в действие реле  $K_2$ . Контакты реле  $K_2$  замыкаются и включают откачивающий мотор. Спустя примерно 20 с размыкаются контакты выключателя, который контролирует избыточное давление, отключает контрольную цепь и обеспечивает срабатывание реле  $K_2$ . В результате выключается откачивающий мотор.

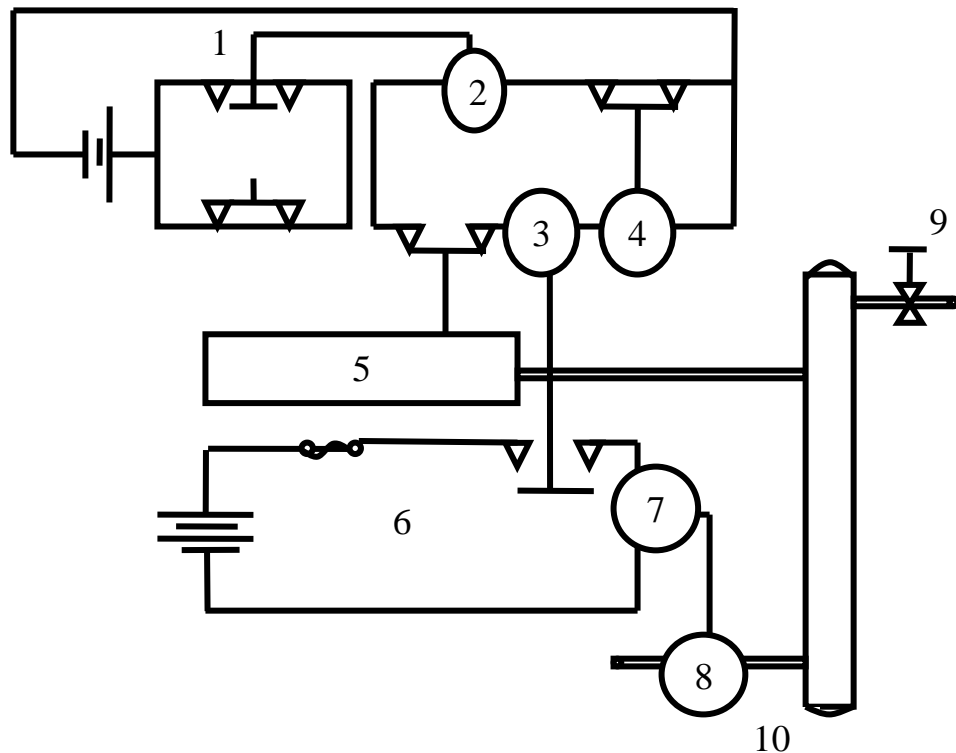


Рис 6.11. Схема система контроля давления в баках:

- 1 – выключатель  $S_1$ ; 2 – реле  $K_1$ ; 3 – реле  $K_2$ ; 4 – таймер;  
 5 – выключатель давления; 6 – система контроля давления в сосуде;  
 7 – мотор; 8 – насос; 9 – вентиль; 10 – сосуд под давлением



Если происходит отказ выключателя, то через 60 с срабатывает реле времени, обесточивающее реле  $K_1$  и отключающее тем самым откачивающий мотор. Реле времени возвращается в исходное состояние автоматически после каждого цикла. «Дерево отказов», изображенное на рис. 6.12, представляет все возможные состояния системы.

На рис. 6.12. показано «дерево отказов» для анализа системы контроля масла в баке трансформатора. «Дерево отказов» содержит следующие обозначения: 1 – разрыв сосуда под давлением после включения насоса; 2 – разрыв сосуда (первичный отказ); 3 – разрыв сосуда (вторичный отказ); 4 – трещина сосуда (дефект монтажа); 5 – разрыв сосуда вследствие избыточного давления из-за непрерывной работы насоса свыше 60 с; 6 – вторичный отказ сосуда из-за других причин (механические, термические и др.); 7 – первичный отказ реле  $K_2$ ; 8 – вторичный отказ реле  $K_2$ ; 9 – напряжение приложено к реле  $K_2$ , более 60 с; 10 – напряжение на выключателе давления в закрытом положении; и – выключатель давления не срабатывает через 60 с; 12 – напряжение на выключателе  $S_1$ ; 13 – напряжение на реле  $K_1$ , когда выключатель давления в закрыт; 14 – вторичный отказ выключателя давления; 15 – избыточное давление не определяется системой контроля давления; 16 – первичный отказ выключателя давления при открытии; 17 – вторичный отказ выключателя  $S_1$ ; 18 – первичный отказ выключателя  $S_1$  при открытии; 19 – действие внешней силы на выключатель  $S_1$ ; 20 – первичный отказ реле  $K_1$ , при открытии; 21 – отказ таймера, когда выключатель давления закрыт более 60 с; 22 – вторичный отказ реле  $K_1$ ; 23 – отказ таймера из-за неправильной установки; 24 – первичный отказ таймера; 25 – вторичный отказ таймера.

Предложено несколько алгоритмов выделения списка минимальных сечений. Рассмотрим на примере один из них.

*Пример 6.2.* На рис. 6.13 изображен упрощенный вид «дерева отказов», представленного на рис. 6.12.

Элементы И и ИЛИ занумерованы от  $G1$  до  $G8$ . Алгоритм начинается непосредственно сразу же после вершинного события, которое обозначено  $G0$ . Если  $G0$  есть элемент ИЛИ, то каждый вход используется для вхождения в соответствующий столбец матрицы списков. Если же  $G0$  есть элемент И, то каждый вход используется для вхождения в первую строку матрицы списков.

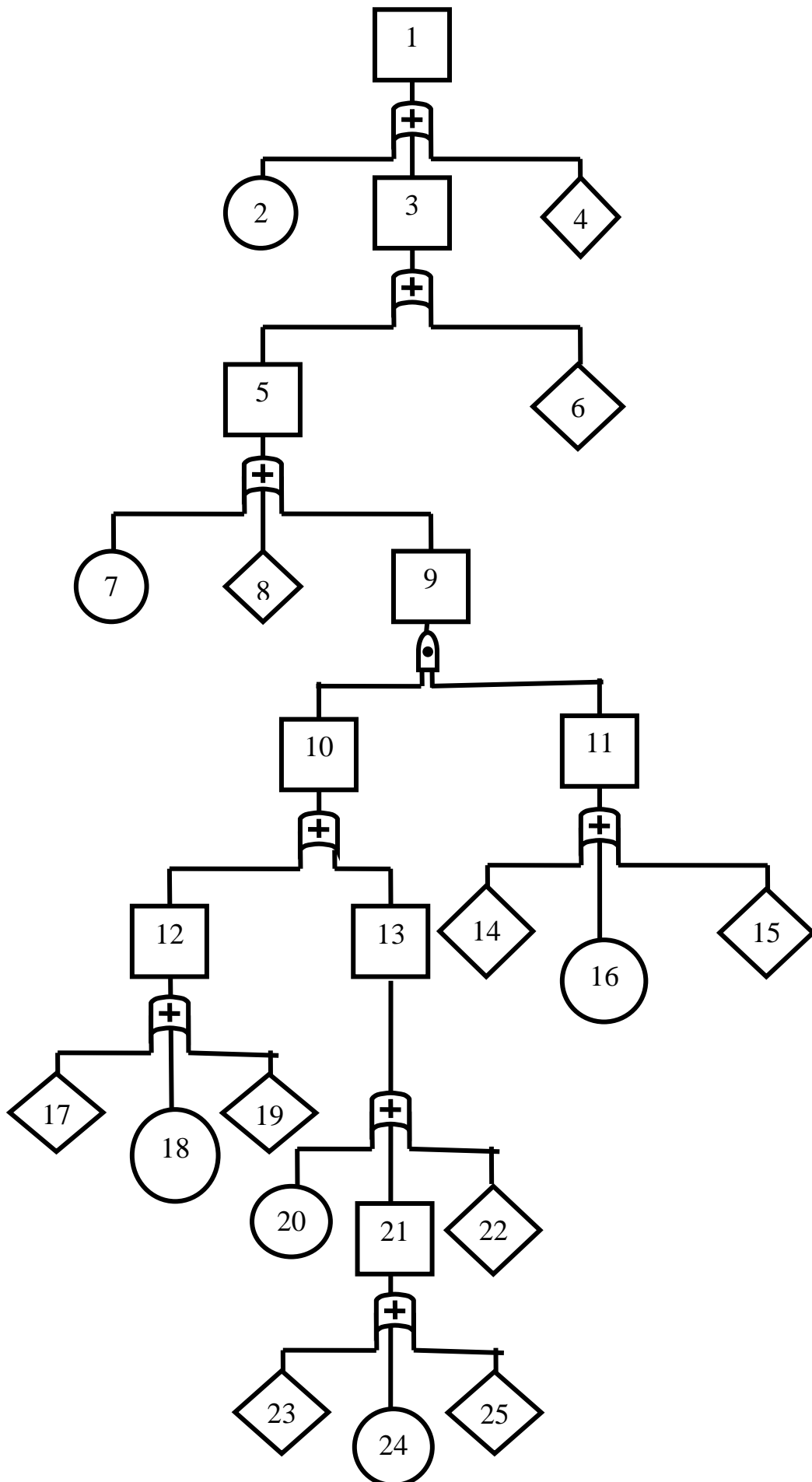


Рис. 6.12. «Дерево отказов» для анализа системы контроля давления в баке трансформатора

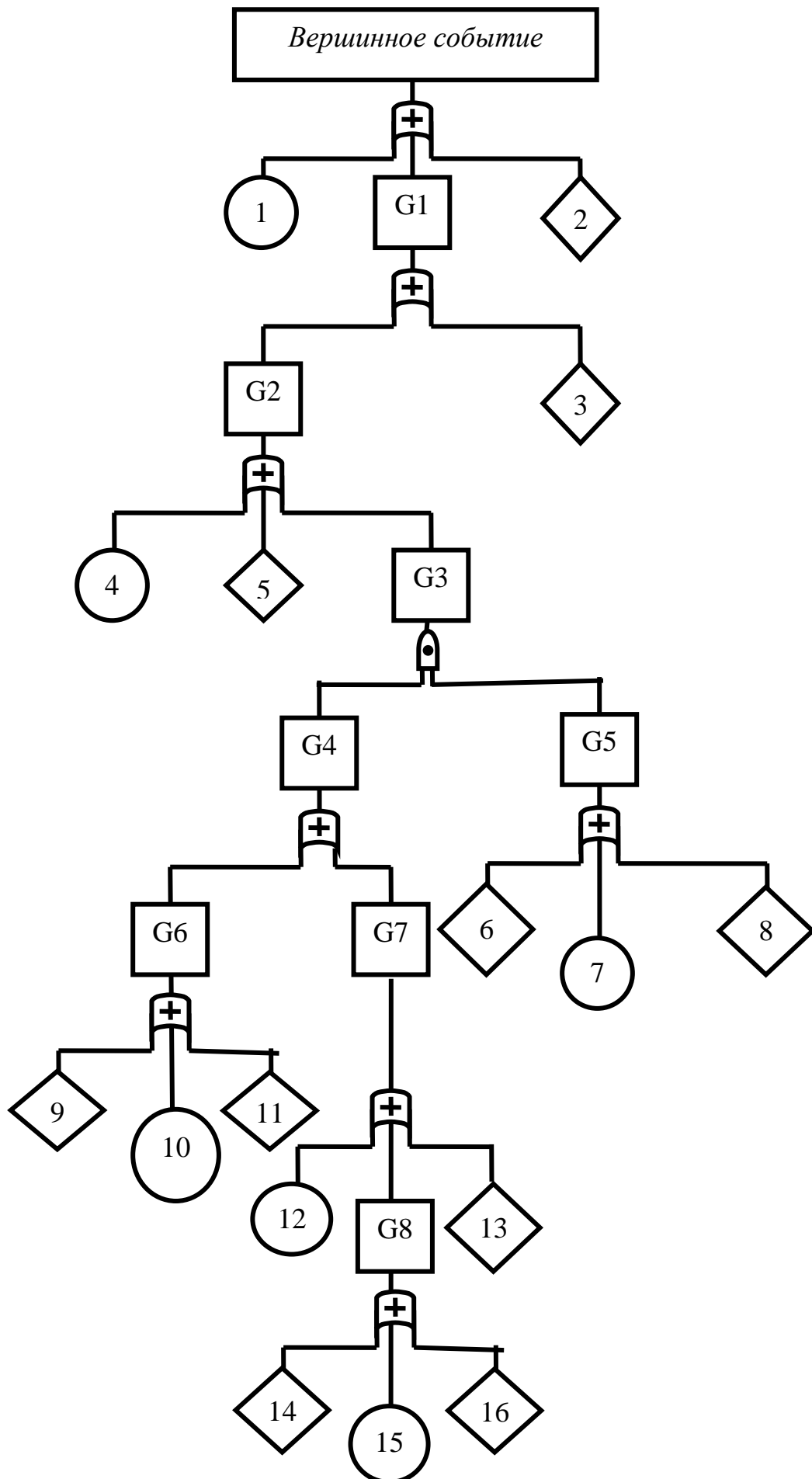


Рис. 6.13. Упрощенное «дерево отказов» для анализа системы контроля давления в баке.

Поскольку на рис. 6.13 элемент, расположенный непосредственно под вершинным событием, есть ИЛИ, то построение матрицы списков начинается с перечисления входов 1,  $G1$  и 2 в отдельном столбце, как это показано ниже:

$$\begin{array}{c} 1 \\ G1 \\ 2 \end{array}$$

Поскольку любое из этих входных событий может привести к появлению вершинного события, каждое из них есть элемент самостоятельного подмножества элементов сечения.

Идея алгоритма заключается в том, чтобы разместить все элементы И и ИЛИ по их входам и основным событиям так, чтобы составить такую матрицу списков, каждый из входов в которую есть основное событие. Столбцы тогда будут соответствовать подмножествам элементов сечений.

Так как  $G1$  есть элемент типа ИЛИ, вновь заменяем этот элемент на его входные элементы отдельным столбцом следующим образом:

$$\begin{array}{c} 1 \\ G1 \\ 3 \\ 2 \end{array}$$

Поскольку  $G2$  есть также элемент типа ИЛИ, заменяем его входными событиями и получаем:

$$\begin{array}{c} 1 \\ 4 \\ 5 \\ G3 \\ 3 \\ 2 \end{array}$$

Так как  $G3$  есть элемент типа И, заменяем строку, в которой стоит  $G3$ , на ее входы, т. е. получаем следующую матрицу:

$$\begin{array}{c} 1 \\ 4 \\ 5 \\ G4, G5 \\ 3 \\ 2 \end{array}$$

Поскольку все входы в оператор И должны реализоваться, чтобы произошли события, стоящие над этим элементом типа И, то понятно, что оператор И увеличивает длину строки. Элемент типа ИЛИ, наоборот, увеличивает длину столбца в нашей матрице списков. Заменяв  $G4$  его входами, имеем:

1  
4  
 $G6, G5$   
 $G7, G5$   
3  
2

Продолжая аналогичным образом, получим, наконец, матрицу с 29 строками, которая представлена ниже (в порядке, отличающемся вследствие упорядочения):

Таблица 6.3

1	6,9	7,9	8,9
2	6,10	7,10	8,10
3	6,11	7,11	8,11
4	6,12	7,12	8,12
5	6,13	7,13	8,13
6	6,14	7,14	8,14
7	6,15	7,15	8,15
8	6,16	7,16	8,16

В «дереве отказов» для системы контроля за давлением в баке трансформатора (см. рис. 6.13) основные события не повторяются. По этой причине все подмножества элементов, принадлежащих сечениям, есть подмножества минимальных сечений, т.е. ни одно подмножество элементов сечений не включается в какое-либо другое подмножество. В общем случае при повторении основных событий в «дереве событий» не будут получаться только подмножества элементов минимальных сечений при помощи описанного алгоритма. Поэтому в такой ситуации необходимо исследовать полученный список, исключив те подмножества элементов сечений, которые содержат другие подмножества. Полученный в результате такой процедуры список будет тогда содержать все подмножества элементов минимальных сечений для «дерева отказов».

Данная матрица характеризует набор основных событий, наступление которых инициирует верхнее событие – разрыв сосуда. Таких основных событий несколько – три одиночных события (1÷3), связанные с отказом бака, два одиночных события (4, 5), связанные с отказом реле  $K_2$ , и 24 двойных события. Каждое из этих основных событий определяет набор событий, которые важны для безопасности сосуда.

Сейчас можно дать качественную оценку полученного результата. Реле  $K_2$  является очень значимым для безопасности элементом, так как верхнее событие может быть вызвано отказом активного элемента  $K_2$ . Для повышения безопасности сосуда целесообразно заменить этот одиночный элемент на два реле, соединенных параллельно (в смысле надежности). Кроме того, данная система содержит более серьезную ошибку проектирования – нет обратной связи по контролируемому параметру – давлению. Поэтому наиболее целесообразно для повышения безопасности сосуда снабдить его клапаном, снижающим давление.

Следующее по важности событие – это отказ самого бака. Однако так как сосуд является пассивным элементом, вероятность его отказа должна быть меньше, чем вероятность отказа реле  $K_2$ .

Менее значительными для безопасности представляются все двойные события, так как их наступление связано с одновременным формированием двух отказов различных элементов системы. Однако следует отметить, что отказ выключателя давления (события 6 и 7) вносит существенный вклад в каждое из этих двойных событий.

Очень важный вывод для практики проектирования, который вытекает из рассмотренного примера, состоит в следующем: система должна быть спроектирована таким образом, чтобы элемент (оператор) ИЛИ на «дереве отказов» располагался как можно ниже, поскольку при ином расположении возникает вероятность формирования одиночных минимальных сечений, которые важны для безопасности.

Используя минимальные сечения, можно дать и *количественную оценку надежности* систем. Это особенно важно для случая, когда анализ безопасности заменяется анализом надежности объекта.

## 6.4. Количественная оценка надежности электроснабжения. Определение ущерба

При проектировании сетей выбирается уровень надежности электроснабжения потребителей, и производится технико-экономическое сравнение различных вариантов схем сети. При сравнении вариантов определяется ожидаемое значение ущерба при возможных перерывах электроснабжения. Ущерб в этом случае носит вероятностный характер. Задача сводится к определению математического ожидания (среднего значения) ущерба  $У$  за определенный период эксплуатации, обычно за 1 год. При этом определяются вероятностные характеристики, от которых зависит надежность схемы.

Из соотношения [14]

$$W_{\text{нд}} = q_{\text{ав}} W_{\text{год}} \text{ [МВт}\cdot\text{ч]} \quad (6.8)$$

$$W_{\text{нд.пл}} = q_{\text{пл}} W_{\text{год}} \quad (6.9)$$

где  $W_{\text{год}}$  – количество энергии, получаемой в течении года потребителями, присоединенными к данной линии.

Ущерб, получаемый при аварийном отключении

$$У = y_0 W_{\text{нд}}, \quad (6.10)$$

где  $y_0$  – удельная стоимость 1 МВт·ч недоотпущенной энергии.

## 6.5. Расчет надежности сложных схем

В расчетах надежности систем электроснабжения возникает противоречивая ситуация: с одной стороны – желание иметь точную модель, наиболее адекватно описывающую процессы отказов и восстановления, с другой – простота расчетов и обеспеченность расчетной модели исходными данными.

Распространение получили методы расчета надежности, которые исходят из предположения, что система состоит из самостоятельных в смысле надежности элементов. В этих методах отказом элемента считается выход его параметров за пределы допустимых технических норм. Предполагается, что при отказе элемент отключается коммутационными устройствами от остальной части системы. Эти методы расчета не учитывают функциональные зависимости между параметрами режимов отдельных элементов системы электроснабжения, что является их несомненным недостатком.

Однако принимая во внимание отсутствие необходимых исходных данных, простоту расчетов и возможность получения количественных оценок надежности для современных сложных систем, на данном этапе развития теории надежности применение таких методов вполне оправдано.

Деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные, оперативные элементы и т. д.), требуемой точности проводимого исследования, уровня представлений о функционировании устройств, наличия статистического материала, масштабности объекта в целом. Например, при оценке надежности сложной системы относительно узла нагрузки в целом группа конструктивных элементов присоединения (разъединитель, выключатель с комплектом релейной защиты и соответствующим участком ошв) представляется как один элемент с единым показателем надежности, включающим отказы этих аппаратов в статическом состоянии и оперативных режимах. Однако при оценке вероятности развития аварии в системе такое укрупнение не позволяет решить задачу. В этом случае следует учитывать отдельно отказы выключателя в статическом и оперативных состояниях и включать в них отказы релейной защиты.

Относительность понятий «элемент» и «система» создает возможность широкого применения поэтапного метода расчета надежности. Суть его состоит в том, что на последующем этапе расчета элемент сложной системы (станция, подстанция, группа линий электропередач) может быть представлен как отдельная система, для которой последовательно уточняются показатели надежности. Тем самым создаются возможности расчета надежности достаточно сложных систем.

Обычно при расчете показателей надежности по средним знаниям вероятностей состояний элементов используются следующие статистические данные:

1. Параметр потока отказов  $\omega$ , т. е. среднее количество отказов в единицу времени (обычно в год)» отнесенное к одному элементу (для простейшего потока отказов  $\omega = \lambda$ ). Для линий электропередачи параметр потока отказов обычно относится к 1 км линии.

2. Среднее время восстановления (замены, аварийного ремонта)  $\bar{t}_B$ , [ч/одно восст].



3. Параметр потока преднамеренных отключений элемента  $\lambda_n$ , 1/г.

4. Средняя продолжительность одного преднамеренного отключения элемента (в основном для профилактических и капитальных ремонтов оборудования)  $\overline{t_{пр}}$ , [ч/откл].

При расчёте надёжности сложных схем по методу «особого элемента» необходимо отметить, что одной из сложных и трудоёмких задач, является многократное определение средних вероятностей отказов оставшихся частей схем после исключения поочередно каждого элемента. В общем случае после исключения одного элемента сложные схемы практически не упрощаются. При расчетах коэффициентов вынужденного простоя относительно разных узлов нагрузки расчеты также весьма трудоёмки. Трудоёмкость и число расчетов резко увеличивается при учете преднамеренных отключений элементов в сложных системах. Поэтому одной из основных задач анализа надёжности электроэнергетических систем относительно узлов нагрузки (или комплекса узлов) является разработка методов определения средних вероятностей отказа и безотказной работы их.

С усложнением взаимосвязей между элементами расчетную схему по надёжности без применения особых приемов невозможно свести к схеме с последовательно-параллельным или параллельно-последовательным соединением элементов. Например, для схемы типа «мостик» или схемы с большим числом поперечных связей правила преобразования последовательно-параллельных или параллельно-последовательных схем надёжности неприменимы.

Из аналитических вероятностных методов расчета сложных схем по средним вероятностям состояния элементов рассмотрим три основных:

1) метод анализа вероятностей состояний системы с анализом параметров режимов в каждом состоянии (этим методом определяются параметры при частичных отказах системы);

2) метод, использующий формулу полной вероятности, и основанный на ней метод разложения на множители;

3) метод, использующий структурные представления схемы т. е. замену сложной схемы эквивалентными относительно узловых пунктов последовательно-параллельными или параллельно-последовательными соединениями элементов.

### 6.5.1. Метод анализа вероятностей состояний системы

С помощью этого метода можно учесть взаимосвязь режимов отдельных элементов и системы с вероятностями состояния системы, т. е. количественно оценить влияние ограничений пропускной способности элементов (по токам нагрева, потери напряжения и т. д.) на показатели надежности системы, в частности на недоотпуск электроэнергии.

Для определения показателей надежности различных состояний системы выделяются расчетные элементы с учетом логики функционирования сети. Реальные элементы системы объединяются в расчетные группы, отказ которых не локализуется в них самих, а приводит к отключению всех смежных элементов. Это, как правило, группа элементов, не разделенных в схеме автоматическими коммутационными аппаратами. В смысле надежности такие элементы оказываются соединенными последовательно. По показателям надежности реальных элементов определяются показатели надежности расчетных элементов.

Затем анализируются режимы при различных состояниях схемы: с одним и двумя аварийно отключенными элементами и с наложением на каждый преднамеренно отключенный элемент аварийного состояния другого. Состояния с тремя и более отключенными элементами в практических расчетах не рассматриваются как маловероятные.

Для каждого состояния системы определяются параметр потока отказов и преднамеренных отключений  $\lambda_{c,i,j}$  и его вероятность  $Q_{i,j}$ .

Рассчитываются режимы работы элементов и системы и сравниваются с допустимыми, затем оценивается значение отключаемой мощности в узлах схемы для обеспечения режима или минимального суммарного ущерба от ограничений по мощности и недоотпуска энергии потребителям. Недоотпущенная электроэнергия определяется как сумма недоотпусков при всех состояниях системы.

В настоящее время метод анализа вероятностей состояния системы является основным для больших энергетических систем. Он позволяет в оценках надежности отразить особенности различных режимов системы. Однако расчеты, выполняемые этим методом, отличаются исключительной трудоемкостью, т. к. практически для каждого состояния (а их может быть очень много) возникает необходимость расчета потокораспределения.

Часто при расчетах надежности схем электроснабжения не надо учитывать ограничения пропускных способностей элементов, а важно лишь оценить структурную надежность схемы относительно каждого узла нагрузки. В этом случае применяется другая группа методов, основанная на использовании структурного анализа сложных схем и формуле полной вероятности.

### 6.5.2. Метод с использованием формулы полной вероятности

Этот метод позволяет с помощью формулы полной вероятности представить сложную схему в виде эквивалентной последовательно-параллельной. Рассмотрим основную идею этого способа на примере конкретной схемы без учета преднамеренных отключений элементов.

Формула полной вероятности для определения надежной работы схемы интерпретируется следующим образом. Вероятность любого события (в нашем случае работы системы относительно узла) вычисляется как сумма произведений вероятностей несовместимых гипотез (в качестве гипотезы рассматриваются либо работа, либо отказ любого элемента) и вероятности события (т. е. работы оставшейся части цепи) при этой гипотезе.

Применяя формулу полной вероятности к расчету вероятности безотказной работы любой схемы, можно сформулировать так называемую теорему разложения на множители. *Надежность цепи с избыточностью равна произведению вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента цепи на вероятность безотказной работы оставшейся цепи (места подключения  $i$ -го элемента замкнуты накоротко) плюс произведение вероятности отказа того же  $i$ -го элемента на вероятность безотказной работы оставшейся цепи (места подключения  $i$ -го элемента разомкнуты)*, то есть для выделенного в схеме элемента рассматриваются две независимые гипотезы.

Рассмотрим на примере мостиковой схемы (см. рис. 6.14) применение теоремы разложения, а следовательно, и формулы полной вероятности для определения показателей надежности сложных схем. Отказы узловых пунктов не учитываются. Относительно любого элемента схемы можно рассмотреть две несовместимые гипотезы: работа с вероятностью  $P$  и отказ его с вероятностью  $q$ .

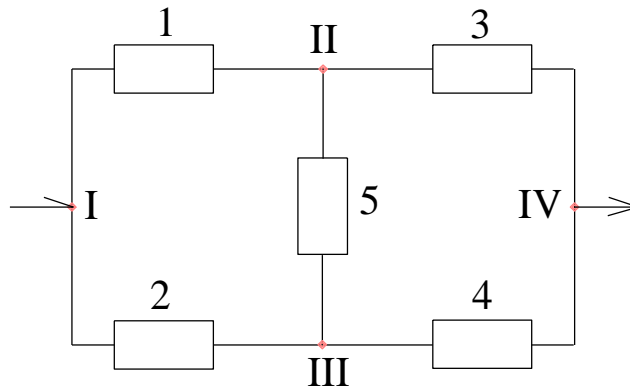


Рис. 6.14. Схема типа «мостик»

В качестве такого элемента выбираем элемент 5. Тогда, применяя теорему разложения нетрудно свести мостиковую схему (рис. 6.14) к сумме двух цепей: параллельно-последовательной и последовательно-параллельной (рис. 6.15), методы расчета которых хорошо разработаны. Вероятность безотказной работы этой схемы относительно узла нагрузки IV

$$P_C = P_5 (1 - q_1 q_2)(1 - q_1 q_2) + q_5 \left[ 1 - (q_1 + q_3 - q_1 q_3)(q_2 + q_4 - q_2 q_4) \right].$$

В этом выражении  $(1 - q_1 q_2)(1 - q_1 q_2)$  есть вероятность безотказной работы схемы при первой гипотезе – безотказной работе элемента 5;  $\left[ 1 - (q_1 + q_3 - q_1 q_3)(q_2 + q_4 - q_2 q_4) \right] q_1 q_2 q_3 \dots q_8$  есть вероятность безотказной работы схемы при второй гипотезе – безотказной работе элемента 5;  $P_5$  – вероятность первой гипотезы;  $q_5$  – вероятность второй гипотезы.

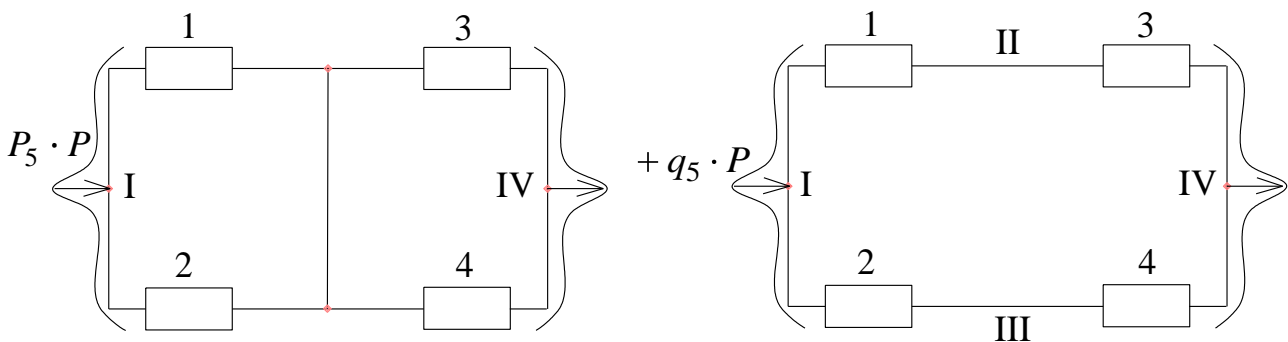


Рис. 6.15. Диаграмма, иллюстрирующая применение теоремы разложения для схемы типа «мостик»

Формула полной вероятности и основанная на ней теорема разложения на множители играют большую роль при анализе надежности сложных схем, поскольку позволяют свести любую сложную схему к совокупности элементарных. Причем в сложной схеме эту теорему приходится применять многократно.

Метод оценки надежности, основанный на формуле полной вероятности, достаточно удобен, прост и нагляден в расчетах даже без применения ЭВМ относительно небольших по объему схем с небольшим числом ветвей и узлов, с которым можно отнести схемы внутриводского электроснабжения.

Для схемы сложной конфигурации реализация этого метода с использованием ЭВМ осложняется выбором элементов, относительно которых производится разложение.

Для наглядного представления многократного применения теоремы разложения рассмотрим схему типа «двойной мостик» (рис 6.16). Определим вероятность безотказной работы этой схемы относительно узла IV без учета преднамеренных отключений элементов, если известны средние вероятности состояний отказов элементов  $q_1 q_2 q_3 \dots q_8$ . Отказы узловых пунктов не учитываем. Предполагается, что все элементы схемы независимы в смысле вероятности отказов. Пропускные способности элементов по мощности не ограничены.

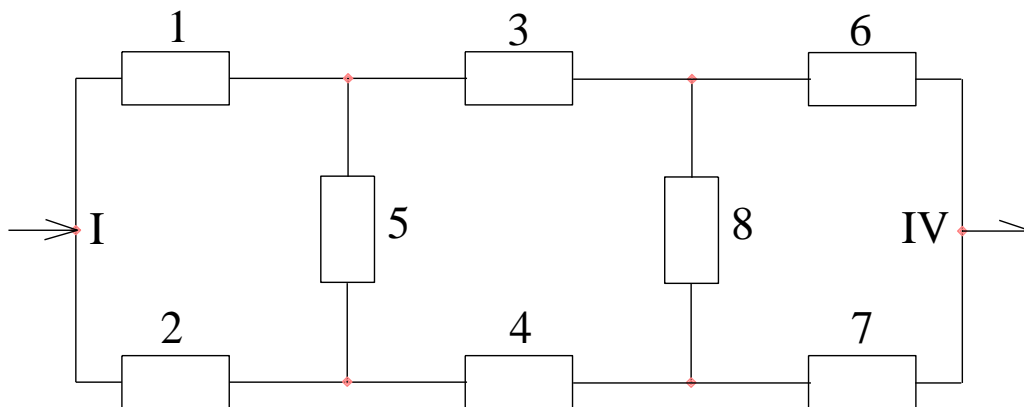


Рис. 6.16. Схема типа «двойной мостик»

Применяем последовательно теорему разложения сначала относительно элемента 5 и определяем вероятность безотказной работы оставшейся части схемы, т. е. содержащей элементы 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8. Для оценки безотказной работы этой оставшейся части схемы в свою очередь применяем теорему разложения относительно элемента 8.

Диаграмма, поясняющая последовательность выполнения этих действий представлена на рис. 6.17. Вероятность надежной работы такой системы запишется в следующем виде:

$$P_C = P_5 \{ P_8 (1 - q_1 q_2) (1 - q_3 q_4) (1 - q_6 q_7) + q_8 (1 - q_1 q_2) [1 - (q_3 + q_6 - q_3 q_6) (q_4 + q_7 - q_4 q_7)] \} + q_5 \{ P_8 [1 - (q_1 + q_3 - q_1 q_3) (q_2 + q_4 - q_4 q_7)] (1 - q_6 q_7) + q_8 [1 - (q_1 + q_3 + q_6 - q_1 q_6 - q_3 q_6 + q_1 q_3 q_6) (q_2 + q_4 + q_7 - q_2 q_4 - q_2 q_7 + q_2 q_4 q_7)] \}.$$

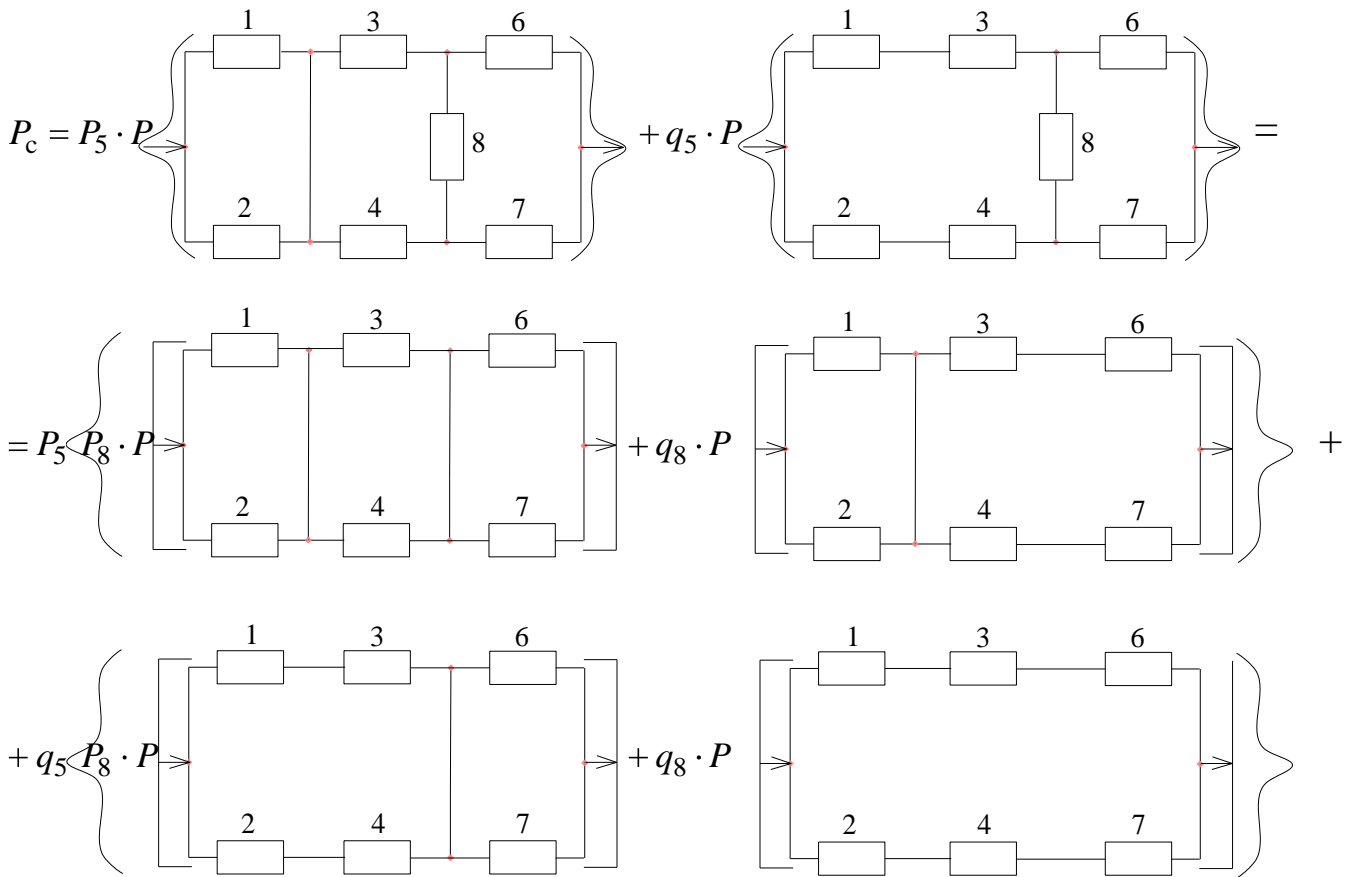


Рис. 6.17. Диаграмма, иллюстрирующая двукратное применение теоремы разложения

### 6.5.3. Методы структурного анализа сложных схем и использование их для оценки надежности

Применение методов структурного анализа для исследования схем электрических систем электроснабжения позволяет изучать их в общем виде. При расчете показателей надежности с помощью структурных схем анализируются не все возможные состояния схемы, а только минимальные сечения или состояния безотказной работы минимального набора элементов, которые обеспечивают нормальное функционирование схемы (передачу энергии) от источника питания до узла нагрузки – минимальных путей.

Из определения минимальных путей и сечений следует, что предполагается неограниченная пропускная способность элементов схемы от каждого рассматриваемого узла нагрузки. Например, для схемы, приведенной на рис. 6.14, без учета надежности узловых пунктов минимальными путями относительно узла IV являются  $\{1,3\}$ ,  $\{2,4\}$ ,  $\{1,5,4\}$ ,  $\{2,5,3\}$ , (см. рис. 6.18), а минимальными сечениями – наборы элементов  $\{1,2\}$ ,  $\{3,4\}$ ,  $\{1,5,4\}$ ,  $\{2,5,3\}$  (см. рис. 6.18).

С помощью минимальных путей или сечений, полученных в результате структурного анализа, можно определить вероятность обеспечения узла нагрузки. Рассмотрим основные положения и определения теории графов, используемые в структурном анализе, целью которого является определение минимальных путей или минимальных сечений.

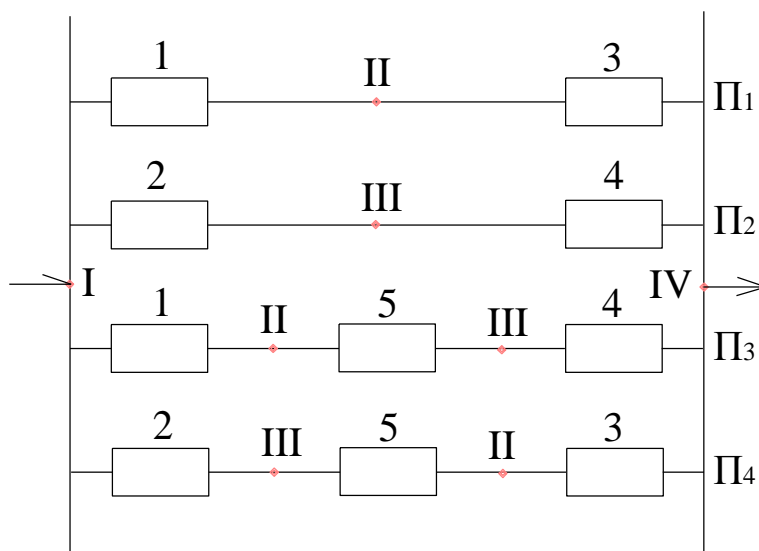


Рис. 6.18. Минимальные пути для схемы типа «мостик»

Графом называются два любых множества  $A$  и  $B$ , в которых каждому элементу из множества  $A$  соответствуют два элемента из множеств  $B$ . Элементы  $A$  и  $B$  называются соответственно ребрами и вершинами графа. Вершины, соответствующие ребру, называются **концами** ребра. Ребро называется **ориентированным**, если один из его концов рассматривается как начало, а другой как окончание. На схеме ориентированное ребро изображается как отрезок со стрелкой. Граф, в котором отдельные ребра ориентированны, называется **частично-ориентированным**. Граф, где все ребра ориентированы; называется ориентированным. Граф без ориентации ребер называется **неориентированным**.

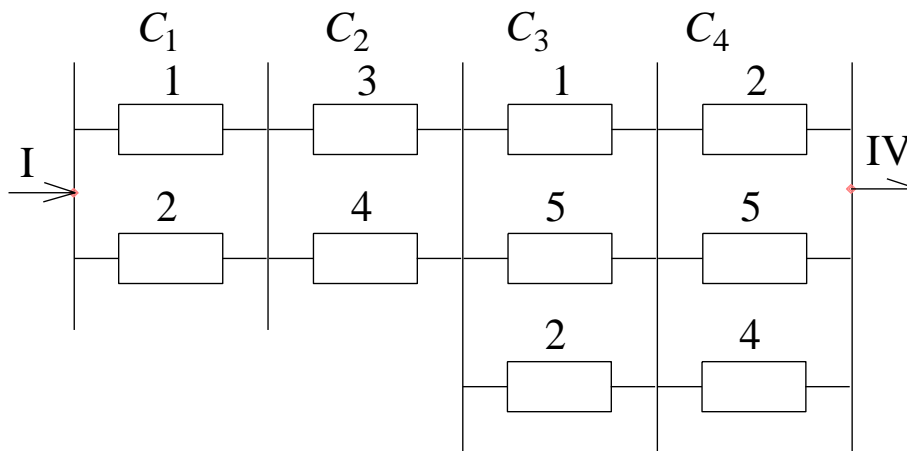


Рис. 6.19. Минимальные сечения для схемы типа «мостик»

Изучение структуры той или иной схемы равносильно изучению структуры графов. Граф называется **планарным**, если он может быть изображен на плоскости без пересечений ребер в точках, не являющихся вершинами графа, в противном случае граф является **непланарным**. Для системы электроснабжения свойство планарности, как правило, выполняется, так как переходы линий друг над другом встречаются относительно редко.

Анализ связей при расчетах надежности заключается, прежде всего в нахождении и оценке путей между его вершинами, т. е. источником питания и узлами нагрузки. **Путем графа** называется такая последовательность ребер, в которой конец каждого предыдущего ребра совпадает с началом последующего. Однореберный путь называется непосредственным, многореберный – **транзитным**.

Существует много способов определения минимальных путей графа.



Эти способы делятся на аналитические и логико-цифровые (последние реализуются обычно только на ЭВМ) и основаны на аналитическом представлении схемы в виде матрицы непосредственных путей. По путям графа можно также определить и минимальные сечения. Чтобы составить структурную схему (граф сети), необходимо предварительно преобразовать схему электрической сети в расчетную схему надежности, т. е. схему функционирования сети. Последовательно соединенные элементы между двумя узлами целесообразно заменить одним эквивалентным, параметры которого определяются по известным формулам. Аналогичный прием применяется для элементов, параллельно включенных между двумя узлами.

После этого элементам расчетной схемы ставятся в соответствие ребра графа, а пунктам физического соединения (сборным шинам, трехобмоточным трансформаторам, местам подключения ответвлений к магистральным линиям) – вершины графа. Надежность пунктов физического соединения элементов и коммутационной аппаратуры может учитываться введением в расчетную схему элементов соответственно логике функционирования их в электрической системе. Кроме указанных вершин в графе сети будет еще одна особая вершина – вершина источников, иногда называемая вершиной «истока». Источник питания, если вероятность его безотказной работы отличается от единицы, вводится расчетным элементом надежности. Все свободные концы ребер элементов таких источников питания объединяются в вершину – «исток».

Обычно граф сети с учетом возможных направлений потоков мощности в элементах является частично-ориентированным. Направленность графа сети относительно разных узлов нагрузки может быть различной. Поэтому для оценки надежности системы относительно различных узлов нагрузки следует каждый раз проверять ориентировку ребер исходного графа. Построение и составление исходной схемы в виде графа дает возможность упростить процесс исследования надежности системы алгебраической методикой вычисления.

В качестве аналитического образа графа используется матрица непосредственных путей, которая строится следующим образом.

1. Нумеруются вершины исходного графа. Для удобства расчетов нумерацию рекомендуется начинать с вершины источников. Порядок матрицы равен числу вершин в исходном графе.

2. Строки и столбцы матрицы обозначаются номерами вершин графа.

3. Элементу, принадлежащему  $i$ -ой строке и  $j$ -му столбцу матрицы присваивается некоторое число (единица или значение вероятности надежной работы элемента, если из вершины  $i$  к вершине  $j$  имеется непосредственный путь; если пути нет – ставится нуль). Если указанному элементу присваивается значение «1», то такую матрицу называют матрицей смежности. В случае расчета надежности схем очень сложной конфигурации для уменьшения порядка матрицы путей целесообразно разделить схему на несколько частей.

Используя матрицу непосредственных путей  $A$  в качестве аналитического образа расчетной схемы по надежности, можно определить минимальные пути и минимальные сечения в сложной схеме. Существует несколько методов определения минимальных путей и соответственно минимальных сечений, которые достаточно подробно описаны в [18]. После определения минимальных путей и сечений исходная сложная расчетная схема по надежности заменяется эквивалентной относительно узла, последовательно-параллельной – в случае путей или параллельно – последовательной – в случае сечений.

Такая замена дает возможность использовать известные приемы расчета, в частности применить формулы для суммы вероятностей совместных событий – безотказной работы путей или событий отказа сечений. Но следует иметь в виду, что пути и сечения в общем случае являются зависимым а, так как в них могут входить одни и те же элементы. Эту зависимость необходимо учитывать при определении вероятности надежной работы нескольких путей или вероятности отказа нескольких сечений в формуле для суммы вероятности совместимых событий при условии, что каждый путь может пропустить всю необходимую мощность в узел нагрузки.

Применяя формулу для суммы вероятностей совместимых событий (работы путей) к эквивалентной последовательно-параллельной схеме, получаем для вероятности безотказной работы схемы относительно некоторого узла  $n$

$$P_C = P\left(\sum_{i=1}^k \Pi_i\right) = P\left(\sum_{i=1}^k \Pi_i\right) - \sum_{i,j} P(\Pi_i \Pi_j) + \sum_{i,j,l} P(\Pi_i \Pi_j \Pi_l) - \dots + (-1)^{k-1} P(\Pi_1 \Pi_2 \dots \Pi_k), \quad (6.11)$$

где  $k$  – число путей;  $\Pi_i$  – событие работы  $i$ -го пути;  $P(\Pi_i)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го пути:

$$P(\Pi_i) = \prod_{j=1}^{m_i} P_{i,j}, \quad (6.12)$$

$P_{i,j}$  – вероятность безотказной работы  $j$ -го элемента в  $i$ -м пути;  $m_i$  – число элементов в  $i$ -м пути;

$$P(\Pi_1 \Pi_2 \dots \Pi_k) = P(\Pi_1) P(\Pi_2 / \Pi_1) \dots P(\Pi_k / \Pi_1 \Pi_2 \dots \Pi_{k-1}) \quad (6.13)$$

есть вероятность безотказной работы  $k$  путей;  $P(\Pi_1 \Pi_2)$  – условная вероятность безотказной работы второго пути при условии, что первый путь работает безотказно. Эту вероятность можно получить, если в последовательности второго пути места подключения элементов, уже входивших в состав первого пути, будут закорочены, т. е. вероятность из безотказной работы при вычислении условной вероятности принимается равной единице. Например, для схемы, приведенной на рис. 5.5,  $P(\Pi_1) = P_1 P_3$ ;  $P(\Pi_3 / \Pi_1) = P_4 P_5$ .

*При определении каждой последующей условной вероятности следует учитывать вероятность безотказной работы только тех элементов, которые еще не входили в предыдущие пути.* Вероятность безотказной работы элементов, входивших в предыдущие пути, равна 1. Например вероятность того, что пути  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  работают безотказно, равна  $P(\Pi_1 \Pi_3) = P(\Pi_1) P(\Pi_1 \Pi_3) = P_1 P_3 P_4 P_5$ . Распространяя это положение на  $k$  путей, можно показать, что

$$P(\Pi_1 \Pi_2 \dots \Pi_k) = \prod_{i=1}^r P_i \quad (6.14)$$

где  $r$  – число элементов, входящих в  $k$  путей, т. е. эта вероятность равна произведению вероятностей безотказной работы всех элементов, входящих в эти пути, причем каждый элемент учитывается в произведении только один раз, хотя он может участвовать в нескольких путях. Для схемы, приведенной на рис. 5.5

$$P(\Pi_1 \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4) = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5$$

При определении вероятности отказа схемы относительно узла нагрузки, когда она заменяется эквивалентной параллельно-последовательной (минимальные сечения), также используется формула суммы вероятностей совместимых событий – отказов сечений. Вероятность отказа схемы относительно некоторого узла нагрузки

$$Q_C = Q\left(\sum_{i=1}^k C_i\right) = Q\left(\sum_{i=1}^k C_i\right) - \sum_{i,j} Q(C_i C_j) + \sum_{i,j,l} Q(C_i C_j C_l) - \dots + (-1)^{k-1} Q(C_1 C_2 \dots C_k), \quad (6.15)$$

где  $k$  – количество сечений;  $C_i$  – событие отказа  $i$ -го сечения;  $Q(C_i)$  – вероятность отказа  $i$ -го сечения:

$$Q(C_i) = \prod_{j=1}^{m_i} q_{i,j}, \quad (6.16)$$

здесь  $q_{i,j}$  – вероятность отказа  $j$ -го элемента  $i$ -го сечения  $m_i$  – число элементов в  $i$ -м сечении;

$$Q(C_1 C_2 \dots C_k) = Q(C_1) Q(C_2 / C_1) \dots Q(C_k / C_1 C_2 \dots C_{k-1}) \quad (6.17)$$

вероятность отказа  $k$  сечений;  $Q(C_2 / C_1)$  – условная вероятность отказа второго сечения при отказе первого сечения.

Эту вероятность можно получить, если в последовательности второго сечения места подключения элементов, уже входивших в состав первого сечения, будут разорваны, т. е. вероятность их отказа при вычислении условной вероятности принимается равной единице; например для схемы, приведенной на рис. 6.19

$$Q(C_1) = q_1 q_2; \quad Q(C_3 / C_1) = q_4 q_5$$

**При определении каждой последующей условной вероятности следует учитывать вероятность отказа только тех элементов, которые еще не входили в предыдущие сечения.** Вероятность отказа элементов, входящих в предыдущие сечения, равна единице; например вероятность отказа сечений  $C_1$  и  $C_3$  будет равна

$$Q(C_3 C_1) = q_1 q_2 q_4 q_5$$

соответственно вероятность отказа всех  $k$  сечений

$$Q(C_1 C_2 \dots C_k) = \prod_{i=1}^r q_i \quad (6.18)$$

где  $r$  – число элементов, входящих в  $k$  сечений, т. е. эта вероятность равна произведению вероятностей отказов всех элементов, входящих в эти сечения, причем каждый элемент учитывается в произведении только один раз.

Для схемы, приведенной на рис. 6.19

$$Q(C_1 C_2 C_3 C_4) = q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$$

Этим приемом обеспечивается идентичность результатов, полученных при расчете сложных исходных схем и эквивалентных структурных. Пренебрежение этим правилом, в частности, в определении вероятности безотказной работы по путям, приводит к недопустимо большим погрешностям.

Рассмотрим особенности этих способов определения показателей надежности по путям и сечениям. В формуле определения вероятности безотказной работы с использованием путей число слагаемых равно  $(2 \div 1)$  и ни одним из слагаемых нельзя пренебречь (см. формулу (6.11)), т. к. все они являются произведениями сомножителей, близких к единице. При незначительном усложнении схемы, в особенности, если схема многосвязная с большим числом поперечных связей, число путей резко возрастает и расчеты становятся весьма трудоемкими.

Метод, использующий представление исходной схемы в виде минимальных сечений относительно узлов нагрузки, свободен от этого недостатка, т. к. в большинстве случаев можно ограничиться учетом слагаемых, в которых не более трех сомножителей. Приближенно можно считать, что вероятность отказа сечений равна сумме их вероятностей отказов

$$Q\left(\sum_{i=1}^k C_i\right) \approx \sum_{i=1}^k Q(C_i), \quad (6.19)$$

и в расчет следует вводить сечения с числом элементов не более двух-трех в зависимости от конкретной задачи и необходимой точности расчетов.

Конечный результат – вычисление вероятности отказа системы относительно интересующего нас узла нагрузки или вероятность безотказной работы при представлении схемы в виде минимальных сечений – достигается быстрее и проще, чем методом минимальных путей, однако процесс определения сечений сам по себе более трудоемкий. На существующем этапе развития и применения этих методов в электроэнергетике нецелесообразно противопоставлять один метод другому, т. к. для схем с протяженной структурой и малым числом поперечных связей определенные преимущества будет иметь метод путей, а для схем с концентрированной структурой и большим числом поперечных связей предпочтителен метод сечений.

Методы расчета показателей надежности сложных схем с использованием минимальных путей и сечений достаточно просто позволяют учесть преднамеренное отключение элементов. Так, при представлении исходной схемы в виде минимальных путей вероятность отказа  $Q_{C.П}$  схемы относительно  $n$ -го узла нагрузки складывается из суммы вероятностей двух гипотез; отказов всех путей  $Q(\sum_{i=1}^k P_i)$  и наложения на преднамеренное отключение  $i$ -го элемента

отказа оставшейся части схемы  $Q_{П}(\sum_{i=1}^{k-ri} P_i)$  – предполагаем, что преднамеренные отключения отдельных элементов не совмещаются

$$Q_{C.П} = Q(\sum_{i=1}^k P_i) + Q_{П}(\sum_{i=1}^{k-ri} P_i), \quad (6.20)$$

где  $Q(\sum_{i=1}^k P_i) = 1 - P(\sum_{i=1}^k P_i)$   $Q_{C.П} = Q(\sum_{i=1}^k P_i) + Q_{П}(\sum_{i=1}^{k-ri} P_i)$ , (6.21)

$$Q_{П}(\sum_{i=1}^{k-ri} P_i) = \sum_{i=1}^m K_{П,i} q_{П,i} Q(\sum_{i=1}^{k-ri} P_i), \quad (6.22)$$

где  $P = (\sum_{i=1}^k P_i)$  – вероятность работы всех путей схемы.

Для суммы вероятностей совместимых событий (6.11):  $q_{П,i}$  – вероятность преднамеренного отключения  $i$ -го элемента схемы;  $r$  – число путей, в которых содержится  $i$ -й элемент схемы;  $k - r_i$  – число путей, оставшихся после исключения  $i$ -го элемента из схемы;  $K_{П,i} < 1$  – коэффициент, учитывающий уменьшение вероятности отказов вследствие того, что возможно наложение аварии оставшейся части схемы на преднамеренное отключение  $i$ -го элемента, а не наоборот;  $m$  – число элементов в сложной схеме.

Если схема представлена в виде минимальных сечений, то вероятность отказа относительно  $n$ -го узла

$$\begin{aligned} Q_{C.П} &= Q(\sum_{i=1}^k C_i) + \sum_{i=1}^m K_{П,i} q_{П,i} Q(\sum_{i=1}^{k-ri} C_i) \approx \\ &\approx \sum_{i=1}^k Q(C_i) + \sum_{i=1}^m K_{П,i} q_{П,i} Q(\sum_{i=1}^{k-ri} C_i) \end{aligned} \quad (6.23)$$

$k - r_i$  – число сечений оставшихся в схеме после исключения  $i$ -го элемента.

В оставшейся после исключения  $i$ -го элемента части схемы минимальные сечения получаются из сечений исходной полной схемы после исключения образовавшихся не минимальных сечений. Аналогичные приемы можно использовать для расчета надежности тех сложных схем, в которых возможны совмещения преднамеренных отключений различных элементов. В этом случае рассматриваются гипотезы наложения аварий на преднамеренные отключения двух и более элементов оставшихся частей схемы и гипотезы отказа схемы без учета преднамеренных отключений элементов.

*Пример 6.5.1.* Для узла нагрузки II схемы (см. рис. 6.18) требуется определить вероятность отказа системы с учетом преднамеренных отключений элементов, если заданы вероятности отказов каждого элемента  $q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$  вероятности их преднамеренных отключений  $q_{П1} q_{П2} q_{П3} q_{П4} q_{П5}$  также коэффициенты, учитывающие уменьшение вероятности отказов, вследствие юге, что возможно наложение аварии оставшейся части схемы не преднамеренное отключение элемента, а не наоборот  $K_{П,i}$ . Преднамеренные отключения элементов не совмещаются.

Воспользуемся представлением схемы в виде минимальных сечений. Отказы узловых пунктов не учитывать.

*Решение.* Минимальными сечениями исходной схемы будут  $C_1 \approx 1, 2$  ;  $C_2 \approx 3, 4$  ;  $C_3 \approx 1, 5, 4$  ;  $C_4 \approx 2, 5, 3$  (см. рис. 6.20, а).

Минимальные сечения при отключении 1-го элемента получаются из минимальных сечений исходной схемы исключением элемента 1, затем исключением из полученных сечений не минимальных (рис. 6.20, в).

В результате получаются сечения  $C_{11} \approx 2$  ;  $C_{12} \approx 3, 4$  ;  $C_{13} \approx 5, 4$  .

Аналогично определяются сечения

- при отключении 2-го элемента  $C_{21} \approx 1$  ;  $C_{22} \approx 3, 4$  ;  
 $C_{23} \approx 5, 3$  ;
- 3-го элемента  $C_{31} \approx 1, 2$  ;  $C_{32} \approx 4$  ;  $C_{33} \approx 2, 5$  ;
- 4-го элемента  $C_{41} \approx 1, 2$  ;  $C_{42} \approx 3$  ;  $C_{43} \approx 1, 5$  ;

- 5-го элемента  $C_{51} \approx 1,2$  ;  $C_{52} \approx 3,4$  ;  $C_{53} \approx 1,4$  ;  $C_{54} \approx 2,3$   
(см. рис 6.20, г, д, е, ж).

Пренебрегая вероятностью отказа более трех элементов в схеме и применяя изложенный выше алгоритм определения вероятности отказа схемы относительно узла нагрузки с учетом преднамеренных отключений элементов, получаем вероятность отказа схемы

$$\begin{aligned}
Q_{C.П} \cong & \sum_{i=1}^k q(C_i) + \sum_{i=1}^m K_{П,i} q_{П,i} q \left( \sum_{i=1}^{k-ri} C_i \right) = q(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + \\
& + K_{П,1} q_{П,2} q(C_{11} + C_{12} + C_{13}) + K_{П,2} q_{П,2} q(C_{21} + C_{22} + C_{23}) + \\
& + K_{П,3} q_{П,3} q(C_{31} + C_{32} + C_{33}) + K_{П,4} q_{П,4} q(C_{41} + C_{42} + C_{43}) + \\
& + K_{П,5} q_{П,5} q(C_{51} + C_{52} + C_{53} + C_{54}) = q_1 q_2 + q_3 q_4 + q_1 q_5 q_4 + q_2 q_3 q_5 + \\
& + K_{П,1} q_{П,1} (q_2 + q_3 q_4 + q_5 q_4 + q_2 q_3 q_4 + q_2 q_4 q_5) + \\
& + K_{П,2} q_{П,2} (q_1 + q_3 q_4 + q_5 q_3 + q_1 q_3 q_4 + q_1 q_3 q_5) + \\
& + K_{П,3} q_{П,3} (q_4 + q_1 q_2 + q_5 q_2 + q_1 q_2 q_4 + q_4 q_2 q_5) + \\
& + K_{П,4} q_{П,4} (q_3 + q_1 q_2 + q_5 q_1 + q_1 q_2 q_3 + q_3 q_1 q_5) + \\
& + K_{П,5} q_{П,5} (q_1 q_2 + q_3 q_4 + q_1 q_4 + q_3 q_2).
\end{aligned}$$



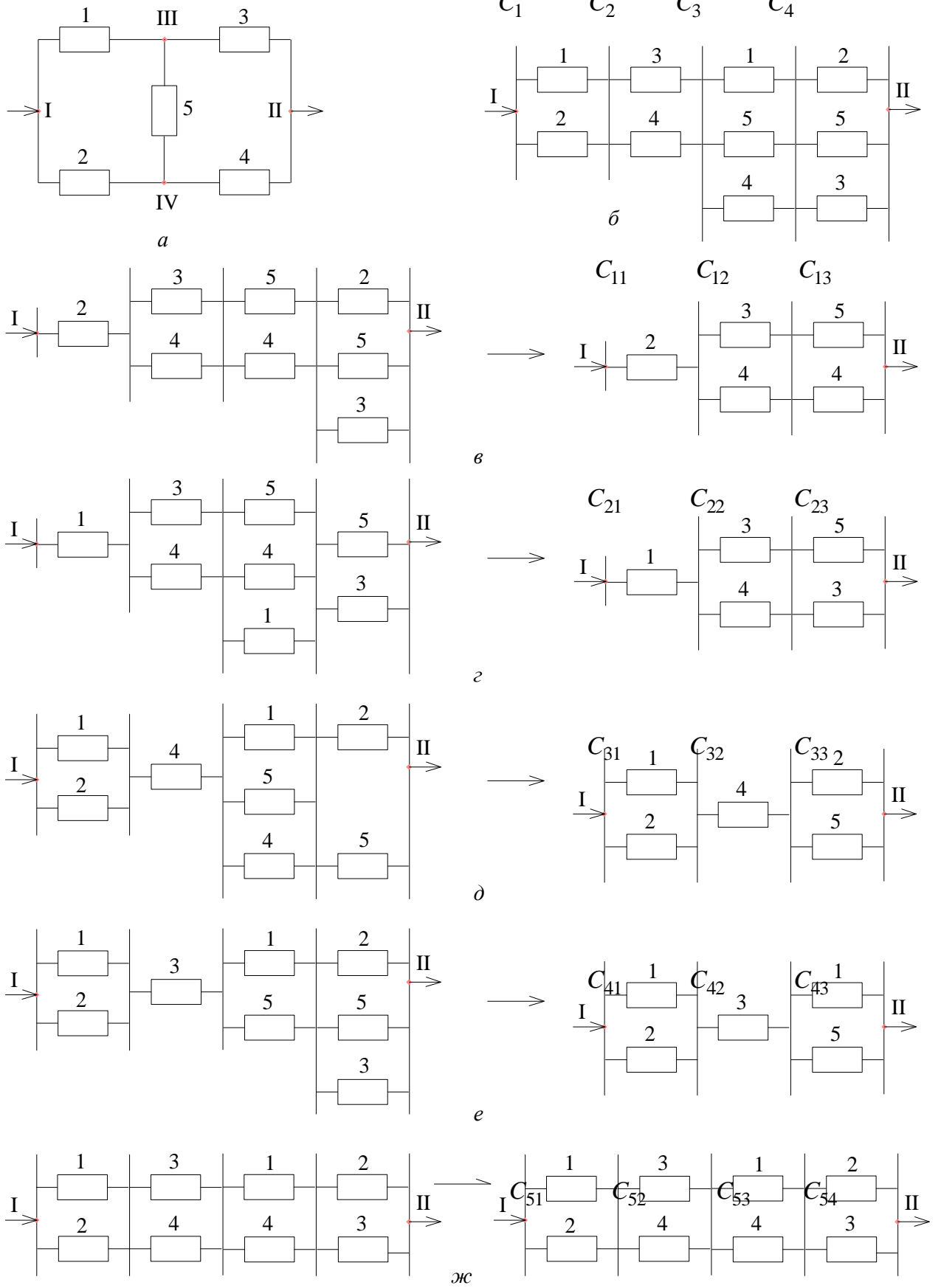


Рис. 6.20. Преобразование схемы по методу минимальных сечений

### 6.5.4 Составление расчетных схем и особенности расчетов надежности сложных схем электрических соединений

Современные системы электроснабжения относятся к категории сложных систем, причем сложность определяется не столько количеством элементов, сколько сложностью функциональных и логических связей между отдельными частями и элементами системы. К тому же в отличие от многих технических систем эти системы являются системами со многими входами и выходами (т. е. имеют много источников питания и потребителей). Этим определяются высокие требования, предъявляемые к составлению расчетной схемы по надежности той или иной системы. Полный учет всех факторов, влияющих на надежность системы, очевидно, невозможен ввиду их чрезвычайного многообразия. Поэтому в настоящее время получил широкое распространение статистический подход к оценке основных показателей надежности элементов электрических систем.

Для сложных систем электроснабжения составление расчетных схем по надежности является весьма трудоемкой задачей и по трудозатратам она соизмерима с расчетами показателей надежности. Если ставить задачу оценки показателей надежности относительно узлов нагрузки, то этот процесс можно в значительной степени формализовать на ЭВМ, используя метод структурного анализа, в частности метод формирования путей передачи.

Рассмотрим более подробно возможную логику работы схемы. Электрическая схема состоит из узлов и ветвей. Как правило, узлом являются сборные шины, трех обмоточный трансформатор или секция шин. Ветвь может состоять из нескольких элементов: линия, трансформатор, выключатель и др.

Отказ элемента, входящего в ветвь, по-разному влияет на работоспособность всей ветви в целом и примыкающих к ней узлов. Ветвь, содержащая отказавший элемент, теряет способность передавать энергию на время восстановления этого элемента  $\bar{t}_в$ . Узлы, примыкающие к этой ветви, могут терять работоспособность на следующие периоды:

а) на время автоматического отключения  $\bar{t}_а$  отказавшего элемента от узла, если между узлом и этим элементом находится коммутационный аппарат, на который действует релейная защита (вероятность отказа коммутационного аппарата при этом не учитывается);

б) на время ручных переключений  $\bar{t}_{\text{оп}}$  необходимых для отключения Отказавшего элемента от узла, если между ними находится разъединитель или коммутационный аппарат, не снабженный релейной защитой;

в) на время восстановления  $\bar{t}_{\text{в}}$  отказавшего элемента, если он непосредственно связан с узлом.

В первом случае узел останется в работе, а во втором и в третьем будет в состоянии отказа в течение соответствующего времени. Поэтому элементы всех примыкающих к узлу ветвей, соответствующие условиям «б» и «в», должны вводиться в расчетную схему по надежности последовательно с этим узлом. Эти элементы должны входить во все пути, проходящие через этот узел.

Можно предложить следующий порядок расчета. По электрической схеме системы электроснабжения формируются все пути для данного потребителя. Пути следует дополнить элементами, которые приводят к отключению узла на время  $\bar{t}_{\text{в}}$  или  $\bar{t}_{\text{оп}}$ . Получаются минимальные пути, построенные по расчетной схеме по надежности. Следует отметить, что один и тот же элемент может входить в расчетную схему с вероятностью  $\lambda \bar{t}_{\text{в}}$  и  $\lambda \bar{t}_{\text{оп}}$  то параметр потока отказов. Более подробно познакомиться с методикой получения расчетных схем по надежности можно в [8].

При оценке показателей надежности в сложных схемах можно выделить два основных подхода с привлечением различных методов.

1. Определение вероятности различных состояний сложной системы и вероятности недоотпуска электроэнергии потребителям или полной потери питания отдельных потребителей. Решение этой задачи связано с анализом режимов работы отдельных элементов в сложной схеме, с нахождением вероятностных характеристик нагрузки в элементах, выделением наиболее загруженных элементов или групп в схеме. Оценка вероятности состояний схемы и показателей надежности при различных комбинациях включенных и отключенных элементов выполняется методом анализа вероятностей основных состояний. Причем состояниями с числом отказавших элементов более двух-трех, как правило, можно пренебречь. При этом необходимо учитывать также наложение аварийных отключений на преднамеренные отключения отдельных цепей.

Этот метод является основным при расчете показателей надежности, ограничения мощности и энергии у потребителей для систем со многими входами (источниками питания) и выходами (узлами нагрузки) и ограничениями по пропускной способности элементов в послеаварийных режимах. Однако недостатками метода являются громоздкость вычислений, необходимость анализа очень большого количества состояний схемы, трудность алгоритмизации при применении для расчетов ЭВМ. Так, например, если число расчетных элементов в сложной схеме  $n$ , то даже без учета наложения аварийных отключений на преднамеренные (пренебрегая вероятностью отказа более трех элементов) необходимо проанализировать и рассчитать режимы для состояний схемы

$$N = \frac{1}{6}(n^3 + 5n) \quad (6.24)$$

Особенностью этого метода является расчет показателей надежности с системных позиций.

2. Оценка показателей надежности последовательно относительно каждого узла нагрузки с помощью формулы полной вероятности или с представлением схем в виде структурных последовательно-параллельных (схема путей) или параллельно-последовательных (схема сечений). Наиболее пригодным для алгоритмизации является способ представления исходной сложной схемы в виде эквивалентных структурных. Причем, как отмечалось ранее, более простые алгоритмы расчета вероятностей отказовых и безотказовых состояний схемы относительно узлов нагрузки получаются при представлении схемы в виде эквивалентной параллельно-последовательной (схемы сечения), хотя алгоритмы получения самих сечений несколько сложнее, чем путей.

С увеличением числа элементов в сложной схеме количество шут и сечений относительно каждого узла растет очень быстро. В частности, учет отказов узловых пунктов сета резко увеличивает количество сечений, не увеличивая числа путей схемы относительно узлов. С увеличением числа поперечных связей также увеличивается число путей.

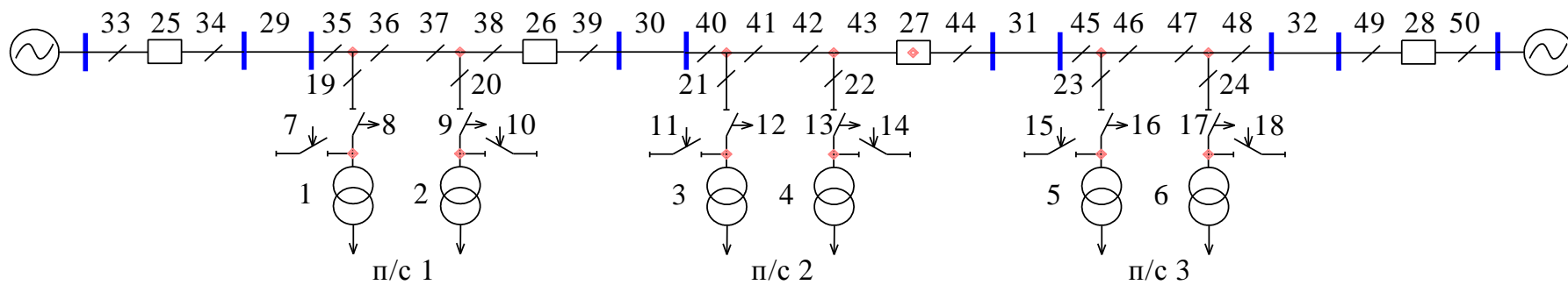
Основной особенностью расчета показателей надежности с использованием структурного анализа относительно узлов является ограниченность возможностей этих методов из-за сложности их реализации при ограничениях по пропускной способности отдельных элементов, т. е. сложность определения частичных ограничений мощности и энергии потребителей.

Реализация всех этих методов, так же как и метода анализа вероятности состояний схемы, сильно осложняется при увеличении числа расчетных элементов схемы. Поэтому одним из способов сокращения размерности задачи может быть разделение исходной сложной схемы на подсхемы по узловым пунктам сети (узловым подстанциям, системам сборных шин, пунктам трансформации энергии и т. д.). Расчет показателей надежности для первой схемы выполняется относительно пунктов разделения схемы со стороны источников питания. Для другой схемы пункты деления являются источниками питания и вводятся в расчетную по надежности схему расчетными элементами с характеристиками, полученными в расчетах первой подсхемы.

Разделение на подсхемы целесообразно выполнять таким образом, чтобы число расчетных элементов в каждой схеме не превышало 130-450. Далее, если пропускная способность элементов любой части схемы ограничена, показатели надежности относительно пунктов деления целесообразно определять с использованием методов структурного анализа. Расчет же подсхем выполняется в зависимости от конкретных условий: либо методом анализа вероятностей состояний, либо с использованием структурного представления схем.

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

### Схема №0



### Схема №1

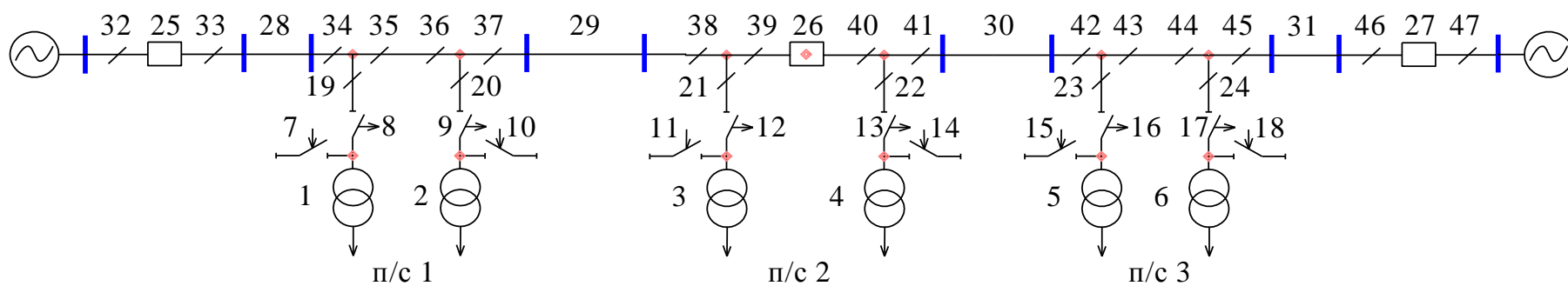


Схема № 2

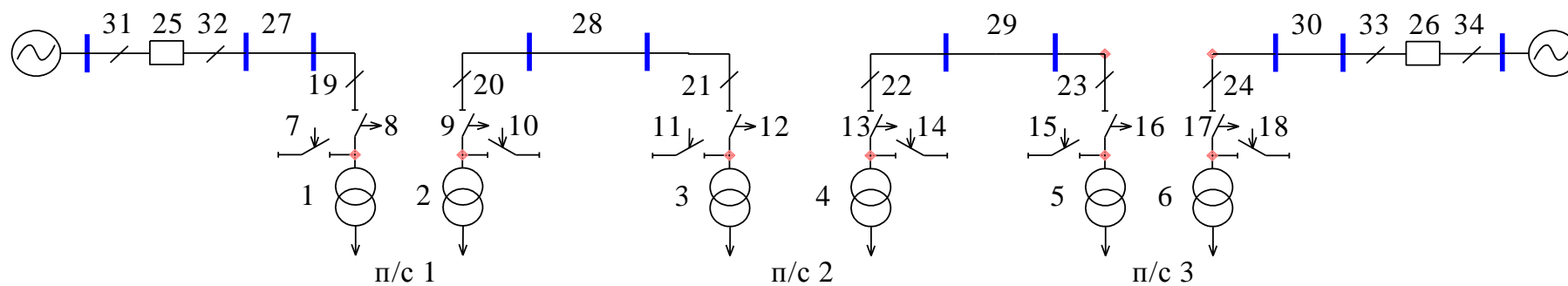


Схема № 3

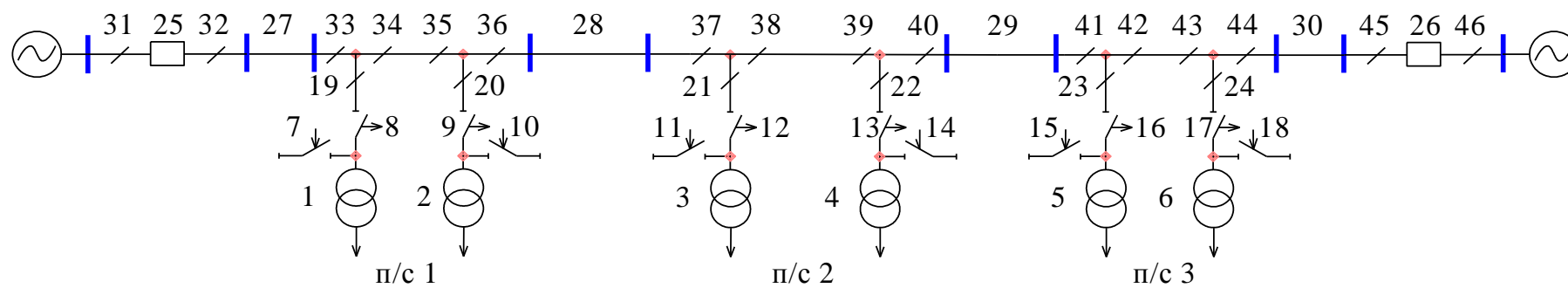


Схема № 4

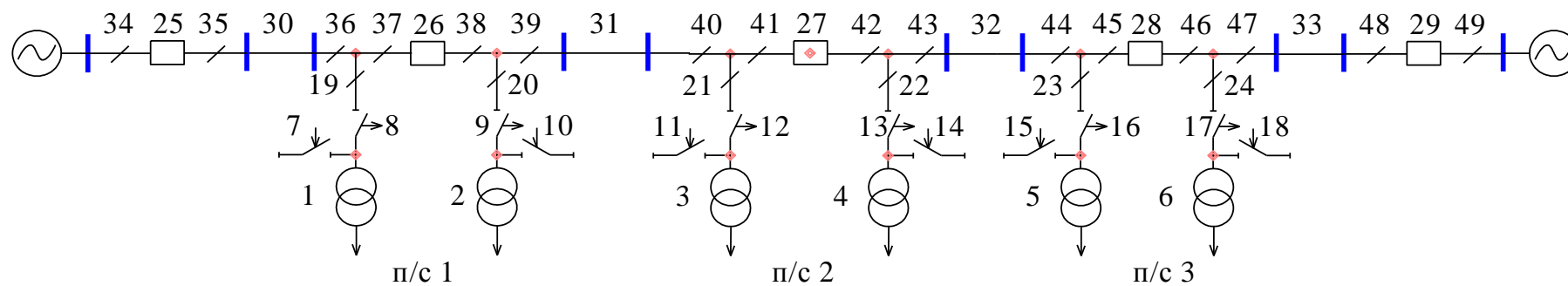


Схема 5

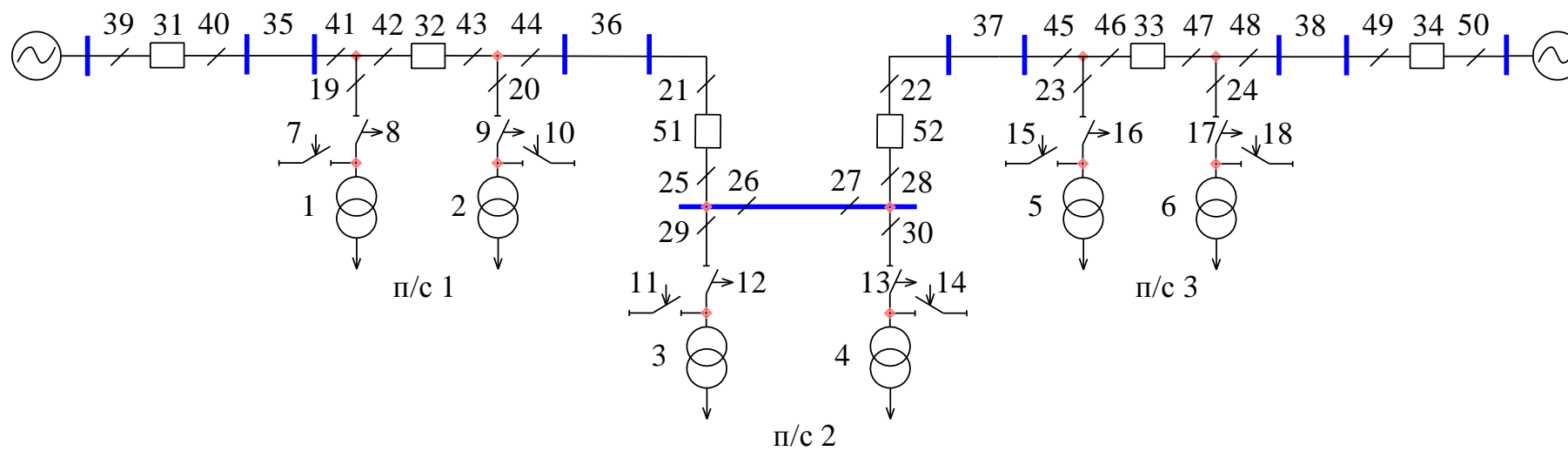




Схема 6

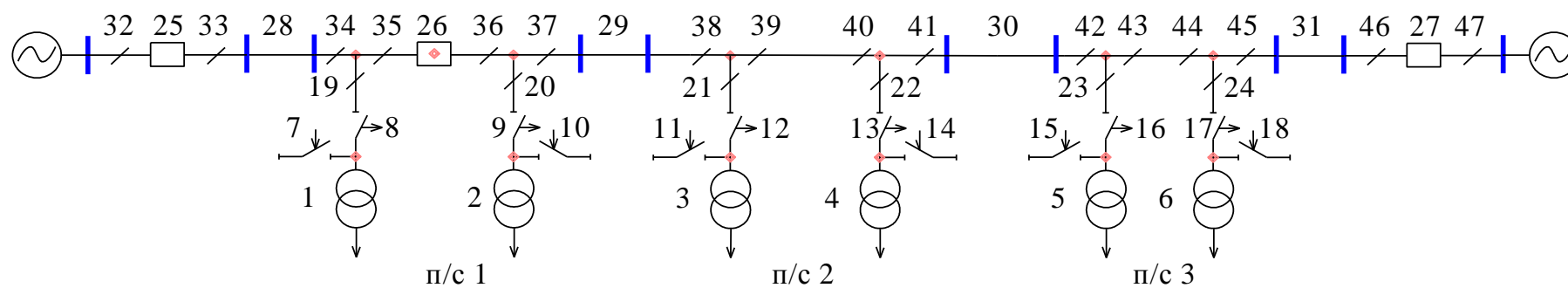
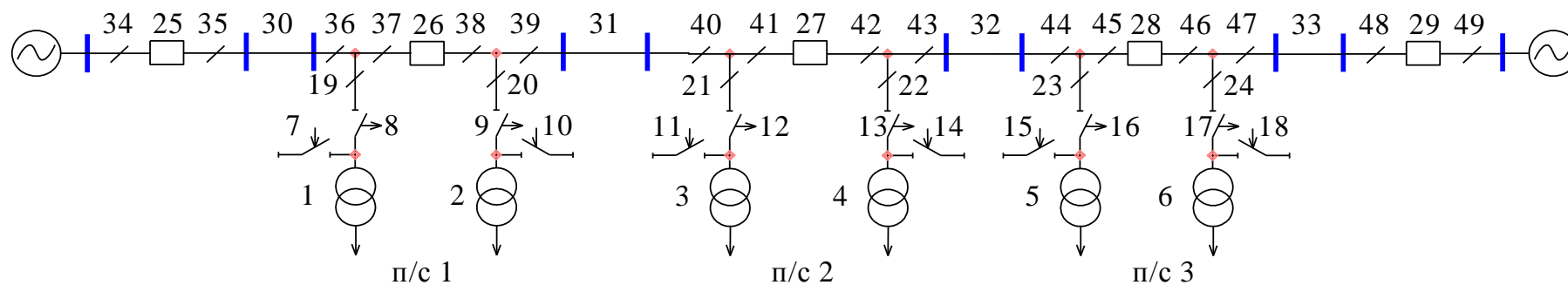
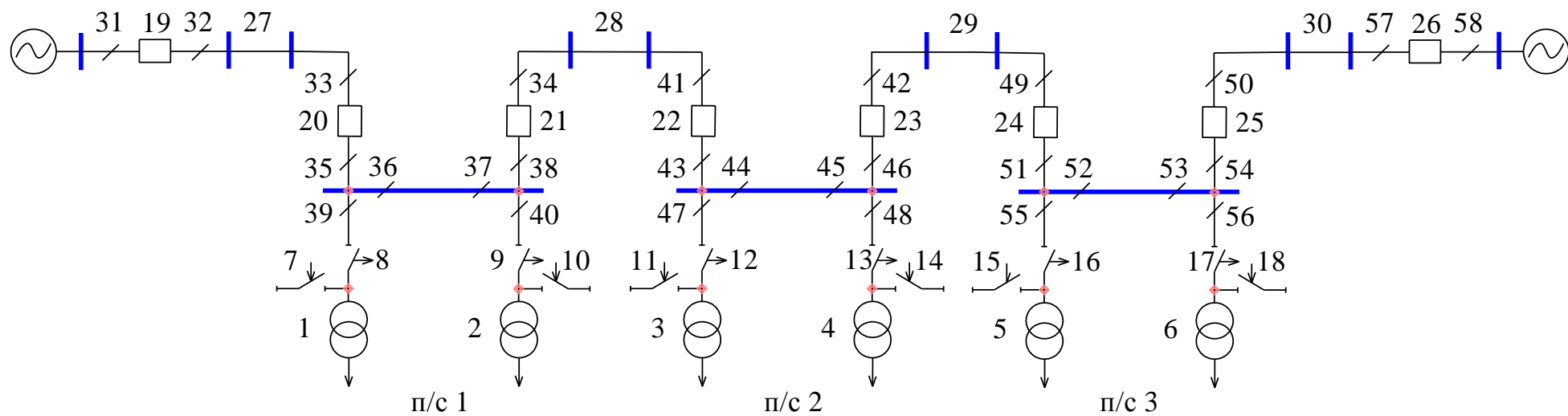


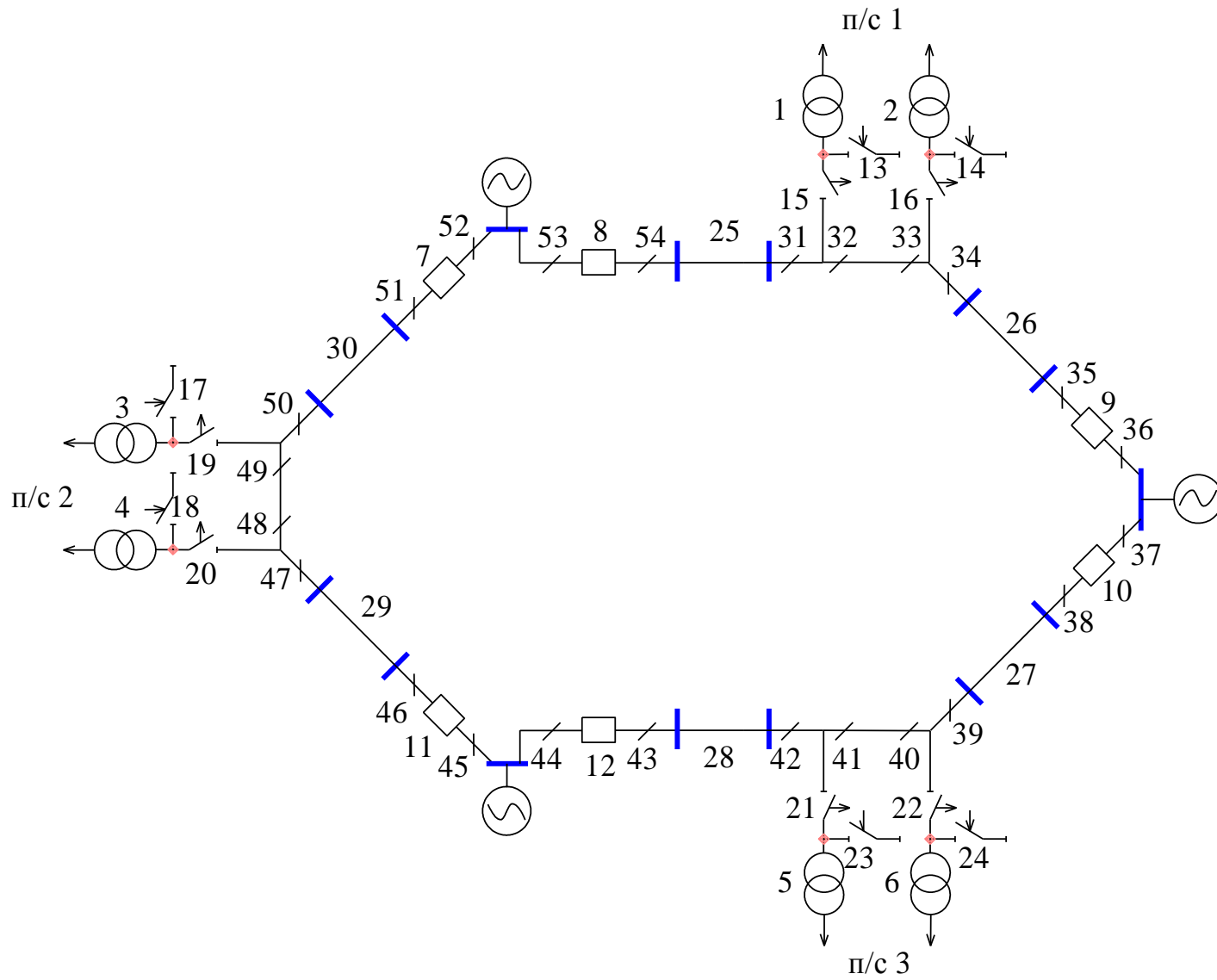
Схема 7



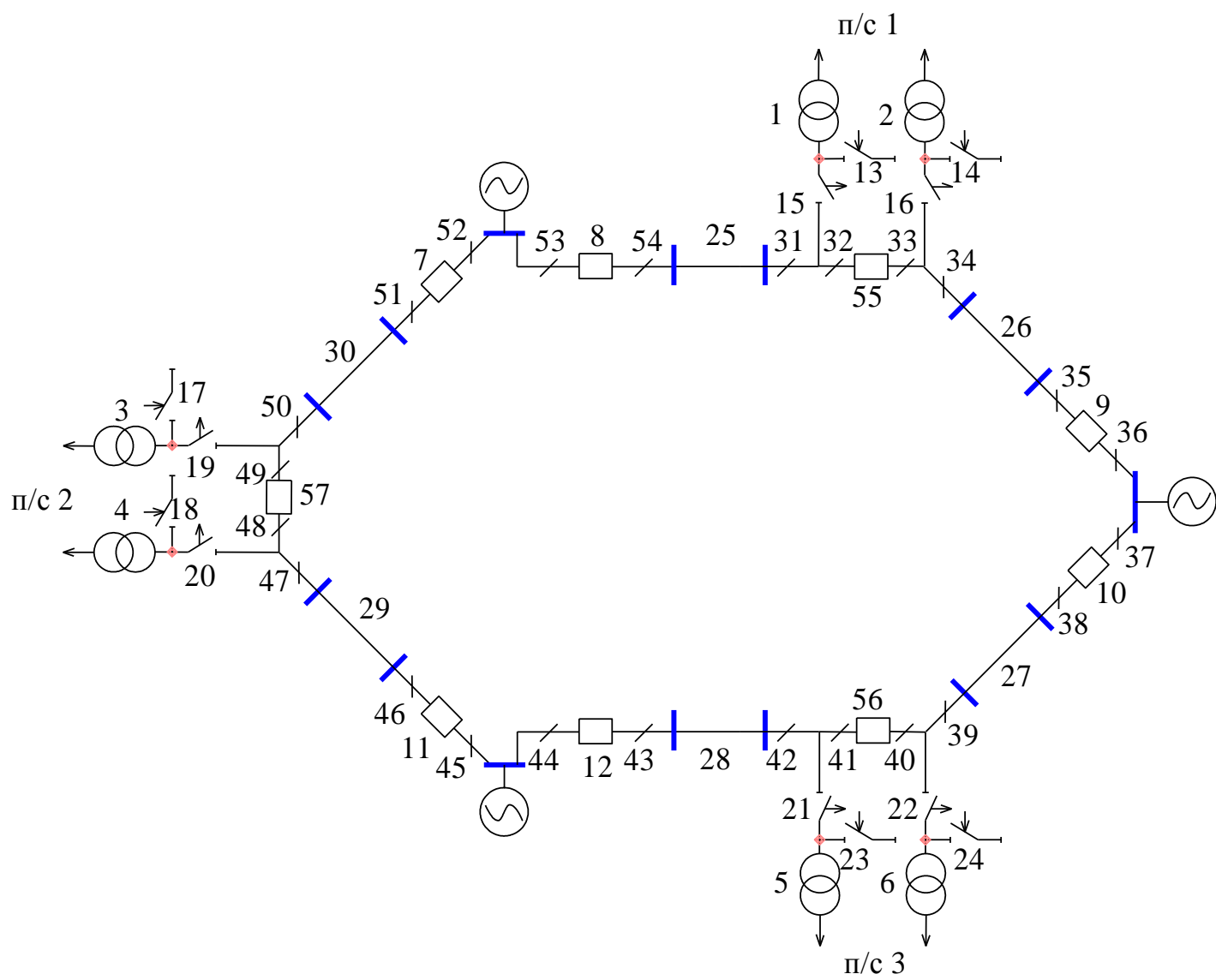
## Схема 8



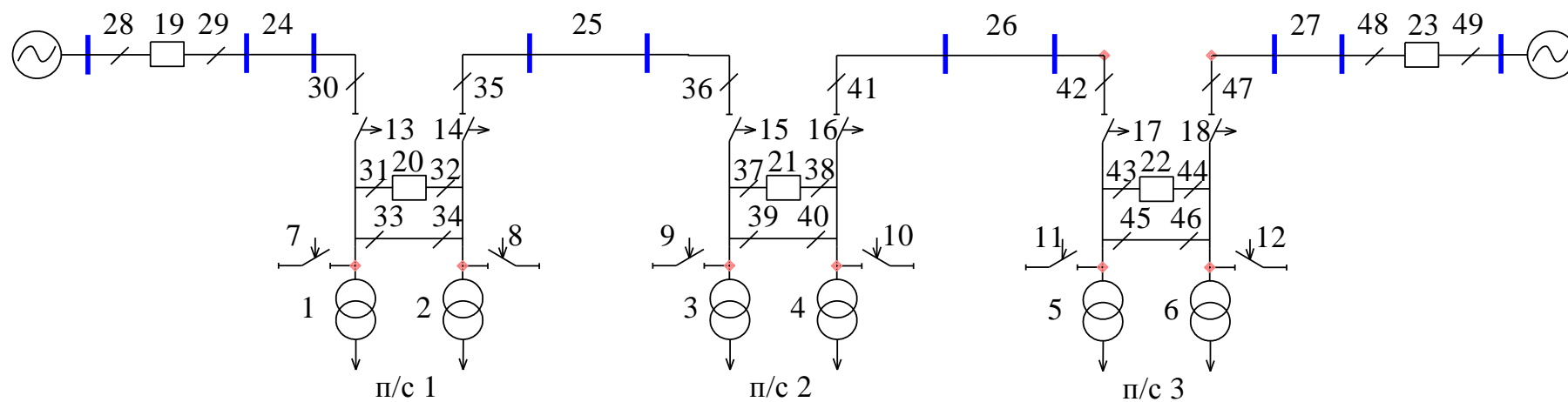
## Схема 9



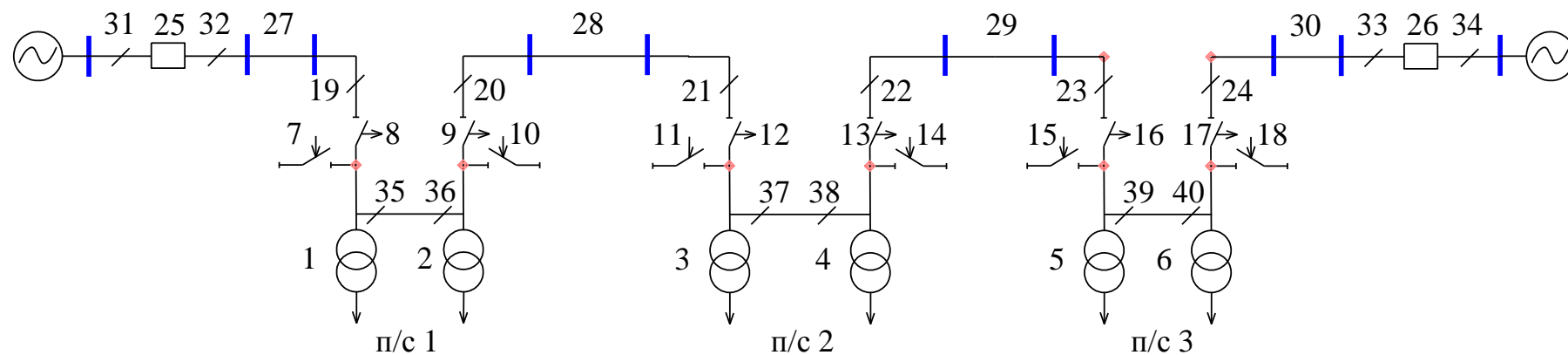
## Схема 10



## Схема 11



## Схема 12



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гуревич, Ю. Е.** Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Гуревич Ю.Е. М.: Изд-во «ЭЛЕКС-КМ», 2015.
2. **Папков, Б. В.** Надежность систем электроснабжения: учебное пособие / Б. В. Папков, Д. Ю. Пашали. Уфа.: изд-во УГАТУ – 2017, 192 с.
3. **Исмагилов, Ф. Р.** Электроэнергетика: термины и определения / Ф. Р. Исмагилов, И. З. Шахмаев, Д. Ю. Пашали, Т. Ю. Волкова и др. Уфа.: УГАТУ. – 2018, 200 с.
4. **ГОСТ 27.002-89.** Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Основные понятия термины и определения. М. Изд-во стандартов, 2002.
5. **ГОСТ 21027-75.** Системы энергетические. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1987.
6. **ГОСТ 19431-84.** Энергетика и электрификация термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1984.
7. **ГОСТ 13109-97.** Межгосударственный стандарт. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. Изд-во стандартов, 2002.
8. **Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.** М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.
9. **Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.** М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.
10. **Приказ № 721.0 «Положение о курсовом проектировании в ГОУ ВПО УГАТУ».** Введен в действие с 01.02.2017.
11. **СТО УГАТУ 016-2007.** Введен в действие приказом ректора от 24.12.2007. № 1 038-О.
12. **Гук, Ю. Б.** Расчет надежности схем электроснабжения / Ю. Б. Гук, М. М. Синенко, В. А. Тремясов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 216 с.
13. **Александровская, Л. Н.** Безопасность и надежность технических систем / Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов и др. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 376 с.

## Данные для расчёта надёжности электроснабжения потребителей [20]

Таблица А.1

## Единичные показатели надёжности ВЛ

Номинальное напряжение, кВ	Материал опор	Число цепей		Средняя частота устойчивых отказов	Среднее время восстановления	Средняя частота плановых остановов	Среднее время планового простоя
				$\omega$ , 1/100 км·год	$\bar{t}_B$ , ч	$\omega_{пл}$ , 1/год	$\bar{t}_{пл}$ , ч
110	Металлические	Одноцепные		1,3	9,0	2,1	15,0
		Двухцепные	Откл. 1 цепь	1,7	7,0	3,8	15,0
			Откл. 2 цепи	0,2	10,0	0,4	19,0
	Железобетонные	Одноцепные		0,7	11,0	1,6	16,0
		Двухцепные	Откл. 1 цепь	1,0	9,0	2,4	12,0
			Откл. 2 цепи	0,2	15,0	0,4	13,0
	Деревянные	Одноцепные		1,5	10,0	3,6	14,0
220	Металлические	Одноцепные		0,5	11,0	2,8	17,0
		Двухцепные	Откл. 1 цепь	0,6	11,0	3,3	14,0
			Откл. 2 цепи	0,1	15,0	0,5	24,0
	Железобетонные	Одноцепные		0,4	9,0	1,8	24,0
		Двухцепные	Откл. 1 цепь	0,5	9,0	1,1	17,0
			Откл. 2 цепи	0,1	8,0	0,3	10,0
	Деревянные	Одноцепные		0,6	11,0	5,4	18,0

Единичные показатели надежности трансформаторов

Номинальная мощность, МВА	Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов $\omega$ , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$ , ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{шт}^{тек}$ , 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{шт}^{кап}$ , 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч
2,5...7,5	110	0,018	40	0,25	28	0,166	250
10...80	110... 150	0,014	70	0,75	28	0,166	280
	220	0,035	60	0,75	28	0,166	300
Более 80	110... 150	0,075	95	1,0	30	0,166	300
	220	0,025	60	1,0	30	0,166	330



Единичные показатели надежности выключателей

Вид выключателей	Номинальное напряжение, кВ	Тип	Средняя частота отказов: числитель-короткое замыкание; знаменатель-разрыв цепи $\omega$ , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_B$ , ч	Вероятность отказа на коммутационную операцию $\alpha_{оп}$ , о.е.	Вероятность отказа при отключении короткого замыкания $\alpha_{кз}$ , о.е.	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{пл}^{кап}$ , 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{пл}^{тек}$ , 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
Маломаслянные	110...150		0,02/0,04	20	0,006	0,013	0,14	30	0,86	8
Масляные баковые	110		0,005/0,011	40	0,004	0,006	0,14	23	0,86	8
	220		0,015/0,040	50	0,011	0,009	0,14	43	0,86	8
Воздушные	110		0,003/0,017	20	0,004	0,004	0,2	45	0,8	12
	220	ВВБ	0,004/0,016	55	0,004	0,006	0,2	122	0,8	15
		Прочие	0,004/0,016	25	0,004	0,003	0,2	96	0,8	15

Единичные показатели надежности отделителей, короткозамыкателей и разъединителей

Аппарат	Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов, $\omega$ , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$ , ч	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{\text{III}}^{\text{кап}}$ , 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{\text{III}}^{\text{тек}}$ , 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
Разъединители	110	0,01	11	0,166	6	0,834	4
	220	0,01	7	0,166	13	0,834	6
Отделители	110	0,01	3,5	0,33	10	0,667	5
	220	0,01	3,5	0,33	16	0,667	6
Короткозамыкатели	110	0,01	6	0,33	6	0,667	5
	220	0,01	6	0,33	8	0,667	6

