

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Амурский государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой энергетики  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Мясоедов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

**НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**  
**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ**  
для специальности 140211.65 – «Электроснабжение»

Составитель: Н.В. Савина

Благовещенск

2012 г.

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
энергетического факультета  
Амурского государственного университета

Н.В. Савина

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Надежность электроснабжения» для студентов очной и заочной в сокращенные сроки форм обучения по специальности 140211.65 – «Электроснабжение». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2012, 175 с.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи профессорско-преподавательскому составу и студентам очной и заочной в сокращенные сроки форм обучения по дисциплине «Надежность электроснабжения» специальности 140211.65 – «Электроснабжение в формировании специальных знаний в области теоретических основ анализа надежности энергетических систем и их подсистем, методов расчета надежности и достижения заданного уровня надежности электроустановок и систем.

© Амурский государственный университет, 2012  
© Н.В. Савина

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа дисциплины.....	4
2. Краткий конспект лекций.....	4
3. Практические занятия.....	69
4. Самостоятельная работа студентов.....	110
5. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины.....	129
6. Методические указания по применению современных информационных технологий.....	129
7. Контроль качества образования.....	131
8. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава.....	152
9. Список использованных источников.....	152

# **I. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целями освоения дисциплины «Надежность электроснабжения» являются формирование систематизированных знаний о современной теории надежности в системах электроснабжения, методах расчета, анализа и оптимизации их надежности, обоснованное понимание роли надежности при разработке и эксплуатации систем электроснабжения, приобретение студентами навыков определения надежности систем электроснабжения, определения ущербов от перерывов электроснабжения и недоотпуска электроэнергии.

Эти знания позволят выпускникам успешно решать задачи в профессиональной деятельности, связанной с проектированием, обслуживанием и эксплуатацией систем электроснабжения.

Задачи дисциплины:

- Изучение теоретических основ анализа надежности систем электроснабжения и их подсистем, основных методов достижения заданного уровня надежности, экономических аспектов надежности систем электроснабжения.
- Освоение основных методов расчета структурной и функциональной надежности, проектирования элементов и подсистем систем электроснабжения с учетом современных требований по надежности и энергетической безопасности.
- Формирование системных и профессиональных навыков по решению проблемы надежности при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения и их компонентов.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО**

Дисциплина «Надежность электроснабжения» входит в цикл специальных дисциплин (СД.04) и относится к дисциплинам, формирующим специальные профессиональные знания и навыки, необходимые при выполнении дипломного проекта.

Требования к обязательному минимуму содержания ООП по направлению подготовки дипломированного специалиста «Электроэнергетика». Федеральный компонент СД.04. Надежность электроснабжения: задачи и исходные положения оценки надежности; факторы, нарушающие надежность системы и их математические описания: математические модели и количественные описания; математические модели и количественные расчеты надежности систем; технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения».

Дисциплина базируется на курсах цикла общих математических и общенаучных дисциплин (ЕН) «Математика» и «Математические задачи энергетики», читаемых в 1 – 5 семестрах, курсе «Электроэнергетика», входящем в цикл общепрофессиональных дисциплин (ОПД) и читаемом в 5 – 7 семестрах, курсах «Электропитающие системы и электрические сети», «Системы электроснабжения», «Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения», «Экономика энергетики», входящих в цикл специальных дисциплин (СД) и читаемых в 6 – 8 семестрах.

Студенты, обучающиеся по данной дисциплине, должны знать и владеть следующими материалами:

Математика – теория вероятностей и математическая статистика, матричная алгебра, математическая логика, уравнения Колмогорова, Марковские процессы;

Математические задачи энергетики – методы решения систем линейных и нелинейных уравнений в электроэнергетических задачах, применение теории

вероятностей и математической статистики к решению электроэнергетических задач, методы оптимизации;

Электроэнергетика – основные сведения о сетях и электроэнергетических системах (ЭЭС), расчет установившихся режимов;

Электропитающие системы и электрические сети – основные сведения о функционировании ЭЭС, схемы и конструкции распределительных устройств, основные сведения об электрических аппаратах;

Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения – основные сведения о видах защит, их принципах действия, о средствах автоматики в системах электроснабжения;

Экономика энергетики – экономические модели, применяемые в электроэнергетике, методы расчета экономических ущербов от нарушений в работе электроэнергетического оборудования, систем электроснабжения.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

#### **1) Знать:**

роль надежности в проектировании и эксплуатации систем электроснабжения и их подсистем;

факторы, нарушающие надежность системы электроснабжения и их математические описания;

показатели, критерии и характеристики электроэнергетических установок и систем; модели надежности электроустановок и систем;

современные методы расчета показателей надежности, применяемые в системах электроснабжения;

способы и средства повышения надежности и методы определения экономических ущербов от низкой надежности.

#### **2) Уметь:**

применять модели надежности электроустановок в зависимости от поставленной задачи;

составлять схемы замещения для расчета и анализа надежности;

определять количественные показатели надежности типовых схем распределительных устройств, средств релейной защиты, реальных энергообъектов и систем электроснабжения;

составлять деревья отказов, структурные схемы, графы возможных состояний для анализа надежности систем электроснабжения;

применять современные методы расчета для оценки надежности при проектировании и эксплуатации;

определять ущербы от перерывов в электроснабжении и ограничении мощности потребителей;

применять методы и средства повышения надежности в системах различной сложности;

оптимизировать технические решения по надежности в условиях неопределенности исходной информации.

#### **3) Владеть навыками:**

использования методов расчета показателей структурной и функциональной надежности объектов систем электроснабжения;

выбора оптимальных для рассматриваемой системы моделей и методов расчета и исследования надежности;

анализа структурной и функциональной надежности в эксплуатации;

оценки надежности действующих электроустановок и систем и определения ущербов от перерывов электроснабжения в случае их выхода из строя;  
 технико-экономической оценки недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения;  
 выбора видов резервирования и способов повышения надежности в рассматриваемой системе электроснабжения.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 94 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				ЛК	ПЗ	СРС	
1	Основные понятия и характеристики надежности электроснабжения	9	1,2	4	2	4	1 неделя – блиц-опрос на лекции; 2 неделя – опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания
2	Модели для анализа надежности элементов и систем электроснабжения	9	3-6	8	6	14	3, 5 недели - блиц-опрос на лекции; 4 неделя – контрольная работа 4, 6 недели - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания
3	Расчетные методы анализа надежности элементов и систем электроснабжения	9	7-12	12	16	16	7, 9, 11 недели – блиц-опрос на лекции; 8, 10, 12 недели - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания; 10 неделя – контрольная работа
4	Ущерб от ограничений мощности и перерывов в электроснабжении	9	13,14	4	4	4	13 неделя - блиц-опрос на лекции; 14 неделя - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания, защита РГР
5	Промежуточная аттестация	9					экзамен

Примечания:

ЛК – лекции, ПЗ – практические занятия, СРС – самостоятельная работа студентов, РГР – расчетно-графическая работа.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Лекции

Раздел 1. Основные понятия и характеристики надежности электроснабжения

Тема 1. Введение - 2 часа

Проблемы надежности при проектировании и эксплуатации электроэнергетических установок и систем электроснабжения. Энергетическая безопасность. Понятие "надежность" в электроэнергетике, основные определения. Общие критерии оценки надежности. Предмет и задачи дисциплины, ее роль в подготовке инженера электрика.

Тема 2. Основные понятия и характеристики надежности элементов и систем - 2 часа.

Относительность понятия "элемент" и "система" в расчетах надежности. Показатели надежности: единичные и комплексные. Задачи и исходные положения оценки надежности. Нормирование надежности. Причины повреждений основных элементов систем электроснабжения.

Раздел 2. Модели для анализа надежности элементов и систем электроснабжения

Тема 3. Математические модели для анализа надежности элементов, схем и систем - 8 часов

Основные сведения из теории вероятностей и математической статистики. Особенности случайных процессов, используемых при решении задач надежности в электроэнергетике. Факторы, нарушающие надежность системы и их математические описания: математические модели и количественные описания. Модели отказов элементов систем: внезапных и постепенных. Модели отказов установок. Резервирование релейно-контактных элементов. Процессы отказов и восстановлений одноэлементной схемы. Модель состояний Маркова, применение графов в качестве моделей. Составление структурных схем, графов возможных состояний. Модель нерезервированной схемы из  $n$  элементов (последовательное соединение элементов). Модель надежности установки, системы из резервируемых восстанавливаемых элементов (параллельное соединение элементов). Модель надежности системы с восстановлением и профилактикой (системы с последовательным соединением элементов, системы с резервированием элементов). Марковские модели восстановления и оценки готовности систем электроснабжения. Модель "Дерево событий".

Раздел 3. Расчетные методы анализа надежности элементов и систем электроснабжения

Тема 4. Современные методы расчета и анализа надежности систем электроснабжения и электроустановок - 6 часов.

Общая характеристика методов. Математические модели и количественные расчеты надежности систем. Метод путей и минимальных сечений. Структурный анализ и формальные приемы декомпозиции сложных схем. Аналитический метод расчета надежности систем электроснабжения. Вероятностные методы расчета надежности: таблично-аналитический, структурно-аналитический, структурно-вероятностный, таблично-логический, метод деревьев отказов, топологические методы расчета.

Тема 5. Решение задач анализа надежности при проектировании и эксплуатации электроустановок и систем электроснабжения - 6 часов.

Понятие о структурной надежности схем систем электроснабжения. Определение состояния полного отказа и безотказной работы схемы. Понятие о функциональной надежности. Оценка недоотпуска электроэнергии в системе с помощью модели состояния и режимов системы. Вероятности послеаварийных состояний сложных схем, расчет недоотпуска электроэнергии вследствие ограничения режимов в послеаварийных состояниях. Определение надежности различных схем электрических сетей. Расчеты надежности главных схем электрических соединений, схем РУ различных уровней напряжения электростанций и подстанций, систем электроснабжения. Расчет показателей надежности систем релейной защиты и автоматики. Выбор резерва. Ненагруженный

резерв. Надежность функционирования оперативных (диспетчерских) эргатических систем в электрических сетях.

Раздел 4. Ущерб от ограничений мощности и перерывов в электроснабжении

Тема 6. Оптимизация технических решений в электроэнергетике с учетом ущерба - 4 часа.

Технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения. Понятие ущерба от отказа. Виды и составляющие ущербов. Методы расчета ущербов от перерывов электроснабжения и недоотпуска электроэнергии. Задачи надежности в условиях эксплуатации субъектов энергетики. Экономико-математическая модель для оптимизации надежности. Критерии эффективности и целевые функции. Методы оптимизации. Средства и методы повышения надежности систем электроснабжения.

### 5.2. Практические занятия

Практические занятия проводятся с целью закрепления знаний, полученных при изучении теоретического курса и формировании приведенных выше навыков. Задачи, рассматриваемые на практических занятиях, подбираются в соответствии со спецификой специальности, при этом используются реальные схемы объектов и систем электроснабжения. На практических занятиях каждому студенту выдаются индивидуальные домашние задания.

Тематика практических занятий приведена в табл.

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
1.	Применение методов теории вероятностей для анализа надежности в простейших схемах	2
2-3.	Использование математических моделей для анализа надежности элементов, схем, систем	4
4-10.	Определение надежности сложных схем с помощью различных методов расчета	14
11-12.	Решение практических задач анализа надежности в системах электроснабжения	4
13-14.	Расчет недоотпуска электроэнергии и ущерба от перерывов электроснабжения	4

## 6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

№ п/п	№ раздела дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоёмкость в часах
1	1	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию с использованием обучающих тестов и компьютерных симуляций	1 3
2	2	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию с использованием обучающих тестов и компьютерных симуляций; подготовка к контрольной работе; выполнение РГР	3 6 1 4



№ п/п	№ раздела дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоёмкость в часах
3	3	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию с использованием обучающих тестов и компьютерных симуляций; подготовка к контрольной работе; выполнение РГР	3 6 1 6
4	4	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию; выполнение РГР и подготовка к ее защите	1 2 1

## 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации дисциплины «Надежность электроснабжения» используются традиционные и современные образовательные технологии. Из современных образовательных технологий применяются информационные и компьютерные технологии с привлечением к преподаванию мультимедийной техники и интерактивной доски, технологии активного обучения, проблемного обучения. Применяются следующие активные и интерактивные формы проведения занятий: проблемные ситуации, компьютерные симуляции, деловые игры, разбор конкретных ситуаций по нарушению или обеспечению надежности систем электроснабжения. В рамках дисциплины предусмотрены встречи с представителями энергетических компаний Дальнего Востока, мастер-классы специалистов по надежности.

Самостоятельная работа студентов подразумевает работу под руководством преподавателя: консультации и помощь при выполнении расчетно-графической работы или индивидуального домашнего задания, индивидуальную работу студента в компьютерном классе энергетического факультета или в библиотеке.

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Система оценочных средств и технологий для проведения текущего контроля успеваемости по дисциплине включает вопросы для блиц-опроса на лекциях, индивидуальные домашние задания, задания для контрольных работ, тесты, тематику расчетно-графических работ.

Тематика вопросов блиц-опроса на лекциях совпадает с тематикой лекций.

Темы индивидуальных домашних заданий:

определение показателей надежности с помощью методов теории вероятностей в простейших электрических схемах;

определение показателей надежности электроэнергетического оборудования и средств релейной защиты с помощью математических моделей отказа электроустановок;

модель отказа выключателя;

резервирование замещением и постоянное резервирование;

анализ схем электрических соединений для выявления расчетных совокупностей компонентов, определяющих надежность расчетного объекта;

анализ схем электрических соединений для выявления ремонтных групп, существенно изменяющих показатели надежности расчетного объекта;  
определение показателей надежности типовых схем распределительных устройств подстанций;  
применение аналитического метода расчета надежности;  
анализ надежности систем электроснабжения с помощью графов перехода из состояния в состояние;  
применение метода путей и минимальных сечений для оценки надежности систем электроснабжения;  
применение метода деревьев событий;  
определение недоотпуска электроэнергии и ущерба при частичных и полных перерывах в электроснабжении.

Темы контрольных работ:

раздел 2 - модели отказа электроустановок и их применение для анализа надежности элементов и систем электроснабжения;

раздел 3 - методы расчета и анализа надежности элементов и систем электроснабжения.

Тема РГР «Определение надежности систем электроснабжения промышленных предприятий и городов».

Система оценочных средств и технологий для проведения экзамена, включает контрольные вопросы и задания к экзамену.

#### Контрольные вопросы и задания к экзамену

##### Вопросы к экзамену

1. Характеристики и задачи оценки надежности.
2. Работоспособность и отказ.
3. Показатели надежности: единичные и комплексные.
4. Факторы, нарушающие надежность системы.
5. Внезапные и постепенные отказы.
6. Причины отказов элементов систем электроэнергетики
7. Модель внезапного отказа.
8. Модель постепенного отказа.
9. Анализ надежности системы из последовательно соединенных элементов по модели отказов электроустановок.
10. Анализ надежности системы из резервируемых элементов по модели отказов электроустановок.
11. Резервирование замещением.
12. Постоянное резервирование.
13. Резервирование релейно-контакторных схем.
14. Модели выключателей, применяемые при расчете надежности в электроэнергетике.
15. Расчет показателей надежности систем релейной защиты и автоматики.
16. Учет средств релейной защиты и автоматики при расчетах надежности.
17. Модель надежности системы из последовательно соединенных элементов.
18. Модель надежности схемы из параллельно соединенных элементов.
19. Анализ надежности системы из последовательно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений.
20. Анализ надежности системы из параллельно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений.
21. Аналитический метод расчета надежности систем электроснабжения.
22. Метод путей и минимальных сечений сложных схем.
23. Топологические методы расчета надежности.
24. Логико-вероятностный метод расчета надежности систем электроснабжения.

25. Таблично-аналитический метод расчета надежности.
26. Техничко-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения.
27. Определение ущербов от перерывов в электроснабжении потребителей.
28. Анализ надежности типовых схем РУ подстанций.
29. Анализ надежности типовых схем РУ станций.
30. Особенности определения надежности в ремонтных режимах.
31. Марковские случайные процессы в теории надежности.
32. Модель состояний Маркова, применение графов в качестве моделей.
33. Ненагруженный резерв.
34. Выбор резерва генерирующей мощности.
35. Экономико-математические модели для оптимизации надежности.
36. Средства и методы повышения надежности систем электроэнергетики.
37. Надежность функционирования оперативных (диспетчерских) эргатических систем в электрических сетях.
38. Задачи надежности в условиях эксплуатации субъектов энергетики.

Задания для экзамена по дисциплине сформированы в виде инженерных задач, включающих в себя расчет показателей надежности компонентов промышленных электрических станций, распределительных устройств подстанций, подстанций в целом, систем электроснабжения предприятий и городов для различных режимов работы.

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»**

а) основная литература:

1. Савина Н.В. Надежность систем электроэнергетики [электронный ресурс]: учеб. пособие/ Н.В. Савина – Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2011. – 268 с., 1898 Кб. Режим доступа: <http://rucont.ru>
2. Савина Н.В. Теория надежности в электроэнергетике : учеб. пособие/ Н.В. Савина; АмГУ, Эн.ф.. – Благовещенск: изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. – 214 с.
3. Острейковский В.А. Теория надежности : учеб. : рек. УМО/ В. А. Острейковский. -2-е изд., испр. . -М.: Высш. шк., 2008. -464 с.

б) дополнительная литература:

1. Китушин В. Г. Надежность энергетических систем : учеб. пособие/ В. Г. Китушин Ч. 1 : Теоретические основы. – Новосибирск: изд-во НГТУ – 2003. -255 с.
2. Кобылин В.П. Повышение эксплуатационной надежности электросетевого хозяйства на Севере : [моногр.]/ В. П. Кобылин ; отв. ред. Н. И. Воропай. -Новосибирск: Наука, 2006. -223 с.
3. Надежность либерализованных систем энергетики : [моногр.]/ В. А. Баринов [и др.] ; отв. ред. Н. И. Воропай, отв. ред. А. Д. Тевяшев. -Новосибирск: Наука, 2004. -334 с.
4. Надежность систем энергетики и их оборудования [Текст] : Справочник: В 4х т. / Ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2 : Надежность электроэнергетических систем : справочное издание, – М.: Энергоатомиздат - 2000. - 566 с.
5. Надежность электроснабжения : учеб.-метод. комплекс для спец. 140211/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина. -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -175 с.
6. Половко А.М. Основы теории надежности : учеб. пособие: рек. УМО/ А. М. Половко, С. В. Гуров. -2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -702 с.
7. Половко А.М. Основы теории надежности : практикум: рек. УМО/ А. М. Половко, С. В. Гуров. -СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -558 с.
8. Трубицын В.И. Надежность электростанций/ В.И. Трубицын – М.: Энергоатомиздат, 1997.– 240 с.

9. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем : учеб. пособие для вузов: доп. Мин. обр. РФ/ И.А. Ушаков. -М.: Дрофа, 2008. -240 с.
10. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем : Учеб. пособие: Рек Сиб. регион. отд-нием УМО по обр. в обл. энергетики и электротехники/ А.И. Шалин. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2003. -384 с.

в) периодические издания (журналы):

1. Электричество;
2. Известия РАН. Энергетика;
3. Электрические станции;
4. Энергетик;
5. Вестник МЭИ;
6. Промышленная энергетика;
7. Энергетика. Сводный том;
8. Вестник ИГЭУ;
9. Известия вузов. Электромеханика.
10. Энергохозяйство за рубежом;
11. IEEE Transaction on Power Systems;
12. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.iqlib.ru">http://www.iqlib.ru</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания
2	Консультант +	Справочно-правовая система. Содержит законодательную базу, нормативно-правовое обеспечение, статьи.
3	<a href="http://www.twirpx.com/files/tek/">http://www.twirpx.com/files/tek/</a>	Twirpx.com - это служба, обеспечивающая с помощью веб-интерфейса, расположенного только по адресу <a href="http://www.twirpx.com">http://www.twirpx.com</a> , и специализированного аппаратно-программного обеспечения хранение, накопление, передачу и обработку материалов Пользователей, представленной в электронном виде в публичный доступ. Интернет-библиотека, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания

На практических занятиях и в самостоятельной работе студентов используется система компьютерной математики Mathcad и программный комплекс VISIO, ПВК Modus.

## 10.МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

В качестве материально-технического обеспечения дисциплины используются мультимедийные средства, интерактивная доска. Материал лекций представлен в виде презентаций в Power Point. Для компьютерных симуляций используется ПВК Modus, электрические схемы энергетических компаний Дальнего Востока, промышленных предприятий, городов, однолинейные электрические схемы электрических станций и подстанций, расположенных на Дальнем Востоке.

## **11. РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Рейтинговая оценка деятельности студентов осуществляется в соответствии с технологической картой дисциплины о рейтинговой системе обучения, принятой на заседании кафедры энергетики.

Текущий контроль качества освоения отдельных тем и разделов дисциплины осуществляется на основе рейтинговой системы. Этот контроль проводится ежемесячно в течение семестра и качество усвоения материала (выполнения задания) оценивается в баллах, в соответствии с рейтингом по плану дисциплины.

Промежуточная аттестация (экзамен) проводится в конце семестра и оценивается по 5-ти балльной системе. Допуск к экзамену осуществляется по итоговому рейтингу текущего контроля, который определяется суммированием баллов по всем видам текущего контроля и включает расчетно-графическую работу. Максимальный балл составляет 100, в том числе: РГР – 60, индивидуальные домашние задания – 30, другие виды текущего контроля – 10 баллов. Допуск к экзамену соответствует 56...100 баллам.

## **II. КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

### **2.1. Методические указания по проведению лекций**

Лекционный курс по дисциплине «Надежность электроснабжения» направлен на формирование у студентов теоретических знаний и физических основ анализа надежности сложных схем энергетических систем, электрических станций, электрических сетей, систем электроснабжения, устройств релейной защиты и автоматики; определения ущербов и недоотпусков электроэнергии при перерывах в электроснабжении; умений и навыков в самостоятельных практических расчетах показателей надежности в реальных энергосистемах и их подсистемах. Базовым учебником при изучении данной дисциплины является авторский курс лекций, изложенный в [1].

Целью данного раздела является оказание методической помощи в оптимальном распределении теоретического материала между аудиторными занятиями и самостоятельным изучением студентами, по лекциям, а также его систематизация.

Лекции целесообразно строить таким образом, чтобы в них оптимально сочетались классическая и современные педагогические технологии. При этом целесообразно делать акцент на применение методов активного обучения, информационных технологий с привлечением к преподаванию мультимедийной техники. Методическое построение лекции должно быть направлено на помощь студенту в максимальном усвоении излагаемого материала и умения его применять при решении инженерных задач по оценке и повышению надежности реальных объектов в энергетике. При чтении лекций необходимо задействовать все виды памяти студентов: зрительную (использование презентаций лекций), слуховую, моторную (конспектирование наиболее важных моментов лекции).

При изложении лекционного материала необходимо опираться на примеры из эксплуатационной практики, выделять проблемы в области надежности электроснабжения и синтез электроэнергетических систем, систем электроснабжения, электрических станций по заданному или оптимальному уровню надежности.

На каждой лекции должна ставиться задача, и преподаватель, привлекает к этому творческому процессу студентов таким образом, чтобы развивать эвристические способности студентов и психологически настраивать их на решение нетривиальных задач.

В ходе лекции необходимо, опираясь на физическую сущность рассматриваемой задачи по изучению надежности в электроэнергетике, привести основные теоретические

выкладки, методы анализа и синтеза надежности и на их основе последовательность действий в оценке показателей надежности и реализации технических и схемных решений, направленных на обеспечение требуемого уровня надежности. Такой подход позволит не только ознакомить студентов с современно теорией надежности и научить их практическому применению этих знаний в условиях будущей трудовой деятельности. Желательно теоретические основы надежности интерпретировать примерами по реальным электроэнергетическим системам. При этом вначале обрабатывается возможность оценки надежности на типовых электрических схемах подстанций и РУ электрических станций.

Целесообразно использовать следующую структуру построения лекции:

- тема лекции;
- цель и задачи, решаемые на лекции;
- план лекции;
- фронтальный блиц-опрос студентов по пройденному материалу;
- вступление;
- изложение основного теоретического материала;
- закрепление нового материала;
- выводы;
- вопросы и разделы, выносимые на самостоятельную проработку.

При озвучивании вопросов, выносимых на самостоятельную проработку, целесообразно указать 2-3 основных учебника, где изложен лучше всего этот материал и предложить студентам поиск дополнительной литературы, указать сроки контроля и дать краткие методические указания по изучению данных разделов.

Фронтальный опрос студентов на ряде лекции можно заметить заменить небольшой самостоятельной работой и провести ее в конце лекции.

Для заинтересованности студентов систематическим изучением дисциплины желательно использовать модульно-рейтинговую систему оценки знаний.

## 2.2. Краткий конспект лекций

### Лекция 1.

#### *Введение.*

*Цель лекции:* показать актуальность проблемы надежности в электроэнергетике, привести основные понятия и определения.

#### *План лекции.*

1. Актуальность проблемы надежности в электроэнергетике.
2. основные понятия и определения.
3. Глубина аварии.
4. Типы схем по степени резервирования.
5. Относительность понятий элемент и система при оценке надежности.

#### *Краткое содержание лекции.*

Под надежностью любого технического объекта, в том числе и ЭЭС, понимается свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования; применительно к ЭЭС – бесперебойное снабжение электрической энергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

Понятие надежности тесно связано с понятиями работоспособности и отказа.

*Работоспособность* – состояние объекта, при котором он способен выполнять все или часть заданных функций в полном объеме или частично. Состояние называется полностью работоспособным, если все заданные функции выполняются полностью. Если ни одна из функций не выполняется, то имеет место неработоспособное состояние. Во всех других случаях объект частично работоспособен.

Случайное событие, заключающееся в переходе от полностью работоспособного к частично или неработоспособному состоянию, представляет собой отказ работоспособности.

*Отказом* называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности, т.е. в переходе объекта с одного уровня работоспособности или функционирования на другой, более низкий, или в полностью неработоспособное состояние. Понятие отказа – одно из основных в теории надежности.

Отказы классифицируются по ряду признаков:

- по степени нарушения работоспособности – полные и частичные;
- по связи с отказами других объектов – независимые и зависимые;
- по характеру процессов проявления – внезапные и постепенные;
- по времени существования – устойчивые и неустойчивые.

*Авария* – событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности (функционирования) на другой, существенно более низкий, с крупным нарушением режима работы объекта. Авария в ЭЭС – это массовое нарушение питания потребителей с созданием условий, опасных для людей и окружающей среды.

*Восстановление* – событие, заключающееся в повышении уровня работоспособности объекта (функционирования), которое достигается проведением ремонтов, отключений или изменением режима работы.

*Надежность* – это комплексное свойство, которое включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность, устойчивоспособность, сохраняемость, управляемость, живучесть и безопасность. Рассмотрим эти составляющие надежности или ее аспекты.

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

*Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние определяется невозможностью дальнейшей эксплуатации, снижением эффективности или требованиями безопасности.

*Ремонтпригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособлении к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий проведением технического обслуживания и ремонтов.

*Устойчивоспособность* – свойство системы непрерывно сохранять устойчивость в течение заданного времени. Устойчивость – способность системы переходить от одного устойчивого режима к другому при различных возмущениях.

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

*Управляемость* – свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления. Для ЭЭС различают режимную управляемость – свойство системы обеспечивать включение, отключение и изменение режима работы элементов по заданному алгоритму.

*Живучесть* – свойство системы противостоять возмущениям режима, не допуская их каскадного или цепочечного развития с массовым нарушением питания потребителей.

*Безотказность* – свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

Уровень расстройств функционирования установок энергосистем при авариях и нарушениях в работе называют *глубиной*. На электростанциях *глубина аварии* характеризуется уровнем снижения располагаемой мощности и выработки электрической энергии, на подстанциях – количеством отключенных потребителей и недоотпусков электроэнергии, на ЛЭП – числом отключенных цепей и уровнем снижения пропускной

способности, в электрических сетях – объемом погашений потребительских и районных подстанций, в системах электроснабжения – уровнем аварийных ограничений потребителей, в ЭЭС и объединениях – уровнем дефицита мощности и энергии и уровнем снижения частоты.

В зависимости от степени резервирования различают три типа схем: не резервируемая, частично резервируемая и взаимно резервируемая.

Не резервируемая схема участка сети или системы электроснабжения – это такая схема, в которой выход из строя одного элемента ведет к выходу из строя всей схемы.

Частично резервируемая – это такая схема, в которой выход из строя одного элемента или нескольких одной цепочки (секции или системы шин) ведет к ограничению мощности у потребителей и частичному перерыву в электроснабжении, но не полному погашению схемы.

Резервируемая – это такая схема, в которой выход из строя одного или нескольких элементов одной цепочки (секции или системы шин) не приводит к перерыву в электроснабжении и ограничению мощности.

Понятие «элемент» и «система» относительно в расчетах надежности. Объект, считающийся системой в одной задаче, например, силовой трансформатор, состоящий из элементов: обмотки, изоляции, бака, вводов и т.д., в другой задаче рассматривается как единый элемент, например оценка надежности подстанции или станции.

Деление системы на элементы зависит от характера задачи (схемный анализ, оперативные управления, конструктивное исполнение...), от точности расчета, наличия статистического материала, масштабности объекта в целом.

Базируясь на относительности понятий «элемент» и «система» применяются поэтапные методы расчета надежности, заключающиеся в том, что на каждом последующем этапе расчетные элементы системы представляются сами системой, с последовательным уточнением показателей надежности.

Материал, выносимый на самостоятельную проработку: критерии надежности и их определение; документация по надежности; сравнительный анализ состояния надежности в электроэнергетике разных стран.

#### *Выводы.*

1. Раскрыта сущность проблемы надежности в электроэнергетике.
2. Дана характеристика надежности энергосистем разных стран.
3. Введены основные определения в теории надежности.
4. Дана характеристика схем по степени резервирования.
5. Показана относительность понятия элемент и система.

#### *Лекция 2.*

Основные понятия и характеристики надежности элементов и систем.

*Цель лекции:* раскрыть сущность единичных и комплексных показателей надежности.

#### *План лекции.*

1. Показатели безопасности.
2. Показатели восстанавливаемости.
3. Поток отказов.
4. Комплексные показатели надежности.

#### *Краткое содержание лекции.*

Показателем надежности называется количественная характеристика одного или нескольких свойств, определяющих надежность объекта. Их подразделяют на единичные, характеризующие одно свойство и комплексные, характеризующие несколько свойств. Единичные показатели в основном применяются для характеристики отдельных



элементов, а комплексные – для узлов нагрузки и системы в целом.

Показатели безотказности

Вероятность безотказной работы  $p(t)$  – вероятность того, что в пределах заданной наработки,  $t$ , отказа не произойдет при заданных условиях работы

$$p(t) = P(T \geq t), \text{ - функция надежности.}$$

Здесь  $T$  – время безотказной работы.

На практике часто более удобной характеристикой является *вероятность отказа*  $q(t)$ , которая определяется как противоположное событие, т.е. это вероятность того, что в пределах заданной наработки произойдет хотя бы один отказ

$$q(t) = 1 - p(t); q(t) = F(t) = P(T < t) \text{ - функция ненадежности.}$$

$$\text{Очевидно, что } p(t) + q(t) = 1.$$

Вероятность отказа определяется также как функция распределения случайной величины наработки до отказа (или на отказ).

*Частота отказов*  $a(t)$  - дифференциальная функция распределения или плотность распределения вероятностей, то есть времени работы элемента до отказа – отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу испытываемых элементов.

Вероятностное определение  $a(t)$ :

$$a(t) = q'(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}.$$

*Интенсивность отказов*  $\lambda(t)$  – скорость изменения вероятности безотказной работы или условная вероятность того, что в промежуток времени  $\Delta t$  произойдет отказ, при условии, что до этого он не произошел:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q_2(t) - q_1(t)}{\Delta t \cdot p(t)} = \frac{dq(t)}{dt \cdot p(t)} = \frac{q'(t)}{p(t)} = -\frac{p'(t)}{p(t)}.$$

Изменение интенсивности отказа во времени показано на рис.3.

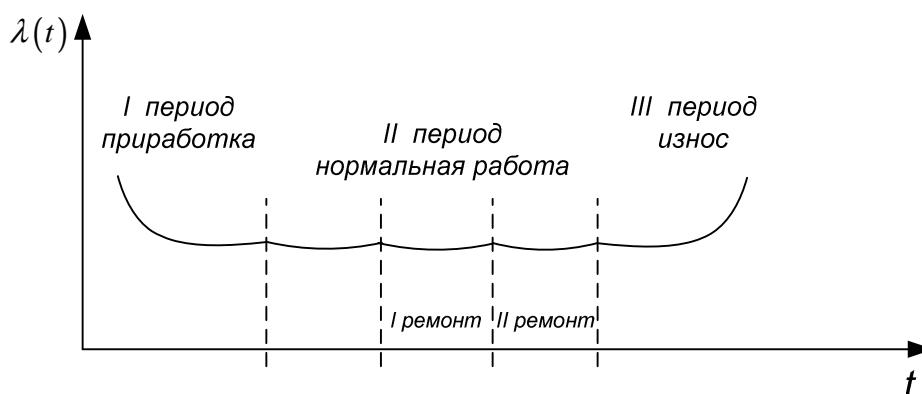


Рис. Типичная кривая изменения интенсивности отказов во времени

Из кривой зависимости интенсивности отказов от времени видно, что весь период работы элемента условно делится на три части: приработка, нормальная работа, износ.

*Время безотказной работы* – случайная величина, которая характеризуется математическим ожиданием  $\bar{T}$  или средним временем безотказной работы и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_t$ .

Расчетным временем безотказной работы пользуются при сравнении безотказности работы объектов электроэнергетических систем, в особенности, если законы распределения времени безотказной работы различны. Например, для экспоненциального закона распределения:

$$\alpha(t) = \lambda e^{-\lambda(t)}; \bar{T} = \frac{1}{\lambda}; D(t) = \bar{T}^2; \sigma_T = \bar{T};$$

$$T_{p.б.} = -\ln(1 - \alpha)\bar{T}.$$

$$\text{Так, для } \alpha = 0,1 \quad T_{p.б.} = 0,105\bar{T} = 0,105\frac{1}{\lambda}.$$

*Наработка на отказ* – среднее время между соседними отказами при условии восстановления отказавшего элемента

Показатели восстанавливаемости определяются только для объектов, подлежащих ремонту.

*Вероятность восстановления объекта*  $q_B(t)$  – это вероятность того, что за заданное время  $t$  объект будет восстановлен или вероятность того, что время восстановления объекта будет меньше некоторого наперед заданного времени  $t$ , т.е. это интегральная функция распределения случайной величины времени восстановления.

*Вероятность невосстановления объекта*  $p_B(t)$  – вероятность того, что за заданное время  $t$  объект не будет восстановлен:

*Частота восстановления*  $a_B(t)$  – дифференциальный закон времени восстановления или отношение числа восстановленных объектов в единицу времени к первоначальному числу восстанавливаемых объектов:

*Интенсивность восстановления*  $\mu_B(t)$  – скорость изменения вероятности восстановления объекта – вводится для характеристики процесса восстановления.

Расчетное время восстановления с заданной вероятностью

$$T_{B.P.} = \bar{t}_B + \beta_\alpha \sigma_{t_B}.$$

*Поток отказов* – это последовательность отказов, происходящих один за другим в случайные моменты времени.

Вид потока отказов определяет свойства системы, критерии надежности, вид аналитических зависимостей между количественными характеристиками надежности, а также методы расчета и испытаний системы. Поэтому изучение потоков отказов имеет большое значение в теории надежности.

Наиболее важными характеристиками потока отказов являются интенсивность и параметр потока отказов.

*Интенсивность потока отказов*  $\mu$  – это математическое ожидание числа отказов в единицу времени.

*Параметр потока отказов*  $\omega(t)$  – среднее количество отказов в единицу времени к одному элементу или предел отношения вероятности появления хотя бы одного отказа за промежуток времени  $\Delta t$  к данному промежутку времени при  $\Delta t \rightarrow 0$ , т.е. при его неограниченном уменьшении, или плотность вероятности возникновения отказов за рассматриваемый период:

Различают следующие виды потоков отказов: простейший, поток с последствием, нестационарный, пуассоновский поток, поток Пальма.

#### Комплексные показатели надежности

Рассмотренные характеристики не позволяют установить соотношения между временными составляющими цикла эксплуатации, в частности не учитывают время на профилактику и ремонт, готовность объекта к действию в данный момент времени, стоимость и удобства эксплуатации и т.д. Поэтому вводят комплексные показатели

надежности. Это – коэффициент готовности, коэффициент вынужденного простоя, коэффициент технического использования, коэффициент оперативной готовности, средний недоотпуск электроэнергии, средний ущерб на один отказ и удельный ущерб.

*Коэффициент готовности*  $K_G(t)$  - вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени  $t$  (вероятностное определение) или же – отношение времени безотказной работы к сумме времени работы и восстановления изделия, взятыми за один и тот же календарный срок.

$$K_G = \frac{t_p}{t_p + t_B},$$

где  $t_p$  - время безотказной работы;

$t_B$  - время восстановления.

*Коэффициент вынужденного простоя*  $K_{II}$ , вероятность того, что в произвольный момент времени  $t$  объект будет в неработоспособном состоянии или это отношение времени восстановления к сумме времени восстановления и времени безотказной работы, взятых за один и тот же период времени.

$$K_{II} = 1 - K_G(t).$$

Его установившееся значение равно

$$K_{II} = \frac{\bar{t}_B}{\bar{T} + \bar{t}_B},$$

*Коэффициент оперативной готовности*  $K_{O.G.}$  - вероятность того, что объект проработает безотказно на интервале  $(t, t + \tau)$  или вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени

$$K_{O.G.} = K_G e^{-\lambda \tau} = K_G e^{-\omega \tau}.$$

*Коэффициент технического использования*  $K_{T.И.}$  - отношение математического ожидания времени пребывания объекта в рабочем состоянии  $\bar{T}_p$  к суммарному времени эксплуатации  $T_{\Sigma}$  за календарный период  $T_K$ ,  $T_K \geq T_{\Sigma}$

$$K_{T.И.} = \frac{\bar{T}_p}{T_{\Sigma}}.$$

*Средний недоотпуск электроэнергии*  $\Delta \bar{W}$  - математическое ожидание количества электроэнергии, недоотпущенной потребителям за заданный период времени:

В расчетах недоотпуска электроэнергии случайные величины  $t_{деф}$  и  $P_{деф}$  часто принимают статистически независимыми, поэтому:

$$\Delta \bar{W} = \int_0^{\infty} t_{деф} f(t_{деф}) dt_{деф} \int_0^{\infty} P_{деф} f(P_{деф}) dP_{деф} = \bar{t}_{деф} \bar{P}_{деф}.$$

Материал, выносимый на самостоятельную проработку: свойства простейшего потока отказа; анализ причин отказов элементов систем.

#### Выводы.

1. Рассмотрены единичные показатели надежности и показано их вероятностное и статистическое определение.

2. Дана характеристика процесса многократных отказов и восстановлений – потока отказов, их классификация и область применения.
3. Раскрыта сущность комплексных показателей и надежности и даны основные формулы для их определения.

### Лекция 3.

Формирование моделей отказов элементов.

*Цель лекции:* показать принципиальное отличие в формировании моделей внезапных и постепенных отказов, изучить законы распределения сроков службы изоляции элементов электроэнергетических систем.

*План лекции.*

1. Внезапные и постепенные отказы.
2. Формирование модели внезапных отказов элементов.
3. Формирование модели постепенных отказов элементов.
4. Законы распределения сроков службы изоляции электроустановок.

*Краткое содержание лекции.*

Внезапные отказы – отказы, возникающие вследствие внешних случайных воздействий в случайные моменты времени, которые нельзя предсказать заранее. Они не связаны с внутренним состоянием элемента или оборудования.

Постепенные отказы – отказы, возникающие в результате постепенного изменения внутреннего состояния элемента или оборудования в случайные моменты времени.

Каждый из типов отказов характеризуется собственной математической моделью явления, и, следовательно, своим подходом к получению количественных характеристик. В качестве одной из основных характеристик отказов является функция распределения времени безотказной работы, по которой могут быть получены все остальные характеристики надежности, связанные с отказами. При формировании моделей отказов рассматриваются периоды нормальной работы и интенсивного износа (старения).

Формирование модели внезапных отказов элемента или оборудования

У большинства элементов имеется длительный период, на котором интенсивность отказов практически постоянна – период нормальной эксплуатации. В этом случае оборудование выводится в ремонт раньше, чем начнется заметное старение его элементов. В данном случае  $\lambda(t) = \lambda = const$ .

Разделим период рассматриваемого времени  $(0; t)$  на интервалы  $\Delta t_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , и обозначим вероятность того, что превышение максимальной прочности произойдет на  $i$  интервале,  $\alpha_i$ . Очевидно, что при первом таком превышении произойдет отказ оборудования. Т.к. максимальная прочность элемента постоянна, а случайные пиковые воздействия независимы, то случайные события появления пиковой нагрузки на каждом интервале времени также независимы (вспомним поток простейших событий). Событие появления пиковой нагрузки на любом интервале времени -  $A_i$ , не появления -  $B_i$  - события противоположные. Тогда по теореме умножения для независимых событий вероятность появления хотя бы одного превышения максимальной прочности будет равна:

$$p_{A_k} = p(B_1)p(B_2)p(B_{k-1})p(A_k) = \alpha_k \prod_{i=1}^{k-1} (1 - \alpha_i).$$

Т.к. условия эксплуатации конкретного оборудования неизменны, то  $\alpha_i = \alpha_j = \alpha_k = \alpha$ , тогда вероятность того, что время безотказной работы равно  $(k-1)$  интервалов, будет:

$$p(T = k - 1) = (1 - \alpha)^{k-1} \alpha,$$

где  $\alpha$  – вероятность превышения максимальной прочности, приводящей к отказу.

Переходя к интервальной функции распределения времени безотказной работы, получим интегральную функцию распределения времени безотказной работы.

При непрерывном аргументе времени, т.е. вероятность отказа:

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – параметр распределения – среднее число отказов в единицу времени, т.е. интенсивность отказов.

Тогда вероятность безотказной работы будет:

$$p(t) = 1 - q(t) = e^{-\lambda t}.$$

Частота отказов:

$$a(t) = f(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{p(t)} = \frac{a(t)}{1 - \int_0^t a(t) dt} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt} = \lambda.$$

Таким образом, в системах со своевременными капитальными и профилактическими ремонтами, заменой износившихся частей, когда другие виды отказов составляют незначительную долю, в качестве основного распределения времени безотказной работы принимается экспоненциальное распределение, т.е. модель внезапных отказов оборудования описывается экспоненциальным законом. Основной причиной постепенных отказов является старение материалов и износ отдельных частей элементов. Они возникают вследствие теплового, вибрационного старения изоляции трансформаторов, генераторов, кабельных линий, коррозии металлических частей проводов, опор, оболочек кабелей, износа дугогасительных камер коммутационных аппаратов при отключении токов к.з., вследствие деформации материалов и диффузии одного материала в другой.

По мере эксплуатации электротехнических изделий в изоляции происходят сложные физико-химические процессы старения. Изоляция становится хрупкой, ломкой, появляются трещины, в результате чего уменьшается ее электрическая прочность и при случайном превышении напряжения сверх допустимого происходит отказ. Аналогичные ситуации происходят при коррозии и окислении металлических частей элементов и при воздействии механических нагрузок (постепенное снижение прочности и в случае превышения запаса прочности – отказ).

Таким образом, постепенный износ отдельных частей элемента представляет собой как бы накопление элементарных повреждений в различных его частях и снижение общего предела прочности. После накопления определенного числа элементарных повреждений происходит отказ элемента.

Рассматриваемая ситуация является обобщением внезапных отказов. Но если в предыдущем случае первое превышение предела прочности приводило к отказу, то здесь необходимо многократное превышение, например, температуры изоляции сверх допустимой или многократное отключение токов к.з. и т.д.

Для построения математического описания этих явлений используют простейший поток событий.

В ходе лекции показывается вывод формулы вероятности постепенного отказа:

$$q(t) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}$$

Частота отказов (дифференциальная функция распределения времени безотказной работы) равна:

$$a(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^{m-1}}{(m-1)!}.$$

Т.к. для целых  $m$  гамма-функция равна:

$$(m-1)! = \Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} e^{-x} dx,$$

то в общем виде

$$a(t) = \begin{cases} \frac{\lambda^m}{\Gamma(m)} t^{m-1} e^{-\lambda t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

Это гамма-распределение безотказной работы.

Если  $m=1$ , то оно превращается в экспоненциальное, т.е. одно повреждение приводит к отказу. Следовательно, внезапный отказ – частный случай постепенного.

В этом случае интенсивность отказов не постоянна во времени (как при внезапном отказе), а увеличивается с течением времени:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda^m t^{m-1}}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{(m-1)!}{i!} (\lambda t)^i}.$$

Законы гамма-распределения и нормальный имеют возрастающую интенсивность отказов с течением времени эксплуатации, что хорошо согласуется с физической сущностью протекающих процессов износа.

Если элемент подвержен внезапным отказам и в его состав входят стареющие изнашиваемые части, то часто используют композицию нормального и показательного закона:

$$a(t) = e^{-\lambda t} \left\{ \lambda \left[ 1 - \Phi \left( \frac{(t-\bar{T})}{\sigma_T} \right) \right] \right\} + \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma_T^2}},$$

интенсивность отказов при этом будет равна:

$$\lambda(t) = \lambda + \frac{e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma_T^2}}}{\sigma_T \sqrt{2\pi} \Phi \left( \frac{(t-\bar{T})}{\sigma_T} \right)}.$$

Если среднее время до отказа из-за мгновенного повреждения меньше среднего времени до появления отказа из-за износа, то кривая распределения близка к экспоненциальному закону, если же внезапные отказы очень редки, то – к нормальному.

#### Законы распределения сроков службы изоляции элементов электрических сетей.

Надежность наиболее распространенных элементов электрических сетей, таких как, силовые трансформаторы, кабели и вводы в значительной степени определяются надежностью работы изоляции. Основной характеристикой изоляции электротехнических изделий является ее электрическая прочность, которая зависит от однородности материала.

Разрушение изоляции при функционировании элемента происходит при нагревании токами нагрузок, температурных воздействиях внешней среды, механических нагрузках, низком качестве электроэнергии, при высоких напряжениях электрического

поля (электрическое старение).

Среди перечисленных факторов одним из наиболее влияющих на срок службы является тепловое старение. Механические характеристики прочности изоляции также зависят от температуры. Предел механической прочности изоляции быстро снижается по мере ее нагревания, но в тоже время она становится более эластичной. Однако значительные деформации сопровождаются появлением трещин, разрывов, расслоений. Электромеханические силы, воздействующие во время изменений тока, пропорциональны квадрату мгновенного значения тока.

Из рассмотрения двух основных факторов, влияющих на срок службы изоляции, видно, что как усталостные явления в изоляции, так и ее тепловое старение зависят от однородности материала, обеспечивающей отсутствие местных перегревов.

Для определения закона распределения времени безотказной работы изоляции элемента электрической сети необходимо найти вероятность распределения минимальных времен безотказной работы совокупности всех участков. В смысле надежности участки такой системы соответствуют последовательному соединению, поэтому функция распределения времени безотказной работы такой системы или вероятность отказа будет:

$$q_c(t) = 1 - p_c(t) = 1 - [1 - q(t)]^n.$$

В общем случае, когда  $q(t)$  имеет так называемый «порог чувствительности», т.е. элемент гарантированно не откажет в интервале времени  $(0; t_0)$ , функция распределения срока службы изоляции элемента электрической системы имеет вид:

$$q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_0)}, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases},$$

где  $c$  – постоянный коэффициент.

Форма этого закона определяется видом функции распределения на малых интервалах времени. Если зависимость изменения вероятности отказа на каждом интервале нелинейна, то закон распределения времени безотказной работы будет:

$$q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_0)^\alpha}, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases}.$$

Если распределение не имеет порога чувствительности,  $t_0$ , то вероятность отказа описывается законом Вейбулла

$$q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}.$$

Этот закон довольно часто используется при описании вероятности отказа систем с конечным числом последовательно соединенных в смысле надежности элементов, например, длинные кабельные линии со значительным числом соединительных муфт.

Частота отказов для данного случая (без порога чувствительности) равна:

$$a(t) = \begin{cases} \alpha ct^{\alpha-1} e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases},$$

а интенсивность отказов будет

$$\lambda(t) = \alpha ct^{\alpha-1}.$$

Материал, выносимый на самостоятельную проработку: характеристика показателей надежности изоляции силовых трансформаторов; проверка температурного режима силовых трансформаторов подстанций.

*Выводы.*

1. Получена модель внезапного отказа элемента.
2. Рассмотрено формирование модели постепенного отказа и показано, что безотказная работа описывается законом гамма-распределения.
3. Показано, что в условиях эксплуатации для описания отказа используют композицию нормального и экспоненциального законов.
4. Жаны законы распределения сроков службы изоляции электроустановок.

Лекция 4.

Модели отказов нерезервированных и резервированных систем.

*Цель лекции:* рассмотреть модели отказов систем, отличающихся по степени резервирования и показать их области применения.

*План лекции.*

1. Модель отказа системы при последовательном соединении элементов.
2. Модель отказа системы при параллельном соединении элементов.
3. Виды резервирования и их количественное описание.
4. Резервирование релейно-контактных элементов.
5. Модель отказа выключателя.

*Краткое содержание лекции.*

Простейшей системой с точки зрения теории надежности является такой комплект элементов, при котором отказ одного элемента вызывает отказ всей системы, но не изменяет надежность других элементов. Такую структуру в теории надежности называют системой с последовательным соединением элементов.

Вероятность безотказной работы такой системы определяется как вероятность безотказной работы всех ее элементов в течение времени  $t$ :

$$p(t) = p\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = p_1(t) p_2(t) \dots p_n(t),$$

где  $n$  – число элементов;

$A_i$  - событие.

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

При экспоненциальном законе распределения (внезапный отказ), когда  $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$

$$p(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t},$$

т.е. надежность системы последовательно соединенных элементов также подчиняется экспоненциальному закону.

Структурой из последовательно соединенных элементов моделируют надежность электрических цепей с последовательным соединением аппаратов, трансформаторов, проводов, кабелей и ВЛ, а также схем, содержащих обмотки и контакты реле, резисторы, тиристоры, катушки индуктивности и электронные приборы.

Структурой из последовательно соединенных элементов можно также моделировать надежность схем с параллельным соединением конденсаторов и батарей,



если они не имеют индивидуальных предохранителей, а также схем с параллельным соединением разъединителей и выключателей цепей, отходящих от сборных шин.

Параллельное соединение линий и других цепей, конденсаторов с индивидуальными предохранителями, а также параллельная работа нескольких агрегатов (генераторы, насосы, вентиляторы и т.д.) моделируются структурой с параллельным соединением элементов.

Структурой с параллельным соединением элементов считают систему из  $n$  элементов или единиц оборудования, если для нормальной работы нужно  $r$  элементов, а  $m^* = n - r$  элементов являются резервными. Отказ системы наступает при условии выхода из строя  $m$  элементов, т.е. пока число резервных элементов превышает число отказавших, система не отказывает.

Следовательно вероятность отказа системы определяется как вероятность совпадения отказов  $(n - r + 1)$  или  $m$  элементов в течение расчетного времени из  $n$  элементов или отказов, т.е. по схеме независимых испытаний:

$$q(t) = \sum_{k=m}^n c_n^k p^{n-k}(t) q^k(t);$$

где  $c_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ .

Система с параллельным соединением элементов является резервированной системой, т.е. отказ одного или нескольких элементов не вызывает отказа системы.

Резервирование называется *постоянным*, если в работе находятся все элементы, и система не отказывает до выхода из строя определенного их числа. Резервирование *замещением* – это такое резервирование, при котором резервные элементы включаются только после автоматического отключения отказавших элементов. В энергетике резервирование замещением осуществляется многочисленными устройствами АВР, постоянное – вращающимся и скрытым резервом генераторов, трансформаторов и двигателей.

Кратность при постоянном резервировании равна

$$k = \frac{n - r}{r} = \frac{m - 1}{n - m + 1}.$$

Вероятность безотказной работы системы с резервированием определяется не только надежностью самих элементов, но и надежностью выключателей, которые при постоянном резервировании должны автоматически отключать отказавший элемент, а при резервировании замещением – еще и включать резервный. Если при отказе отключающей аппаратуры в отключении выводится из строя вся система, то вероятность безотказной работы системы с постоянным резервированием равна

$$P_c = P_k P_{o.c.},$$

где  $P_k$  – вероятность безотказной работы группы элементов с кратностью резервирования  $k$ ,

$P_{o.c.}$  – вероятность отсутствия отказов срабатывания при автоматическом отключении отказавшего элемента.

При резервировании замещением вероятность отказа системы будет определяться по формуле полной вероятности:

$$q_c = q(S/A_1 A_2) p(A_1) p(A_2) + q(S/\bar{A}_1 A_2) q(A_1) p(A_2) + q(S/A_1 \bar{A}_2) p(A_1) q(A_2) + q(S/\bar{A}_1 \bar{A}_2) q(A_1) q(A_2),$$

где  $q(S/A_1 A_2)$  – условная вероятность отказа системы при отсутствии отказов аппаратуры;

$q(S / \bar{A}_1 A_2)$  – то же при отказе в отключении отказавшего элемента;

$q(S / A_1 \bar{A}_2)$  – то же при отказе во включении резервного элемента;

$q(S / \bar{A}_1 \bar{A}_2)$  – то же при совпадении отказа в отключении с отказом во включении;

$p(A_1), q(A_1)$  – соответственно, вероятность отсутствия отказа и вероятность отказа в отключении;

$p(A_2), q(A_2)$  – соответственно, вероятность отсутствия отказа и вероятность отказа во включении.

#### *Резервирование релейно-контактных элементов*

Контактный элемент, т.е. элемент, функции которого заключаются в замыкании и размыкании цепи, может находиться в одном из трех состояний: быть работоспособным, иметь отказ типа «обрыв» (элемент не замыкает цепь), иметь отказ типа «замыкание» (элемент не размыкает цепь). Эти три состояния образуют полную группу, т.е.

$$p + q_0 + q_3 = 1,$$

где  $p$  - вероятность безотказной работы;

$q_0$  - вероятность отказа типа «обрыв»;

$q_3$  - вероятность отказа типа «замыкание».

Контактные схемы, так же как и составляющие их элементов, могут иметь два типа отказов: «обрыв» и «замыкание», причем определенный тип отказов схемы может быть вызван лишь одноименным типом отказов элементов. Для повышения надежности контактных схем применяется резервирование элементов.

При резервировании одного элемента, у которого могут быть отказы лишь типа «замыкание», необходимо последовательно с этим элементом включить хотя бы один резервный. При резервировании одного элемента, дающего отказы лишь типа «обрыв», необходимо этот и резервные элементы включать параллельно.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую вероятность отсутствия ложного сигнала, в релейных цепях используется схема с «голосованием» (схема «два из трех») – с тремя промежуточными реле.

#### *Модель отказов выключателей*

Особую группу среди сложных элементов образуют коммутационные аппараты (КА), к которым относят выключатели, выключатели нагрузки, автоматические выключатели напряжением до 1 кВ. Характерной особенностью работы КА является их автоматическое отключение при отказах смежных элементов. Отказы КА могут происходить в статическом состоянии, при производстве оперативных переключений, при автоматических отключениях отказавших смежных элементов.

Под выключателем понимается весь комплекс оборудования в его ячейке РУ: изоляторы, измерительные трансформаторы, разъединители, РЗиА.

При внезапных отказах выключателей отключившиеся элементы (генераторы, трансформаторы, ЛЭП) могут быть введены в работу раньше, чем будет закончен ремонт выключателя. Длительность простоя определяется временем, необходимым для выполнения переключений в РУ:

$$T_{пер} = T_o + n_p T_p,$$

где  $T_o$  – постоянная составляющая – время, необходимое для того, чтобы установить характер повреждения для электрических станций и РУ обслуживаемых подстанций,  $T_o = 0,1 \dots 0,3ч$ ;

$T_p$  – время отключения (включения) разъединителя,  $T_p = 0,1ч$ ;

$n_p$  – число разъединителей, которые должны быть отключены (включены) для

отделения поврежденного выключателя и ввода отключившихся элементов в работу.

Повреждение может произойти в статическом состоянии, при автоматическом отключении поврежденного смежного элемента или при оперативных переключениях:

$$\omega_B = \omega_{B.СТ} + \underbrace{a_{B.on} N_{on}}_{\omega_{ОП}} + \underbrace{a_{B.авт} \omega}_{\omega_{B.авт}},$$

где  $\omega_{B.СТ}$  – частота отказов выключателя в статическом состоянии;

$a_{B.on} N_{on}$  – частота отказов при оперативных переключениях,

$a_{B.on}$  – относительная частота отказов при оперативных переключениях;

$N_{on}$  – число оперативных переключений выключателей в год;

$a_{B.авт}$  – относительная частота отказов при автоматических отключениях повреждаемых смежных элементов;

$\omega$  – параметр потока отказов смежного элемента.

Общая частота отказов выключателя при автоматическом отключении

$$\omega_{B.авт} = a_{B.авт} \sum_i^n (1 + aKa_i) \omega_{эли},$$

где  $Ka_i$  – относительная частота неуспешных действий АПВ;

$a$  – показатель наличия АПВ; [0;1]

$\omega_{эли}$  – параметр потока отказов элементов присоединенного к выключателю  $i$ -го смежного элемента;

$n$  – количество присоединенных к выключателю смежных элементов.

Вероятность отказа выключателя определяется выражением:

$$q = q_{СТ} + q_{АВТ} + q_{ОП} = \omega_{СТ} t_B + a_{B.АВТ} \sum_1^n (1 + aKa_i) \omega_{эли} t_{B_i} + a_{B.ОП} N_{ОП} T_{ОП},$$

где  $t_B$  – время восстановления выключателя;

$t_{B_i}$  – время восстановления  $i$ -го смежного элемента;

$T_{ОП}$  – время оперативных переключений.

Т.о., высоковольтный выключатель представляется в модели надежности схемы подстанции или станции следующими параметрами:

- параметр потока отказа в статическом состоянии  $\omega_{СТ}$ ;
- частота плановых ремонтов  $\lambda_{пл}$ ;
- частота внеплановых ремонтов  $\lambda_i$ ;
- время восстановления  $\bar{t}_B$ ;
- вероятность отказа в отключении к.з.  $q_{АВТ}$ ;
- вероятность отказа при оперативных переключениях  $q_{ОП}$ .

*Материал, выносимый на самостоятельную проработку:* классификация отказов выключателей и их характеристика, оценка частоты отказов РУ с шиносоединительными разъединителями, образование отказа выключателя.

#### Выводы:

1. Дано понятие последовательного и параллельного соединения элементов в смысле надежности.

2. Показано как определяются показатели надежности при последовательном и параллельном соединении элементов.
3. Рассмотрены виды резервирования в электрических схемах, а также резервирование релейно-контактных элементов.
4. Получена модель отказа выключателя и даны пояснения по ее изменению в реальных схемах.

## Лекция 5.

### Процессы отказов и восстановлений в схемах.

*Цель лекции:* показать как на основе случайных процессов формируются математические модели надежности нерезервированных схем.

#### *План лекции.*

1. Особенности случайных процессов, используемых при решении задач надежности.
2. Процессы отказов и восстановлений одноэлементной схемы.
3. Нерезервированная схема, состоящая из  $n$  элементов.

#### *Краткое содержание лекции.*

Процессы смены состояний электроэнергетической системы описываются Марковскими случайными процессами.

*Процесс называется Марковским*, если для каждого момента времени вероятность любого состояния элемента или системы в будущем зависит от состояния в настоящий момент и не зависит от того, каким образом элемент пришел в это состояние. Законы распределения мощности в зависимости от состава потребителей могут меняться от полимодального до нормального. В расчетах надежности в основном принимают нормальный закон распределения потребляемой мощности в узлах нагрузки.

Основным приемом, используемым для решения задач надежности является исключение из рассмотрения маловероятных событий и сокращение числа состояний до приемлемого уровня. Осуществить это можно следующими способами:

1) выделение состояний, соответствующих полному отказу системы или полностью работоспособного состояния. Эту схему назовем схемой полного отказа относительно узла;

2) объединение в одно состояние  $k$  состояний системы, т.е. возможно эквивалентирование цепей, состоящих из последовательно (в смысле надежности) соединенных элементов, в один эквивалентный элемент. Этот способ можно распространить также на отказ при каскадной аварии в энергосистеме, когда отказ одного элемента приводит с некоторой вероятностью, неравной единице, к каскадному отключению ряда элементов и массовому нарушению питания потребителей. При этом рассматривается одно состояние с  $K_K$  элементами, отключенными при каскадной аварии, хотя остальные  $(n-K_K)$  элементов работоспособны. Эту схему назовем схемой одного состояния.

3) рассмотрение  $(n+1)$  состояний системы, из которых  $n$  соответствуют отказу одного  $j$ -го расчетного элемента системы, а каждому  $j$ -му состоянию соответствует определенный недоотпуск электроэнергии. Эту схему назовем схемой одного отказа.

4) рассмотрение состояний системы, два элемента которой находятся в состоянии отказа. Эта схема называется схемой двух отказов.

5) учет вероятности других состояний с числом отказавших элементов более трех в практических расчетах как маловероятных, так как время нахождения системы в этих состояниях считается пренебрежимо малым.

Из данного рассмотрения следует, что все случаи отказа системы (частичного и полного) приближенно можно свести к трем основным:

а) отказ и восстановление одного элемента  
 б) отказ и восстановление одного элемента из  $n$  элементов при  $(n-1)$  работоспособных (схема одного отказа и схема одного состояния). Эти схемы приводятся к схемам с последовательным соединением элементов, но с разными недоотпусками электроэнергии.

в) отказ и восстановление двух резервирующих друг друга элементов при выполнении ими функций в системе (схема двух отказов). Эта схема приводится к схеме параллельного соединения двух элементов (в смысле надежности).

*Процессы отказов и восстановлений одноэлементной схемы*

Марковский случайный процесс можно описать обыкновенными дифференциальными уравнениями, в которых неизвестными являются вероятности состояний.

Элемент или установка без резервирования может находиться в двух состояниях:

0 – работоспособное,

1 – отказ.

Определим соответствующие вероятности состояний элемента в произвольный момент времени  $t$  при различных начальных условиях (н.у.).

Процесс изменения состояний рассматриваемого элемента можно проиллюстрировать с помощью графа переходов из состояния в состояние:

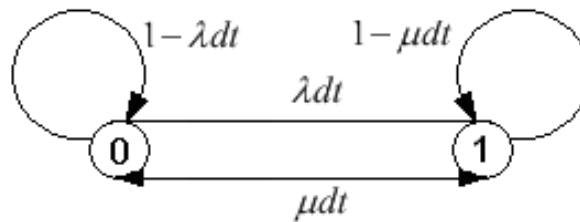


Рис. Граф перехода из состояния в состояние для одноэлементной схемы

Вершинам графа соответствуют состояния элемента: 0;1, ребрам – возможные переходы из одного состояния в другое.

Из рабочего состояния  $\textcircled{0}$  элемент перешел в состояние отказа  $\textcircled{1}$  за время  $t$ , т.е. переход  $\rightarrow \lambda dt$ , или из состояния отказа  $\textcircled{1}$  за время  $t$  элемент перешел в состояние работы  $\textcircled{0}$ , т.е. переход  $\leftarrow \mu dt$ .

За время  $t$  не произошло изменения состояния, т.е. из работы элемент перешел в работу:  $1 - \lambda dt$ , аналогично – из отказа в отказ, т.е. элемент не восстановился за время  $t$ :  $1 - \mu dt$ .

Если имеется направленный граф состояний, то систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний можно записать, пользуясь правилом:

*В левой части каждого уравнения стоит производная  $dp(t)/dt$  с индексом 0 или 1 в зависимости от рассматриваемого состояния, а в правой – столько составляющих, сколько ребер связано непосредственно с данным состоянием. Если ребро оканчивается в данном состоянии, то составляющая имеет знак «+»; если начинается из данного состояния, то составляющая имеет знак «-».*

*Каждая составляющая равна произведению интенсивности потока событий ( $\lambda$  или  $\mu$ ), переводящего элемент или систему по данному ребру в другое состояние, на вероятность того состояния, из которого начинается ребро.*

Состояние работы:

$$\frac{dp_o(t)}{dt} = -\lambda p_o(t) + \mu p_1(t).$$

Состояние отказа:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -\mu p_1(t) + \lambda p_o(t).$$

Полученную систему дифференциальных уравнений можно использовать для определения:

- вероятностей безотказной работы систем;
- функции и коэффициента оперативной готовности;
- вероятности нахождения в ремонте нескольких элементов;
- среднего времени пребывания системы в любом состоянии;
- интенсивности отказов системы с учетом н.у. (состояний элементов).

Решение системы уравнений, описывающих состояние одного элемента при н.у.:

$p_o(0) = 1$ ;  $p_1(0) = 0$ , т.е. элемент в работе, имеет вид:

$$p_o(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t};$$

$$p_1(t) = 1 - p_o(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}).$$

Для стационарного состояния ( $t \rightarrow \infty$ ) вероятность работы элемента равна стационарному коэффициенту готовности  $K_G$ , а вероятность отказа – стационарному коэффициенту вынужденного простоя,  $K_{II}$ :

$$K_G = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{t}_B};$$

$$K_{II} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{t}_B}{\bar{T} + \bar{t}_B}.$$

Обычно в расчетах показателей надежности для достаточно длинных интервалов времени  $[t \square (7...8)\bar{t}_B]$  без большой погрешности вероятности состояний системы можно определять по установившимся средним вероятностям:  $p_o(\infty) = K_G = p_o$ ,  $p_1(\infty) = K_{II} = p_1$ . Такого рода состояния с точки зрения надежности называются *предельными*.

Отсюда,  $K_{II} = \lambda \bar{t}_B$ , т.к.  $K_{II} \approx \frac{\bar{t}_B}{T} = \lambda \bar{t}_B$  при  $\bar{T} \square \bar{t}_B$ ,  $p = 1 - \lambda \bar{t}_B$ .

*Нерезервированная схема, состоящая из n элементов (последовательное соединение элементов в смысле надежности)*

Система, состоящая из  $n$  последовательно соединенных элементов, причем восстанавливаемых, отказывает в тех случаях, когда любой из элементов выйдет из строя. Система из  $n$  однородных последовательно соединенных элементов имеет два состояния (см. рис.):

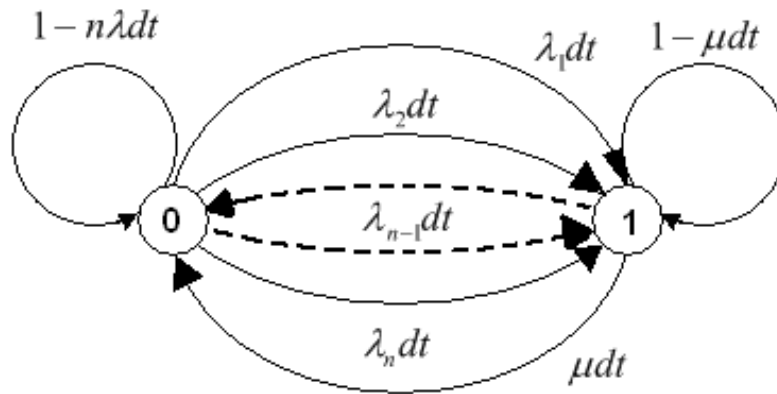


Рис. Граф переходов для схемы с последовательно соединенными элементами

0 – все элементы в безотказном состоянии;

1 – один из элементов, а следовательно и система, в состоянии

отказа.

Тогда система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -n\lambda p_0(t) + \mu p_1(t); \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = -\mu p_1(t) + n\lambda p_0(t). \end{cases}$$

При начальных условиях  $p_0(0) = 1$ ,  $p_1(0) = 0$  - система в работе, решение будет иметь вид:

$$p_0(t) = \frac{\mu}{n\lambda + \mu} + \frac{n\lambda}{n\lambda + \mu} e^{-(n\lambda + \mu)t};$$

$$p_1(t) = \frac{n\lambda}{n\lambda + \mu} - \frac{n\lambda}{n\lambda + \mu} e^{-(n\lambda + \mu)t}.$$

Для стационарного состояния ( $t \rightarrow \infty$ )  $K_{Г.С.}$  и  $K_{П.С.}$  имеют вид:

$$p_0 = K_{Г.С.} = \frac{\mu}{n\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{n\lambda}{\mu}} = \frac{\bar{T}}{n\bar{t}_B + \bar{T}};$$

$$p_1 = K_{П.С.} = \frac{n\lambda}{n\lambda + \mu} = \frac{n\bar{t}_B}{n\bar{t}_B + \bar{T}}.$$

Выразим коэффициент готовности системы  $K_{Г.С.}$  через  $K_{Г.}$  ее элементов:

$$K_{Г.С.} = \frac{1}{n\left(\frac{1}{K_{Г.}} - 1\right) + 1}$$

при условии, что элементы системы имеют одинаковые показатели надежности.

Аналогично для  $K_{П.С.}$  при том же условии:

$$K_{П.С.} = \frac{nK_{П.}}{(n-1)K_{П.} + 1}.$$

Если элементы системы имеют различные показатели надежности, то система может находиться в различных по продолжительности состояниях отказа. Тогда:

$$K_{Г.С.} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{K_{П_i}} - 1 \right)};$$

$$K_{П.С.} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{П_i}}{\sum_{i=1}^{n-1} K_{П_i} + 1}.$$

При небольшом значении  $n$  в практических расчетах для высоконадежных элементов можно пользоваться приближенными формулами:

$$K_{Г.С.} \approx \prod_{i=1}^n K_{Г_i};$$

$$K_{П.С.} \approx \sum_{i=1}^n K_{П_i} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{t}_{B_i}.$$

Для такой схемы эквивалентная интенсивность отказа и эквивалентное среднее время восстановления можно определять так:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad \bar{t}_{B.C} = \frac{K_{П.С.}}{\lambda_C}.$$

*Материалы, выносимые на самостоятельную проработку:* по индивидуальным заданиям, выданным на лекции, показать формирование графа перехода из состояния в состояние и определить коэффициенты готовности простоя системы; рассмотреть решение систем дифференциальных уравнений, описывающих состояние отказа и работы схем.

#### Выводы

1. Дано определение Марковским случайным процессам.
2. Рассмотрены приемы, позволяющие исключать при анализе надежности маловероятные события.
3. Показано как формируются графы перехода из состояния в состояние для одноэлементной и нерезервированной схем.
4. Получены выражения, описывающие комплексные показатели надежности.

#### Лекция 6.

##### Надежность резервируемых схем.

##### Учет ремонтных состояний и преднамеренных отключений.

*Цель лекции:* получить модель надежности резервируемой схемы и рассмотреть как учитываются ремонтное состояние и преднамеренные отключения в моделях надежности схем.

##### План лекции.

1. Надежность системы, состоящей из двух взаиморезервирующих элементов.
2. Параллельное соединение элементов в смысле надежности.
3. Расчет показателей надежности с учетом ремонтов и преднамеренных отключений.



Краткое содержание лекции.

Надежность системы, состоящей из резервируемых восстанавливаемых элементов

Целью расчета резервированной системы является определение вероятности непрерывной безотказной работы, среднего времени безотказной работы и интенсивности или параметра потока отказов ( $\lambda$  или  $\omega$ ), стационарного  $K_{П.С.}$  для оценки недоотпуска электроэнергии в состоянии с двумя отказавшими элементами (схема двух отказов).

Особенности резервированных систем с восстановлением целесообразно рассмотреть на примере двух взаиморезервирующих элементов 1 и 2.

Такая система может находиться в 4-х состояниях:

1. система работоспособна, (оба элемента – в работе);
2. система работоспособна, но первый элемент отказал;
3. система работоспособна, но второй элемент отказал;
4. система не работоспособна – оба элемента в отказе.

Граф переходов будет иметь вид:

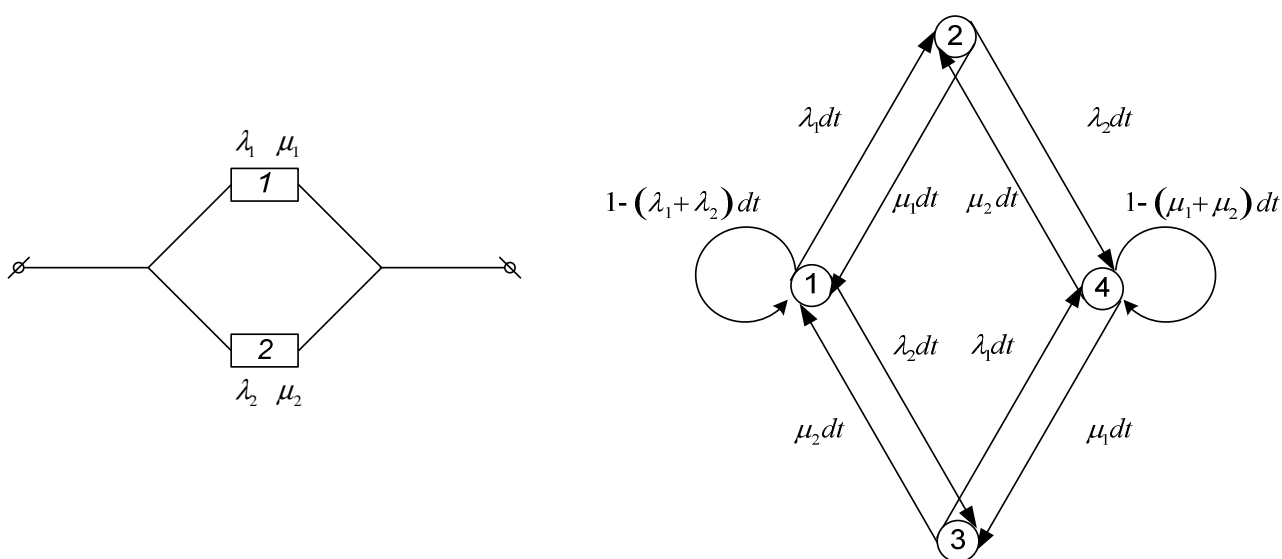


Рис. Граф переходов из состояния в состояние для двух взаиморезервируемых элементов

Система дифференциальных уравнений, описывающая вероятности состояний во времени, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_1(t) + \mu_1 p_2(t) + \mu_2 p_3(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -(\lambda_2 + \mu_1) p_2(t) + \lambda_1 p_1(t) + \mu_2 p_4(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_2) p_3(t) + \lambda_2 p_1(t) + \mu_1 p_4(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -(\mu_1 + \mu_2) p_4(t) + \lambda_1 p_3(t) + \lambda_2 p_2(t). \end{cases}$$

Функции готовности и вынужденного простоя системы имеют вид:

$$K_{Г.С.}(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t);$$

$$K_{П.С.}(t) = 1 - K_{Г.С.}(t) = p_4(t).$$

Для стационарного состояния (при  $t \rightarrow \infty$ ) средние вероятности состояний следующие:

$$p_1 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{T}_1}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} \frac{\bar{T}_2}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} = K_{\Gamma 1} K_{\Gamma 2};$$

$$p_2 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{t}_{B1}}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} \frac{\bar{T}_2}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} = K_{\Pi 1} K_{\Gamma 2};$$

$$p_3 = \frac{\lambda_2 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{t}_{B2}}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} \frac{\bar{T}_1}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} = K_{\Gamma 1} K_{\Pi 2};$$

$$p_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{t}_{B1}}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} \frac{\bar{t}_{B2}}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} = K_{\Pi 1} K_{\Pi 2}.$$

Если  $\bar{T}_i \square \bar{t}_{Bi}$ , то

$$K_{\Gamma.C.} = p_1 + p_2 + p_3;$$

$$K_{\Pi.C.} = p_4 = K_{\Pi 1} K_{\Pi 2} \approx \lambda_1 \bar{t}_{B1} \lambda_2 \bar{t}_{B2}.$$

Если представить систему как эквивалентный элемент, то

$$\bar{t}_{B.C.} = \frac{\bar{t}_{B1} \bar{t}_{B2}}{\bar{t}_{B1} + \bar{t}_{B2}};$$

$$K_{\Pi.C.} = \lambda_C \bar{t}_{B.C.},$$

откуда можно найти параметр потока отказов системы из двух взаиморезервирующих друг друга элементов:

$$\lambda_C = \frac{K_{\Pi.C.}}{\bar{t}_{B.C.}} = \frac{\lambda_1 \bar{t}_{B1} \lambda_2 \bar{t}_{B2} (\bar{t}_{B1} + \bar{t}_{B2})}{\bar{t}_{B1} \bar{t}_{B2}} = \lambda_1 K_{\Pi 2} + \lambda_2 K_{\Pi 1}.$$

Т.о., параметр потока отказов системы, состоящей из двух резервирующих друг друга элементов, равен сумме произведений параметра потока отказов первого на среднюю вероятность отказа второго и параметра потока отказов второго на среднюю вероятность отказа первого элемента.

Этот вывод имеет важное практическое значение, а слагаемые  $\lambda_1 K_{\Pi 2}$  и  $\lambda_2 K_{\Pi 1}$  имеют смысл среднего числа отказов системы во время состояния отказа соответственно второго и первого элементов.

*Система из  $n$  взаиморезервирующих элементов (параллельное соединение элементов в смысле надежности)*

Для определения параметра потока отказов такой системы необходимо рассмотреть столько слагаемых, сколько элементов входит в систему, т.е.

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i \prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \lambda_j \bar{t}_{Bj};$$

$$\bar{t}_{B.C.} = \frac{K_{\Pi.C.}}{\lambda_C} = \frac{\prod_{j=1}^n \lambda_j \bar{t}_{Bj}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i \prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \lambda_j \bar{t}_{Bj}}.$$

Т.о., можно выработать общее правило оценки надежности системы любой сложности с произвольным соединением элементов, если для системы определяются показатели полного отказа.

*Параметр потока отказов системы, состоящей из независимых восстанавливаемых элементов, равен сумме произведений параметра потока отказов каждого элемента на среднюю вероятность отказа части системы, оставшейся после исключения этого элемента, причем если отказ рассматриваемого элемента приводит к отказу системы, то вероятность отказа оставшейся части принимается равной единице (например, последовательное в смысле надежности соединение элементов).*

*Расчет показателей надежности с учетом ремонтных состояний и преднамеренных отключений элементов*

Проведение профилактических и капитальных ремонтов оборудования электроэнергетических систем предусматривает отключение элементов, изменение схем коммутации, что приводит к изменению уровня надежности электроснабжения в этот период времени.

В практических расчетах надежности, если система обладает избыточностью по надежности, то при преднамеренном отключении какого-либо элемента вся оставшаяся часть системы рассматривается как один эквивалентный элемент.

Поэтому, вероятность отказа эквивалентного элемента во время преднамеренного отключения любого  $i$ -го элемента будет:

$$P_{1_{\text{экв}}} = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{экв}} + \mu_{\text{экв}}} - \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{экв}} + \mu_{\text{экв}}} e^{-(\lambda_{\text{экв}} + \mu_{\text{экв}})t} = K_{\Pi_{\text{экв}}} - K_{\Pi_{\text{экв}}} e^{-t/\bar{t}_{\text{экв}}}.$$

Если продолжительность преднамеренного отключения принять равной  $\bar{t}_{np_i}$ , то

$$P_{1_{\text{экв}}} = K_{\Pi_{\text{экв}}} \left( 1 - e^{-\frac{\bar{t}_{np_i}}{t_{\text{экв}}}} \right) = K_{\Pi_{\text{экв}}} K_{np_i},$$

где  $K_{np_i}$  – коэффициент, зависящий от соотношения времени восстановления резервирующего эквивалентного элемента и времени отключения  $i$ -го элемента. Этот коэффициент учитывает фактор уменьшения вероятности преднамеренного отключения одного элемента и аварийного отключения другого – резервирующего, т.е. учитывает запрет наложения ремонта на аварию при эксплуатации.

*Система с последовательным соединением элементов*

Коэффициент вынужденного простоя и параметр потока отключений такой цепи, состоящей из  $n$  элементов, равны:

$$K_{\Pi C} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{t}_{Bi} + \left( \lambda_{np_i} \bar{t}_{np_i} \right)_{нб};$$

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i + \lambda_{np.нб},$$

где  $\left( \lambda_{np_i} \bar{t}_{np_i} \right)_{нб}$  и  $\lambda_{np.нб}$  – соответственно наибольшая из вероятностей преднамеренного отключения цепи из  $n$  элементов и наибольшая из частот отключения элементов.

*Система с резервированием элементов*

Для  $n$  взаиморезервированных элементов:

$$K_{\Pi C} = \prod_{i=1}^n \lambda_i \bar{t}_{Bi} + \sum_{i=1}^n \lambda_{np_i} \bar{t}_{np_i} K_{np_i} \prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \lambda_j \bar{t}_{Bj};$$

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i \prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (\lambda_j \bar{t}_{Bj} + \lambda_{npj} \bar{t}_{npj}).$$

Время восстановления такой системы:

$$\bar{t}_{BC} = \frac{K_{ПС}}{\lambda_C}.$$

*Материал, выносимый на самостоятельную проработку:* решение дифференциальных уравнений, описывающих состояние схем с параллельным соединением элементов; составление графов перехода из состояния в состояние для таких схем по индивидуальным заданиям.

#### *Выводы*

1. Рассмотрено формирование графов перехода из состояния в состояние для двух взаиморезервирующих элементов и получены показатели надежности таких схем.
2. Показано как оценивать надежность схем с параллельным соединением элементов в смысле надежности.
3. Предложены выражения, позволяющие учитывать при расчете надежности ремонтные состояния и преднамеренные отключения, и показано как они получены.

#### Лекция 7.

##### Метод путей и минимальных сечений.

*Цель лекции:* рассмотреть сущность и область применения метода путей и минимальных сечений, его практическое применение.

##### *План лекции.*

1. Понятие путей и минимальных сечений схемы.
2. Способы определения одно- и двухэлементных сечений.
3. Алгоритмы метода путей и минимальных сечений.
4. Примеры его применения.

##### *Краткое содержание лекции.*

##### *Пути и минимальные сечения схемы*

Пути схемы относительно узла (узлов) нагрузки называются минимальные совокупности элементов, безотказные состояния которых (в любой из совокупностей) обеспечивают безотказное состояние схемы (передачу электроэнергии) относительно узла.

Минимальными сечениями схемы называются совокупности минимального набора элементов, отказы которых в любой из совокупностей приводят к состоянию отказа схемы (прекращение передачи электроэнергии) относительно узла.

Т.е. путь от источника питания (ИП) до узла – это тот минимальный набор элементов схемы, который обеспечивает один из возможных самостоятельных вариантов выполнения задачи – передачи электроэнергии в узел нагрузки.

Минимальные сечения – это тот минимальный набор элементов схемы, отказ которых приводит к отказу системы относительно узла, т.е. к прекращению передачи электроэнергии.

В определении путей и сечений не предусматривается ограничение пропускных способностей элементов. В схеме с последовательным соединением элементов имеется один путь, состоящий из совокупности элементов  $1, 2, \dots, n$ , и  $n$  сечений:  $(1), (2), \dots, (n)$ . В схеме с параллельным соединением элементов имеется одно сечение  $(1, 2, \dots, n)$  и  $n$  путей:  $(1), (2), \dots, (n)$ . Т.о., данный метод используется для определения вероятностей полного

отказа и полной работоспособности системы.

Представим все сечения и пути схемы с последовательным соединением элементов в виде матриц минимальных сечений  $S$  и путей  $P$ . Их столбцы соответствуют элементам, строки – сечениям (путям). Если элемент  $i$  входит в сечение  $j$ , то на пересечении столбца  $i$  и строки  $j$  ставится 1, в противном случае – 0:

Отсюда, если элемент входит в состав всех путей, то он образует одноэлементное сечение. Если элемент входит в состав всех сечений, то он образует путь.

*Для выявления одноэлементных сечений по матрице путей достаточно выявить ее столбцы, состоящие из одних единиц (пересечение всех путей в одном элементе).*

*Двухэлементные сечения получаются в результате логического сложения двух любых столбцов матрицы путей (пересечение всех путей в двух элементах). Если в результате получается столбец, состоящий из одних единиц, то эти два элемента образуют двухэлементное сечение.*

*Трехэлементные сечения получаются в результате логического сложения трех столбцов (пересечение всех путей в трех элементах) и т.д.*

1. *Если все пути схемы пересекаются в одном элементе, то этот элемент является одноэлементным сечением.*

2. *Если все пути пересекаются в двух элементах, то эти элементы образуют двухэлементные сечения.*

Способ определения одно- и двухэлементных сечений, основанный на пересечении путей можно получить иначе, через независимые пути схемы:

- если два независимых пути вынужденно пересекаются в одном элементе, то он образует одноэлементное сечение.

- если две пары независимых путей вынужденно пересекаются в двух элементах, то они образуют двухэлементное сечение.

Используя способ вынужденного пересечения независимых путей, можно регулировать в процессе расчета количество состояний системы, выявляя только состояния с числом отказавших элементов не более двух. Для этого достаточно найти четыре максимально независимых пути. Вынужденные пересечения двух путей выявляют одноэлементные сечения, пересечения пар путей – двухэлементные сечения.

Все вышесказанное можно применять только для высоконадежных элементов, когда  $\bar{t}_{Bi} \ll \bar{T}_i$  и  $q_i \ll p_i$ ,  $p_i \approx 1$ . В противном случае нужно учитывать и состояния с большим числом отказавших элементов.

Используя свойство пересечения независимых путей, в результате которого выявляются сечения, а так же пренебрегая вероятностью одновременного отказа трех и более элементов, построим алгоритм определения одно- и двухэлементных сечений, приемлемый для сетей с несколькими тысячами элементов.

#### **Первый метод.**

1. Определяется первый кратчайший путь между ИП и рассматриваемым узлом нагрузки с использованием известных способов выявления кратчайших путей.

2. Фиксируются все вершины графа (узлы), образующие сечения, т.е. определяется часть одноэлементных сечений.

3. Определяется второй кратчайший путь (второго порядка), но с максимально возможным исключением элементов первого пути.

4. Если второй путь проходит по совокупности элементов: вершина – ребро – вершина, то они образуют одноэлементные сечения, т.е. они совместно с вершинами сечения п.2 образуют полную совокупность одноэлементных сечений относительно узла.

5. Определяются третий и четвертый кратчайшие пути (третьего и четвертого порядков) с максимальным исключением элементов предыдущих путей и выделяются общие элементы третьего и четвертого путей с элементами первых двух.

6. Образуя сечения по два из общих элементов (но не с элементами собственных путей), проверяют на связность при исключении из схемы таких пар элементов.

### **Второй метод.**

1. Исходный граф электрической сети предварительно упорядочивается, вводится иерархическая система координат.

2. Выбирается внешняя грань графа, т.е. произвольный путь между ИП и рассматриваемой вершиной графа. Затем выбираются уровни, характеризующие удаленность вершины от вершины ИП; т.е. координаты каждой вершины показывают ее удаленность от внешней грани и от ИП. Примером упорядочения графа является нумерация в скобках вершин графа. Вершине присваивается двойной номер: числитель – номер уровня удаленности от ИП, в знаменателе – от внешней грани графа.

Максимально возможная независимость путей до пересечения обеспечивается прохождением от узла нагрузки до ИП в порядке уменьшения номера вершин в числителе и знаменателе.

3. В качестве первого пути выбирается внешняя грань. Если такого пути нет, то вершина не имеет связи с ИП.

4. Второй путь должен проходить по элементам графа максимально приближенным по номерам элементов к элементам первого пути, но нигде не пересекать первый путь. Если это условие выполняется, то одноэлементных сечений относительно рассматриваемого узла в схеме нет. Если такой путь невозможно найти, то общий элемент заносится в список одноэлементных сечений.

5. Определение третьего пути при ограничении, чтобы он не пересекал элементы первого и второго путей. Если это ограничение выполняется, то в схеме относительно рассматриваемого узла двухэлементных сечений нет. Если нельзя найти 3-й путь, не проходящий по элементам, общим со вторым путем, эти общие элементы заносятся в список элементов, из которых будут оформляться двухэлементные сечения. Для их определения из схемы последовательно исключаются первые пути в сочетании с элементами, занесенными в список двухэлементных соединений, и осуществляется проверка на связность элементов сечения. Если связность отсутствует, то пара элементов остается в двухэлементном сечении.

#### ***Алгоритм метода путей и минимальных сечений***

Исходная схема – нормальный режим.

- 1) Деление элементов на узлы и ветви.
- 2) Анализ проводится относительно каждого узла или нескольких узлов, но тогда они объединяются в один абстрактный.
- 3) Составление графа сети: узлы – вершины, ребра – ветви + вершина «ИП».
- 4) Выделение одно-, двух-, трехэлементных сечений относительно рассматриваемого узла:
  - а) выделяется первый кратчайший путь между ИП и узлом нагрузки и выделяется одноэлементное сечение;
  - б) выделяется второй кратчайший путь, но с максимально возможными исключениями элементов первого пути и выделяются двухэлементные сечения и т.д.
- 5) Составляется структурная схема сечений.
- б) Выделяется первый ремонтный режим и составляется для него структурная схема сечений, затем второй и т.д.
- 7) Записывается вероятность отказа схемы с учетом преднамеренных отключений.

Далее рассматриваются примеры применения метода путей и минимальных сечений.

*Материал, выносимый на самостоятельную проработку:* топологические методы расчета надежности, метод псевдоэлементов.

### *Выводы*

1. Даны определения путей и минимальных сечений.
2. Показано как составляются и анализируются матрицы путей и сечений.
3. Рассмотрены способы определения одно-, двух-, трехэлементных сечений.
4. Приведен алгоритм метода анализа надежности с помощью путей и минимальных сечений.

### Лекция 8.

Аналитический метод расчета надежности электроснабжения.

*Цель лекции:* рассмотреть сущность и область применения аналитического метода расчета надежности, его практическое применение.

#### *План лекции.*

1. Понятие расчетных методов надежности, их классификация.
2. Сущность и область применения аналитического метода определения надежности ЭЭС.
3. Алгоритм аналитического метода.
4. Примеры применения аналитического метода расчета надежности ЭЭС.

#### *Краткое содержание лекции.*

Инженерные методы применяются тогда, когда анализируется надежность объекта, который может быть представлен в виде системы, об элементах и связях которой имеется вся информация.

Эти методы иногда называются расчетными. Их применение к решению реальных задач требует предварительного моделирования объекта с целью его представления в виде абстрактного, т.е. расчетной схемы.

В настоящее время существует много расчетных методов, например графический метод, метод на основе булевой алгебры, табличные методы, структурно-аналитический, логико-вероятностный (метод деревьев событий).

Аналитический метод определения надежности схем электроэнергетических систем позволяет количественно оценить надежность электрической схемы любой сложности. Он основан на композиции системного анализа и теории вероятностей. Его сущность заключается в определении количественных вероятностных значений показателей надежности для расчета случаев надежности, к которым относятся: полное погашение схемы (состояние полного отказа), разрыв транзита; оценка возможных недоотпусков электроэнергии при частичных отказах схемы.

#### *Алгоритм метода.*

1. Определяется перечень расчетных случаев надежности выделенной части схемы электроэнергетической системы для анализируемого нормативного или расчетного режима:

- состояние полного отказа (полное погашение схемы);
- состояние полной работоспособности;
- состояния частичных отказов (частичных перерывов в электроснабжении), приводящих к недоотпуску электроэнергии;
- разрыв транзита.

2. Составляется расчетная схема для каждого из перечисленных в п.1 расчетных случаев. Расчетная схема включает в себя только те элементы схемы, которые нормально включены в рассматриваемом режиме.

3. Для каждого элемента расчетной схемы по справочным или эксплуатационным данным определяются следующие показатели надежности:

- интенсивность отказа или параметр потока отказов;  $\lambda$  или  $\omega$ ;

- среднее время восстановления;  $t_B$ ;
- частота плановых или намеренных отключений  $\mu_{nl}$  или  $\mu_{np}$ ;
- время плановых или преднамеренных отключений,  $t_{nl}$  или  $t_{np}$ ;

Для выключателя дополнительно определяются:

- относительная частота отказов при автоматическом отключении поврежденного смежного элемента,  $\alpha_{авт}$ ;
- относительная частота отказов при оперативных переключениях,  $\alpha_{он}$ ;
- коэффициент неуспешного действия АПВ /30/  $K_{АПВ}$ ;
- число оперативных переключений /30, 36/;  $N_{он}$ ;
- длительность оперативных переключений,  $T_{он}$ .

4. По расчетной схеме (п.1) составляется схема замещения. При этом каждый элемент, который может отказать, замещается прямоугольником. Прямоугольники соединяются последовательно или параллельно в смысле надежности. Последовательное соединение используется для не резервируемых частей схем; параллельное - для частей схем с резервированием замещением.

5. Последовательно соединенные элементы в схеме замещения заменяются одним эквивалентным, для которого рассчитываются следующие показатели надежности:

- параметр потока отказа,  $\omega_c$ ;
- коэффициент вынужденного простоя,  $K_{пс}$ ;
- коэффициент готовности,  $K_{гс}$ ;
- время восстановления,  $t_{BC}$ .

Расчетные формулы приведены в таблице 5.

6. Параллельно соединенные элементы или цепочки схемы замещения заменяются одним эквивалентным, для которого определяется тот же перечень показателей надежности, что и в п.5.

7. Далее алгоритм повторяется до тех пор, пока схема замещения не будет сведена к набору параллельных цепочек. Определяются возможные дефициты мощности для расчетного случая – «состояния частичных отказов». Под дефицитом мощности понимается разность между требуемой мощностью и пропускной способностью элемента. Пропускная способность элемента соответствует максимально возможной мощности, которая может быть передана через элемент с учетом его перегрузочной способности и статической устойчивости системы. Определяется вероятность возможных дефицитов мощности, т.е. вероятность частичных отказов схемы с помощью теорем умножения вероятностей. При этом безотказное состояние эквивалентного элемента в цепочке обозначается  $K_{Г.С.}$ , а отказ -  $K_{П.С.}$ .

8. Параллельно соединенные цепочки эквивалентируются до одного элемента, для которого находятся показатели надежности, перечисленные в п. 5. Отказ этого элемента и соответствует полному отказу схемы для рассматриваемого расчетного случая.

9. Учитывается АВР по формуле полной вероятности.

10. Определяется расчетное время безотказной работы схемы и время ее восстановления (см. табл. 5).

11. Определяются недоотпуски электроэнергии и ограничения мощности для состояния частичных и полного отказов

$$\begin{aligned}
 W_{нед} &= \sum P_{деф_i} t_{деф_i} = \sum P_{деф_i} K_{П.С.}_i T; \\
 P_{огр} &= \sum P_{деф_i} K_{П.С.}_i,
 \end{aligned}
 \tag{163}$$



где  $K_{П.С.}$  – коэффициент вынужденного простоя системы, определенный для анализируемого расчетного случая с учетом АВР (т.е. по п. 9)

$T$  – анализируемый период по надежности.

12. Рассчитываются ущербы от частичных и полного отказов схемы.

Таблица 5. Расчетные формулы для аналитического метода

Последовательное соединение элементов	
без учета преднамеренных отключений	с учетом преднамеренных отключений
$\omega_c = \sum \omega_i$ <p>в схеме мало элементов:</p> $K_{П.С.} = \sum \omega_i t_{Bi}$ $K_{Г.С.} = \prod_{i=1}^n K_{Гi} = \prod_{i=1}^n p_i$ <p>в схеме много элементов:</p> $K_{Г.С.} = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{K_{Гi}} - 1 \right)}$ $k_{П.С.} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Pi}}{\sum_{i=1}^{n-1} K_{Pi} + 1}$ $t_{B.C.} = \frac{K_{П.С.}}{\omega_c}$	$\omega_c = \sum \omega_i + \omega_{np\text{НБ}}$ $K_{П.С.} = \sum \omega_i t_{Bi} + \left( \omega_{np} t_{np} \right)_{НБ}$ $K_{Г.С.} = \prod_{i=1}^n K_{Гi}$ $t_{B.C.} = \frac{K_{П.С.}}{\omega_c - \omega_{np\text{НБ}}}$
$T_C = \frac{1}{\omega_c}; T_P = -\ln(1 - \alpha)T = 0.105 \frac{1}{\omega_c}$	
Параллельное соединение элементов	
$\omega_c = \sum_{i=1}^n \omega_i \prod_{j=1}^n \omega_j t_{Bj}$ $K_{П.С.} = \prod_{i=1}^n \omega_i t_{Bi}$ $K_{Г.С.} = 1 - K_{П.С.}$	$\omega_c = \sum_{i=1}^n \omega_i \prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (\omega_j t_{Bj} + \omega_{ПРj} t_{ПРj})$ $K_{П.С.} = \prod_{i=1}^n \omega_i t_{Bi} + \sum_{i=1}^n \omega_{ПРi} t_{ПРi} k_{ПРi} \cdot \prod_{j=1}^n \omega_j t_j$ $k = 1 - e^{-\frac{t_{ПРi}}{t_{Bэкс}}}$
$T_C = \frac{1}{\omega_c}; T_P = 0,105 \frac{1}{\omega_c}; T_{B.C.} = \frac{K_{П.С.}}{\omega_c}$	
Модель выключателя	
$\omega_{"Q"} = \omega_{СТ} + \omega_{АВТ} \sum (1 + a_i K_{АПВ_i}) \omega_i + \omega_{ОП} N_{ОП}$ $q_{"Q"} = \omega_{СТ} t_{BСТ} + \omega_{АВТ} \sum (1 + a_i K_{АПВ_i}) \omega_i t_{Bi} + \omega_{ОП} N_{ОП} t_{ОП}$	
<p>Состояние: один элемент в работе, другой в отказе при их параллельном соединении</p> $p = K_{Г.С(1)} K_{П.С(2)} + K_{Г.С(2)} K_{П.С(1)}$	

В качестве примера ниже показано как составляются схемы замещения по расчетным схемам подстанций с примыкающими к ним линиями для расчетного случая «полное погашение подстанции» (состояние полного отказа).

*Материал, выносимый на самостоятельную проработку:* табличные методы расчета надежности; примеры по составлению схем замещения.

#### *Выводы*

1. Показана область применения аналитического метода расчета надежности ЭЭС.
2. Приведен алгоритм аналитического метода.
3. Рассмотрены примеры применения аналитического метода.

#### Лекция 9.

Логико-вероятностный метод оценки надежности систем с помощью деревьев событий.

*Цель лекции:* раскрыть сущность логико-вероятностного метода оценки надежности систем с помощью деревьев событий и показав как его применять в условиях эксплуатации и проектной практики.

#### *План лекции.*

1. Сущность и область применения логико-вероятностного метода оценки надежности систем с помощью деревьев событий (ЛВМ).
2. Алгоритм логико-вероятностного метода.
3. Примеры применения ЛВМ.

#### *Краткое содержание лекции.*

Метод, в котором структурная модель системы описывается средством математической логики, а количественная оценка надежности производится с помощью теории вероятностей называется логико-вероятностным (ЛВМ).

Число характерных задач, решаемых ЛВМ, включает в себя: определение пропускной способности переключателей, обоснование установки коммутационных аппаратов, выбор рационального варианта схемы системы.

Множество возможных состояний системы можно описать с помощью алгебры логики.

Логико-вероятностный метод заключается в описании схемы функцией алгебры логики, выражающей функцию отказа (можно работоспособности).

#### Алгоритм метода

- 1) Составляется эквивалентная структурная схема
- 2) Строится граф дерева событий на основе алгебры логики, начиная с нижнего яруса. При этом изображаются в кружках элементы, отказ которых приводит к отказу части системы. Затем элементы соединяются логическими связями  $\wedge$  или  $\vee$ , в зависимости от структуры надежности и обозначается вершинное действие, т.е. отказ.
- 3) Дается логическое описание отказов в системе на основе графа дерева событий (ДС). При этом работоспособность обозначается  $X$ , а отказ  $\bar{X}$ .
- 4) Осуществляется переход от логических переменных к вероятностным совместно с подстановкой соответствующих алгебраических знаков операции.
- 5) Рассчитывается численное значение вероятности отказов с учетом АВР.

#### Преимущества ЛВМ:

- 1) можно применять при любой логической структуре системы (не только при последовательно-параллельных логических схемах);
- 2) можно применять при любых распределениях наработки до отказа.

### Недостатки:

- 1) не всегда удается составить логическую функцию работоспособности или отказа, соответствующую рассматриваемой системе;
- 2) громоздкость метода для сложных систем преобразования.

Материал, выносимый на самостоятельную проработку: методы расчета надежности, основанные на булевой алгебре, метод псевдоэлементов, обобщенный метод.

### *Выводы.*

1. Показана сущность и область применения ЛВМ.
2. Рассмотрен алгоритм ЛВМ.
3. Приведены преимущества и недостатки ЛВМ.
4. Показаны примеры применения ЛВМ.

### Лекция 10.

Определение состояния полного отказа и безотказной работы схемы.

Расчет надежности распределительной сети 35-110 кВ.

*Цель лекции:* показать как определить вероятность полного отказа и работоспособного состояния схемы, привести основные формулы для расчета надежности распределительной электрической сети 35-110 кВ.

### *План лекции.*

1. Понятие о структурной и функциональной надежности.
2. Состояние полного отказа и безотказной работы схем.
3. Основные формулы для расчета надежности распределительной электрической сети 35-110 кВ.

### *Краткое содержание лекции.*

В надежности электроэнергетики можно условно выделить две составляющие:

- 1) одну, обусловленную структурой системы, т.е. составом элементов, их взаимосвязями, пропускными способностями, без количественного учета режимных особенностей функционирования элементов – структурная надежность;
- 2) другую, обусловленную особенностями режимов в системе, их ограничениями пропускных способностей элементов при изменении структурной системы в различных состояниях – функциональная надежность.

Такое подразделение условно, т.к. взаимосвязь этих составляющих очевидна, но оно позволяет упростить задачи оценки надежности сетей сложной структуры.

1. Схема, в которой отказ хотя бы одного элемента из  $n$  приводит к отказу относительно узла нагрузки, т.е. схема с последовательным соединением элементов в смысле надежности.

В ней число работоспособных состояний равно единице, а вероятность безотказной работы определяется по формуле:

$$P_C = \prod_{i=1}^n P_i ;$$

вероятность отказа равна:

$$q_C = 1 - \prod_{i=1}^n P_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) = \sum_{i=1}^n q_i - \sum_{i,j} q_i q_j + \sum_{i,j,k} q_i q_j q_k - \dots + \dots (-1)^{n-1} q_1 q_2 \dots q_n ; \quad (160)$$

число неработоспособных состояний такой схемы

$$N_{HP} = 2^n - 1.$$

2. Схема, в которой отказ всех  $n$  элементов приводит к отказу относительно узла нагрузки, т.е. схема с параллельным соединением элементов в смысле надежности.

В ней число состояний полного отказа равно единице, а

$$q_C = \prod_{i=1}^n q_i.$$

Вероятность работоспособного состояния схемы равна:

$$\begin{aligned} p_C &= 1 - \prod_{i=1}^n (q_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) = \\ &= \prod_{i=1}^n (p_i) - \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i,j} p_i p_j + \sum_{i,j,k} p_i p_j p_k - \dots + \dots (-1)^{n-1} p_1 p_2 \dots p_n, \end{aligned}$$

т.е. число работоспособных состояний схемы  $N_p = 2^n - 1$ .

Для реальных схем с произвольным соединением элементов число работоспособных и неработоспособных состояний будет находиться в диапазоне  $1 - 2^{n-1}$ . Этот диапазон исключительно велик.

Отсюда: если в системе в основном преобладают последовательные соединения элементов, то задача более быстро решается с выделением состояний работоспособности системы. При концентрированной структуре системы с большим числом поперечных связей между элементами и высокой степенью резервирования более быстрое решение задачи обеспечивается выделением состояний неработоспособности системы.

Ниже приведены упрощенные выражения для расчета показателей надежности на шинах понижающих подстанций 35(110)/10 кВ, полученные по средним условиям эксплуатации систем электроснабжения сельских потребителей /19/.

*Сеть без резервирования.*

а) По одной ВЛ 35(110) кВ.

Параметр потока отказов равен

$$\omega_{ПС} = 0,05 \pm \omega_{p310}, \quad )$$

где  $\omega_{p310}$  - частота отказов в работе РЗ в сети 10 кВ;

для сетей 10(35-110) кВ:

$$\omega_{p3} = \omega_{0\Sigma} l_{\Sigma} K_{p3} = (\omega_{0y} + \omega_{0ny}) l_{\Sigma} K_{p3},$$

где  $\omega_{0\Sigma}$  - удельный параметр потока отказов (устойчивых и неустойчивых);

$l_{\Sigma}$  - суммарная длина ВЛ соответствующего класса напряжения, присоединенных к шинам подстанции;

$K_{p3}$  - условная вероятность отказа в работе устройств РЗ.

Годовая продолжительность отключения

$$\theta_{ПС} = 1,8 + \omega_{p310} T_{перПС},$$

где  $T_{перПС}$  - среднее время оперативных переключений на подстанции.

Если на ПС есть дежурный персонал, то  $T_{\text{перПС}}=0,25\text{ч}$ , если переключения выполняются силами оперативно-выездной бригады (ОВБ), то:

$$T_{\text{перПС}} = 0,3 + l_{\text{ДПП-ПС}} K_{\text{кр}} \nu^{-1},$$

где  $l_{\text{ДПП-ПС}}$  - расстояние от места дислокации оперативно выездной бригады до ПС;

$K_{\text{кр}}$  - коэффициент кривизны дорог;

$\nu$  - скорость продвижения на автомашине.

б) По двум ВЛ 35(110) кВ:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= 0,05 \pm \omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= 1,8 + (\omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}) T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

в) По двум ВЛ и с двумя линейными выключателями:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= 0,16 \pm \omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= 0,5 + (\omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}) T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

г) По двум ВЛ и с выключателем в перемычке:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= \omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= (\omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}) T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

Здесь  $\omega_{\text{рз35}}$  - удельная частота отказов в работе РЗ в сети 35 кВ.

*Ручное резервирование от своей подстанции.*

а) По одной ВЛ 35(110) кВ:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= 0,05 \pm \omega_{\text{рз10}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= 1,8 + \omega_{\text{рз10}} T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

б) По двум ВЛ 35(110) кВ:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= 0,05 \pm \omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= 1,8 + (\omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}) T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

в) По двум ВЛ с двумя линейными выключателями:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= 0,2 + \omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= 0,6 + (\omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}) T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

г) По двум ВЛ с выключателем в перемычке:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ПС}} &= 0,08 + \omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}; \\ \theta_{\text{ПС}} &= 0,25 + (\omega_{\text{рз10}} + \omega_{\text{рз35}}) T_{\text{перПС}}. \end{aligned}$$

*Автоматическое резервирование от своей подстанции.*

а) По одной ВЛ 35(110) кВ:

$$\omega_{ПС} = 0,05 \pm \omega_{p310};$$
$$\theta_{ПС} = 1,8 + \omega_{p310} T_{перПС}.$$

б) По двум ВЛ 35(110) кВ:

$$\omega_{ПС} = 0,155 + \omega_{p310} + \omega_{p335};$$
$$\theta_{ПС} = 2,25 + (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{перПС}.$$

в) По двум ВЛ с двумя линейными выключателями:

$$\omega_{ПС} = 0,25 + \omega_{p310} + \omega_{p335};$$
$$\theta_{ПС} = 0,7 + (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{перПС}.$$

г) По двум ВЛ с выключателем в перемычке:

$$\omega_{ПС} = 0,03 + \omega_{p310} + \omega_{p335};$$
$$\theta_{ПС} = 0,3 + (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{перПС}.$$

*Ручное резервирование от соседней подстанции.*

а) По одной ВЛ 35(110) кВ:

$$\omega_{ПС} = \omega_{p310};$$
$$\theta_{ПС} = \omega_{p310} T_{перПС}.$$

б) По двум ВЛ 35(110) кВ:

$$\omega_{ПС} = 0,155 + \omega_{p310} + \omega_{p335};$$
$$\theta_{ПС} = 2,25 + (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{перПС}.$$

в) По двум ВЛ с двумя линейными выключателями:

$$\omega_{ПС} = 0,2 + \omega_{p310} + \omega_{p335};$$
$$\theta_{ПС} = 0,6 + (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{перПС}.$$

г) По двум ВЛ с выключателем в перемычке:

$$\omega_{ПС} = \omega_{p310} + \omega_{p335};$$
$$\theta_{ПС} = (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{перПС}.$$

*Автоматическое резервирование от соседней подстанции.*

а) По одной ВЛ 35(110) кВ:

$$\omega_{ПС} = 0,2 + \omega_{p310};$$

$$\theta_{ПС} = 2,5 + \omega_{p310} T_{нерПС}.$$

б) По двум ВЛ 35(110) кВ:

$$\omega_{ПС} = 0,2 + \omega_{p310} + \omega_{p335};$$

$$\theta_{ПС} = 2,5 + (\omega_{p310} + \omega_{p335}) T_{нерПС}.$$

Данные упрощенные выражения приведены для ПС с маломасляными выключателями.

Расчет показателей надежности сети 35(110)кВ выполняется в два этапа:

- 1) Расчет показателей надежности на шине 10 кВ ПС.
- 2) Расчет надежности для пар расчетных точек, от которых питаются взаимно резервируемые линии 10 кВ.

Материал, выносимый на самостоятельную проработку: топологические методы расчета надежности, примеры расчета надежности распределительных сетей 35-110 кВ.

#### Выводы.

1. Даны понятия структурной и функциональной надежности схем сетей и области их применения.
2. Показано как определяются вероятности полного отказа и безотказной работы схем сетей.
3. Рассмотрены основные формулы для расчета надежности распределительных сетей 35-110 кВ и даны примеры по их применению.

#### Лекция 11.

Особенности расчета надежности кольцевых, петлевых, сложноразветвленных схем.

Учет надежности коммутационных аппаратов и устройств РЗ.

*Цель лекции:* показать как рассчитывается надежность кольцевых, петлевых, сложноразветвленных схем и как учесть в расчете надежность КА и устройств РЗ.

#### План лекции.

1. Порядок расчета надежности петлевых схем.
2. Порядок расчета надежности кольцевых и сложноразветвленных схем.
3. Расчет надежности КА и РЗ.

#### Краткое содержание лекции.

Определение надежности петлевых схем показано на примере для лучшего усвоения данного материала.

#### Петлевая схема

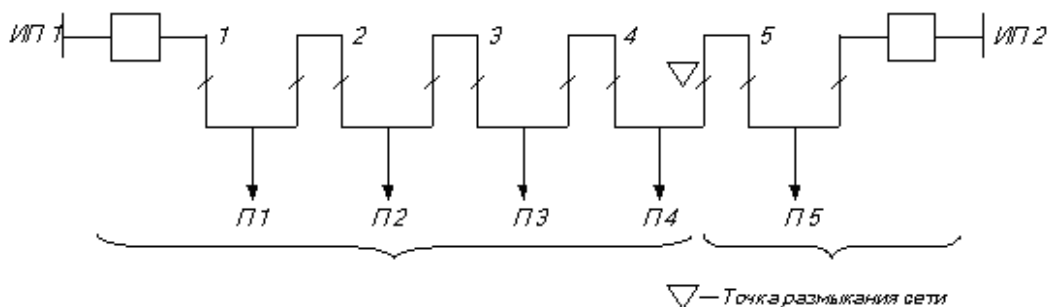


Рис.66. Результирующая распределительная сеть с двумя независимыми источниками питания

Нормальный режим – сеть разомкнута.

Здесь отказ любого элемента полуцепочки (а) или (б) приводит к обесточиванию любого потребителя на время прибытия оперативно-выездной бригады, поиска и локализации поврежденного элемента

$$T = T_0 + T_{ПВ} = T_0 + T' + T''(n) T,$$

где  $T_0$  - время от момента отказа до момента пробного включения линии;

$T_{ПВ}$  - время поиска и локализации поврежденного участка;

$T'$  и  $T''(n)$  - зависящая и не зависящая от числа  $n$  ТП в полуцепочке составляющая времени поиска и локализации поврежденного участка соответственно.

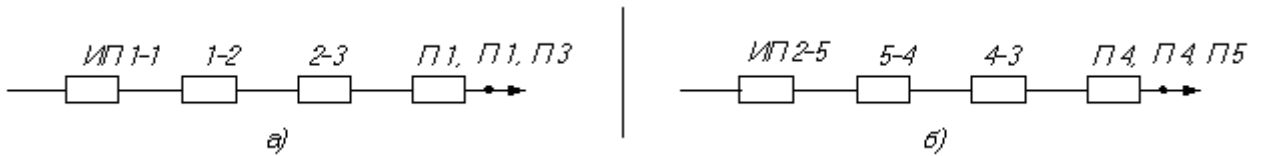


Рис.67. Схема замещения полуцепочки сети

Параметр потока отказов,  $\omega$ , для потребителей П1, П2, П3 определяется суммой  $\omega_i$  элементов соответствующей полуцепочки а);  $\omega$  для потребителей П4, П5 находится аналогично.

Повышение надежности ответственных потребителей обеспечивается дополнительным резервированием как показано на рисунке 68.

Расчет осуществляется аналогично предыдущему случаю

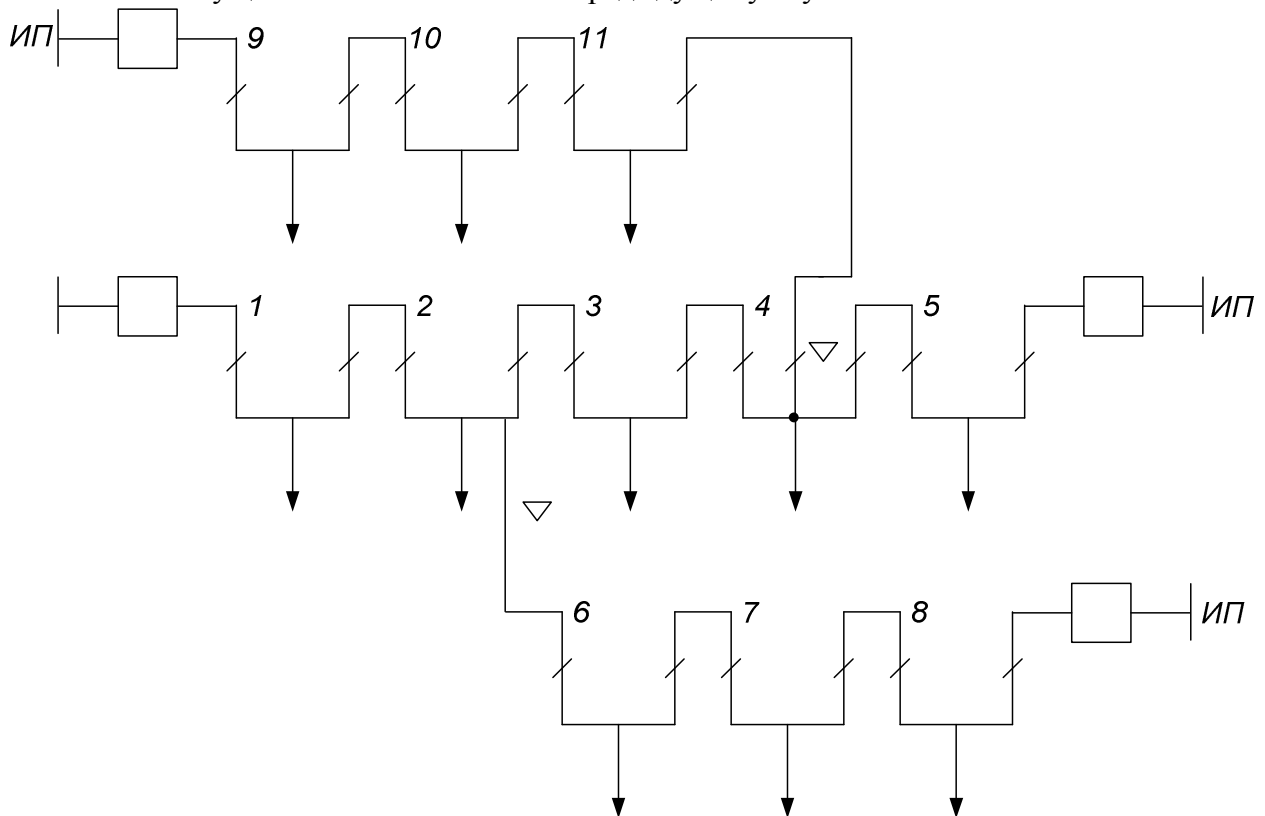


Рис.68. Петлевая схема сети с дополнительным резервированием



Вероятность одновременного отказа нескольких линий в таких схемах мала. Возможность одновременного обслуживания двух и более линий не исключается в ремонтных режимах. При отключении линий 10-11, 2-3, 6-7 схемы (рис. 68), все потребители получают питание, но из-за отсутствия действующего в данный момент резерва их надежность существенно уменьшается, поэтому анализ надежности с учетом ремонтного режима осуществляется на основе ситуационного моделирования.

Расчет надежности схем при наличии АВР должен производиться с учетом преднамеренных отключений и по формулам параллельного соединения элементов; то же для многолучевых схем

При расчете надежности кольцевых схем вначале определяют дефицит мощности, а затем вероятности этих дефицитов, т.е. потерь потребителями определенной мощности при отключении (отказе) одного или нескольких элементов. При этом пользуются теоремами вероятностей сложных событий. Рассмотрим пример.

Система передачи электроэнергии состоит из двух повышающих трансформаторов ( $T_1$ ), трёх ЛЭП (а,б,с) и двух понижающих подстанциями с трансформаторами  $T_2$ , и  $T_3$ . Пропускные способности ЛЭП и трансформаторов указаны в табл. 8.

Таблица 8. Исходные данные к задаче 9

Элемент сети	а	б	с	$T_1$	$T_2$	$T_3$
Пропускная способность, (МВА)	70	30	20	100/100	70/20/50	30/20
q	0,08	0,05	0,01	0,003	0,004	0,002

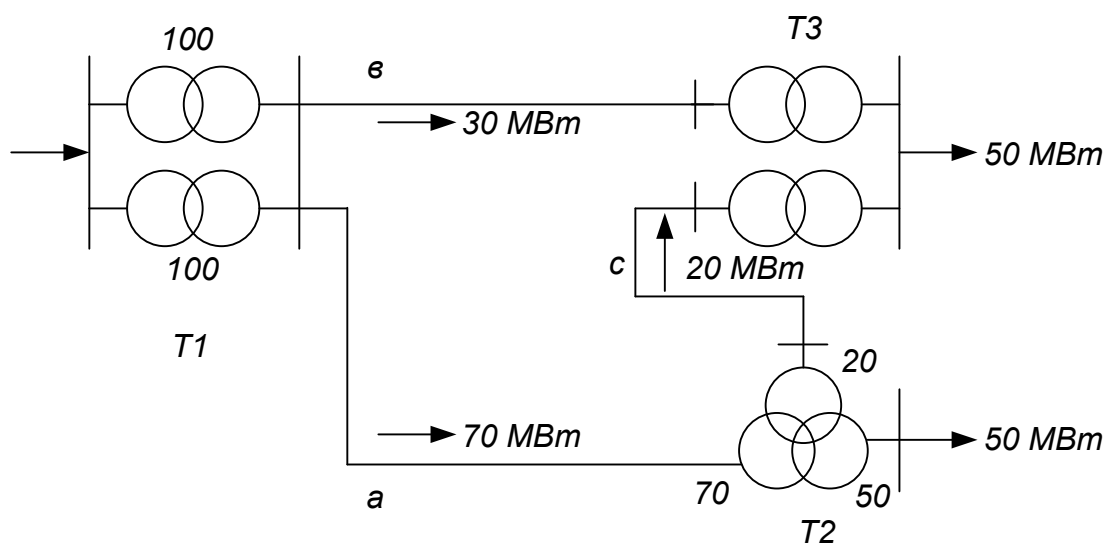


Рис.85 Схема электрической сети

Определить вероятность потери потребителями 50 МВт, 70 МВт.

#### Решение

При повреждении любой обмотки трёхобмоточного трансформатора он отключается. Для того чтобы потребители получали 50 МВт, необходима в любом случае работа:

1. хотя бы одного трансформатора ПС 1, т.е.  $T_1$ ;
2. обязательная работа ЛЭП - "а";
3. обязательная работа  $T_2$ .

Тогда вероятность потери потребителями 50 МВт:

$$\begin{aligned} p(P_{\text{оэф}} = 50 \text{ Мвт}) &= p(P_{\text{неп}} = 50 \text{ Мвт}) = (1 - q_{T1}^2) p_a p_{T2} [(q_6 + q_{T3} - q_6 q_{T3})(q_c + q_{T3} - q_c q_{T3})] = \\ &= (1 - 0,003^2)(1 - 0,08)(1 - 0,04)[(0,05 + 0,002 - 0,05 \cdot 0,002) \times \\ &\quad \times (0,01 + 0,002 - 0,01 \cdot 0,002)] = 5,73 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Аналогично рассуждая, определим вероятность потери 70 МВт и 30 МВт.

$$\begin{aligned} p(P_{\text{оэф}} = 70 \text{ Мвт}) &= p(P_{\text{неп}} = 30 \text{ Мвт}) = (1 - q_{T1}^2) p_B p_{T3} (q_a + q_{T2} - q_a q_{T2})(p_c + q_c)(p_{T3} + q_{T3}) = \\ &= 7,95 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p(P_{\text{оэф}} = 30 \text{ Мвт}) &= p_{T1} \{ q_{T3}^2 (1 - q_{T1}^2) [1 - q_B (q_a + q_c - q_a q_c)] + \\ &\quad + q_{T2}^2 (1 - q_{T3}^2) [1 - q_a^2 (q_B + q_c - q_B q_c)] \} = \\ &= 0,999 \{ 0,003^2 (1 - 0,002^2) [1 - 0,06(0,07 + 0,09 - 0,07 \cdot 0,09)] + \\ &\quad + 0,002^2 (1 - 0,003^2) [1 - 0,07(0,06 + 0,09 - 0,06 \cdot 0,09)] \} = 1,292 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Надежность сложноразветвленной схемы можно определять методом путей и минимальных сечений, либо выделением «особого элемента», в качестве которого берется поперечная связь и принять теоремы вероятностей сложных событий. Как это сделать показано в следующем примере.

Система передачи электроэнергии состоит из пяти линий передачи (см. рис.80) и двух понижающих трансформаторов в пункте 4.

Пропускная способность каждой линии относительно узла нагрузки п.4 составляет 100% мощности, передаваемой в п.4.

Пропускная способность каждого понижающего трансформатора 50%. вероятность отказов состояний линии А, В, С, Д, Е соответственно  $q_A=0,15$ ,  $q_B=0,1$ ,  $q_C=0,2$ ,  $q_D=0,12$ ,  $q_E=0,01$ , каждого трансформатора Т1  $q_{T1}=0,003$ .

Считая график потребления мощности в п.4 постоянным и неизменным в течение рассматриваемого периода времени, определить вероятность передачи 100%, 50%, и 0% мощности потребителю п.4.

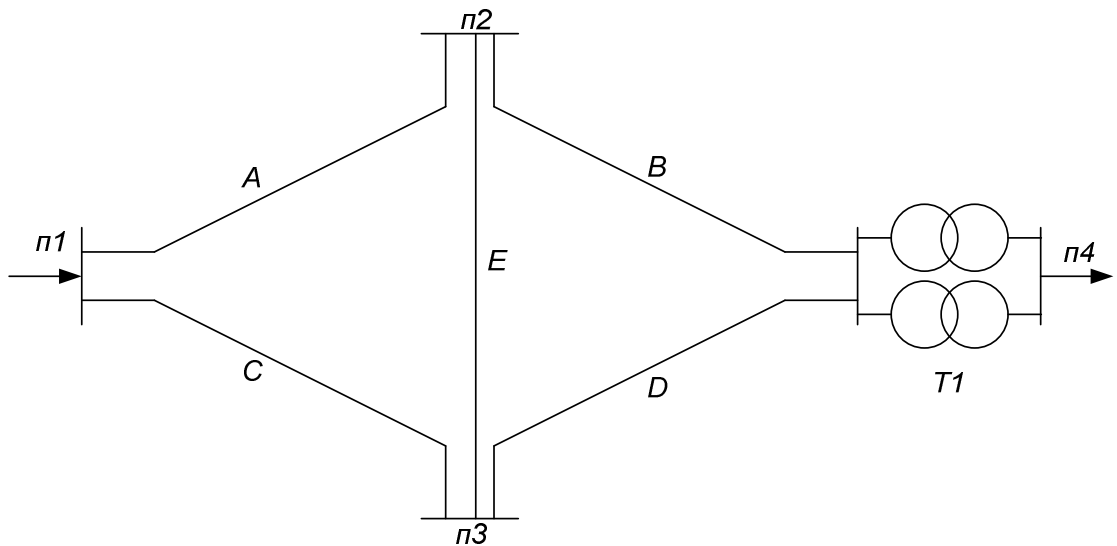


Рис.80  
50

### Решение

Для решения этой задачи неприменимы методы расчётов последовательных и параллельных соединений схем, поэтому целесообразно воспользоваться формулой полной вероятности. В качестве "особого" элемента целесообразно выбрать элемент Е.

1. Вероятность передачи полной мощности в п.4

$$P(100\%) = p_{т1}^2 \left\{ p_E (1 - q_A q_C) (1 - q_B q_D) + q_E [1 - (q_A + q_B - q_A q_B)] [1 - (q_C + q_D - q_C q_D)] \right\} = \\ = p_{т1}^2 p(F) = 0,9486.$$

2. Вероятность передачи 50% мощности:

$$P(50\%) = P(F) 2 p_{т1} q_{т1} = 0,953 \cdot 2 \cdot 0,003 \cdot 0,997 = 0,0057.$$

Здесь  $p(F)$  - вероятность надёжной работы системы относительно шин высшего напряжения ПС п.4.

3. Вероятность передачи 0% мощности, т.е. полной потери питания:

$$q = p(0\%) = 1 - p(100\%) - p(50\%) = 1 - 0,948 - 0,0057 = 0,0457$$

Как и элементы силовой сети, КА могут отказать в нормальном режиме. Такие отказы называют статическими (перекрытие опорной изоляции, перегрев и т.д.). В случае же воздействия на КА устройств РЗиА для выполнения ими основных функций по включению (отключению) может произойти отказ в удовлетворении требования на срабатывание. Такие отказы называются отказами функционирования, к ним относятся отказы в срабатывании (невыполнение РЗ и КА заявок на срабатывание), излишние срабатывания (срабатывание РЗ и КА при поступлении заявки на срабатывание не на данное устройство, а не на другое); ложные срабатывания (срабатывание КА и РЗ при отсутствии требований на срабатывание).

Вероятность несрабатывания РЗ и КА равна

$$q_{РЗиКА} = q_A = \frac{m_{РЗ} + m_{КА}}{M},$$

где  $m_{РЗ}$ ,  $m_{КА}$  - число несрабатываний за время  $t$  соответственно релейной защиты и коммутационной аппаратуры;

$M$  – общее число заявок на работу РЗ и КА.

Частота отказов (параметр потока) в расчетной точке сети

$$\omega_A = a q_A,$$

где  $a = K_n \omega_{овл} I_{вл}$ .

$K_n$  - коэффициент повышения числа требований на срабатывание за счет неустойчивых отказов

$\omega_{овл}$  - удельный параметр потока отказов ВЛ

$q_A$  - частота требований, поступающих на РЗ и КА, определяемая числом отказов защищаемого оборудования

Рассмотрим участок ЛЭП

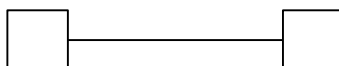


Рис.69. Участок ЛЭП

$$\omega_{уч} = \omega_B + \omega_{оВЛ} l_{ВЛ} + \omega_B ;$$

$$q_{уч} = 2\omega_B \cdot t_{B_B} + \omega_{оВЛ} l_{ВЛ} t_{B_{ВЛ}} .$$

Рассмотрим отказ шин РУ.

Частота отказов – параметр потока отказов, шин РУ как узлов СЭС:

1) отказ шин на время их ремонта

$$\omega_{ш} = \omega_{ош} N_{пр} ;$$

2) отказ любого присоединения ячейки РУ на время, необходимое для отсоединения и подачи питания

$$\omega_{пр} = \sum_1^N \omega_{яч.i} ;$$

3) отказ рабочего питания секции и несрабатывании РЗ и КА на питающей ВЛ или АВР и КА секционного выключателя на время, необходимое для подачи питания на секцию шин вручную:

$$\omega_{РЗ} = \omega_{раб} (q_{РЗ} + q_{АВР}) ;$$

4) при отказе в срабатывании РЗ и КА отходящих ВЛ на время отсоединения ячейки и подачи питания на шины

$$\omega_{отх} = \sum_1^n \omega_{ли} K_{ни} q_{РЗi} .$$

Материалы, выносимые на самостоятельную проработку: анализ надежности САПР, выбор резерва генерирующей мощности, сечение проводов ВЛ.

#### *Выводы.*

1. Показано как определяется надежность петлевых схем.
2. Показано как определяется надежность кольцевых и сложнзамкнутых схем.
3. Рассмотрены вопросы надежности КА и РЗ.

#### Лекция 12.

Надежность функционирования операторных (диспетчерских) эргатических систем в электрических сетях.

*Цель лекции:* показать как учесть влияние ошибок человека на надежность электрических сетей.

#### *План лекции.*

1. Понятие эргатическая система.
2. Параметры надежности диспетчера.
3. Количественная оценка информации.
4. Учет эргатического фактора при расчете надежности.

#### *Краткое содержание лекции.*

Эргатическая система – человеко-машинная система (ЭР). Эргатический элемент – человек.

ЭР различаются по целям функционирования на:

- а) производственные (выработка электроэнергии и т.п.);
- б) информационные (результат функционирования – новая информация);
- в) эксплуатационные (изменение структуры, ремонт, обслуживание).

Под надежностью функционирования ЭР понимают свойство системы сохранять устойчивость процесса, заключающееся в отсутствии отказов неэргатических элементов и ошибок эргатических элементов.

Показатели надежности человека различают в зависимости от степени потери работоспособности и условий функционирования.

Например, модель деятельности диспетчера охватывает большой комплекс оборудования, отличающегося разнородностью: технологическое, электротехническое, информационное, связи, АСДУ и т.п., и сложностью функционирования.

Цена отказа (ошибки) здесь велика, и это обстоятельство предъявляет повышенные требования к надежности ЭР.

Надежность диспетчера в ЭР характеризуется следующими параметрами:

- демографический отказ – неработоспособное состояние человека, в т.ч. биологический отказ (смерть);
- физиологический отказ – временная потеря работоспособности после 16-24 ч непрерывного функционирования (вероятность отказа увеличивается после 6-8 ч непрерывной работы);
- психологический отказ – ошибки персонала вследствие стресса или испуга.

Надежность системы зависит от структуры информации диспетчера, ее систематизации, глубины, связей.

Информация делится на:

- основную – о протекании технологического процесса управления сетями;
- дополнительную – поступающую от других диспетчеров;
- нормативную и справочную;
- сведения о внешних воздействиях.

Она количественно оценивается следующими показателями:

$$R_{ЭРИ} = R_{И} + R_{СКС} - R_{И}R_{СКС},$$

где  $R_{ЭРИ}$  – вероятность достоверной информации;

$R_{И}$  – вероятность правильной оценки информации диспетчером;

$R_{СКС}$  – вероятность безотказной работы систем контроля, измерения и сигнализации.

**Пример.** На подстанции произошло погашение одной из двух секций шин 10 кВ, питающих промышленное предприятие I категории. Каждая из секций подстанции имеет автоматическое включение резерва (АВР) от постороннего источника питания (рис.).

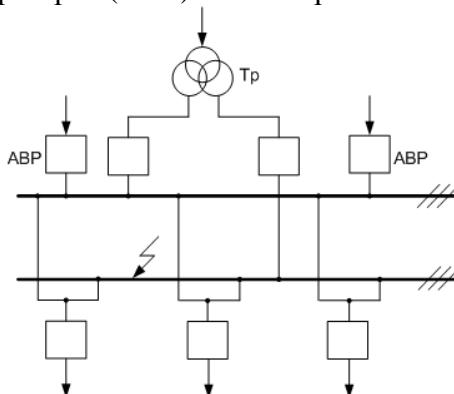


Рис. Схема РУ 10 кВ подстанции

Перед дежурным электромонтером стоят задачи по бесперебойному электроснабжению потребителя:

1) необходимость принятия решения по подаче напряжения на обесточенную секцию:

а) если АВР сработало неуспешно, то дежурный электромонтер должен повторно подать напряжение;

б) если АВР сработало успешно, то никаких оперативных действий электромонтер не предпринимает.

Вероятность необходимости принятия решения в обоих случаях –  $R_{п}$ ;

2) выбор альтернативного варианта в случае устойчивого КЗ на шинах отключившейся секции:

а) отключить присоединения от поврежденной секции;

б) перевести присоединения с поврежденной секции на другую.

Выбор альтернативного варианта осуществляется после принятия решения к действию и может привести к успешному или неуспешному исходу. Успешный исход выбора альтернативного варианта может произойти с вероятностью

$$R_A = R_{п} \cdot R_{\alpha},$$

где  $R_{\alpha}$  – вероятность правильного выбора варианта.

В случае отклонения правильного варианта (ошибка первого рода) приходится продолжать поиск альтернативного варианта. В случае принятия неправильного варианта (ошибка второго рода) произойдет неуспешный исход с вероятностью

$$P_A = R_{п} \cdot P_{\beta}.$$

*Учет эргатического фактора при расчете надежности*

а) действие эргатического элемента (человека), Э, одновременно с работой системы (техники), Т, без компенсации отказов:

вероятность безотказной работы системы

$$P_C = R_{\alpha} P_T;$$

б) действие Э одновременно с Т с компенсацией отказов или заменой одного элемента другим, т.е. в любой момент Э компенсирует отказы Т или Т устраняет ошибки Э:

вероятность безотказной работы системы

$$P_C = R_{\alpha} + P_T - R_{\alpha} P_T;$$

в) последовательность действий Э и работы Т:

вероятность безотказной работы системы

$$P_C = R_{\alpha} \varphi + R_T (1 - \varphi),$$

где  $\varphi$  – множество состояний при принятии решений;

$\varphi = 1$  – решение принято;

$\varphi = 0$  – человек не участвует в управлении системой (автоматизация процессов управления);

г) аварийное воздействие Э при отказах Т.

Работоспособные состояния Т и Э совместны при аварии:

$$P_C = R_{\alpha} R_T \varphi.$$

Работоспособные состояния Т и Э несовместны:

$$P_C = R_T (1 - \varphi).$$

Состояния ЭР несовместны с вероятностями этих состояний, т.е. возмущающий фактор исключает противоположное событие (управляющее воздействие в одном узле, а оценка надежности в другом):

$$P_c = \frac{R_T (1 - \varphi)}{1 - R_{\alpha} R_T \varphi}.$$

*Оперативные переключения*

1. Прием и оценка информации.

Вероятность достоверной информации – критерий оценки состояния схемы электрических соединений.

2. Принятие решений состоит в выборе одного из нескольких альтернативных вариантов, например: составить бланк переключений; воспользоваться типовыми; переключения производить без бланка двумя лицами или единолично и т.д.

При выполнении операции двумя лицами

$$R_{\text{Э}} = 2 R_{\text{Э}\alpha} - R_{\text{Э}\alpha}^2,$$

где  $R_{\text{Э}}$  – оценка действий оператора – вероятностное событие.

Или

$$R_{\text{Э}} = 2 R_{\text{Э}\beta} - R_{\text{Э}\beta}^2.$$

3. Совершение действий на основе принятого решения.

В перечне мероприятий расписываются отдельные действия, например: составление бланка переключений; уведомление потребителей о предстоящих переключениях; вызов представителей службы РЗ для их переключений в случае необходимости; проверка изолирующих средств; отключение и включение КА и заземляющих ножей; вывешивание плакатов по ТБ и установка ограждений.

Вероятность процесса функционирования системы и ее работоспособного состояния определяют по выражениям:

а) ЭР без компенсации отказов Э и Т

$$R_n = \frac{\varphi(F_0) R_{\gamma} R_{\delta}}{D_0 D_n},$$

где  $\varphi(F_0)$  – процесс принятия решения по результатам оценки информации;

$\varphi(F_0) = 0$  или  $1$ .

$$D_0 = \frac{1}{R_{\text{ЭРио}}}; \quad D_n = \frac{1}{R_{\text{ЭРин}}},$$

где  $R_{\text{ЭРио}}, R_{\text{ЭРин}}$  – вероятность достоверной информации, зависящая от надежности системы информации, которая может быть эргатической, здесь  $o$  – прием,  $n$  – оценка.

1) ЭР с компенсацией отказов Э и Т (рис.), система «слежения».

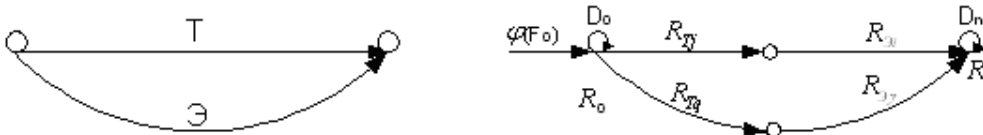


Рис. ЭР с компенсацией (слежение)

$$R_n = \varphi(F_0) \left[ R_{\text{Эи}} \cdot R_{\text{Тj}} + (1 - R_{\text{Эи}} \cdot R_{\text{Тj}}) \cdot R_{\text{Э}\gamma} \cdot R_{\text{Тq}} \right] / D_0 \cdot D_n.$$

2) ЭР с прямой связью (рис.), система «коррекции».

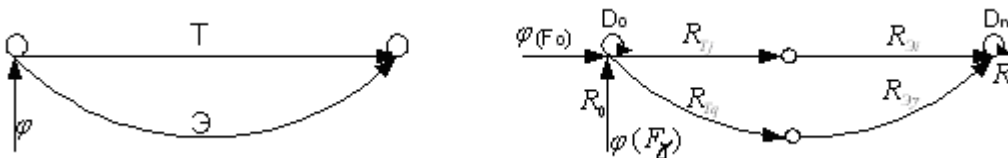


Рис. Коррекция

$$R_n = \left\{ \left[ \varphi(F_0) - \varphi(F_{\gamma}) \right] R_{\text{Эи}} \cdot R_{\text{Тj}} + \varphi(F_{\gamma}) \cdot R_{\text{Э}\gamma} \cdot R_{\text{Тq}} \right\} / D_0 \cdot D_n.$$

3) ЭР с обратной связью (рис.), система «аварийного воздействия».

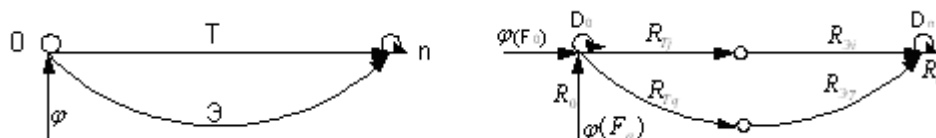


Рис. Аварийное воздействие

$$R_n = \left[ \varphi(F_0) - \varphi(F_q) \right] R_{\mathcal{E}} \cdot R_{T_j} / \left[ D_0 \cdot D_n - \varphi(F_q) R_{\mathcal{E}} R_{T_j} R_{\mathcal{E}'} \cdot R_{T_q} \right].$$

#### Выводы

1. Показано как учесть параметры надежности оперативного персонала, диспетчера при расчете надежности.
2. Дан порядок расчета надежности схем сетей с учетом эргатического фактора.

#### Лекция 13.

Понятие ущерба от отказа. Определение ущербов от перерывов в электроснабжении.

*Цель лекции:* ввести комплексный показатель надежности, позволяющий оценить надежность в денежных единицах измерения.

#### *План лекции.*

1. Определение ущерба от отказа или нарушения электроснабжения.
2. Удельные ущербы.
3. Ущерб, связанный с фактором внезапности.
4. Определения основного ущерба и ущерба внезапности от перерывов в электроснабжении.

#### *Краткое содержание лекции.*

Ущерб от отказа или нарушения электроснабжения – это комплексный показатель надежности электроснабжения потребителей, т.е. экономическая категория. Он характеризует свойство потребительской стоимости электроэнергии, поставляемой с определенной надежностью. Его применяют при подсчете штрафов, пени и неустоек, связанных с нарушением договорных обязательств, вызванных перерывами электроснабжения потребителей. При выборе стратегий оперативного и технического обслуживания учет фактора надежности осуществляется на основе количественной оценки ущерба.

Ущерб включает в себя:

- потери ресурсов при отказах;
- затраты на снижение потерь ресурсов при отказах;
- затраты на компенсацию негативных последствий отказов;
- затраты на снижение вероятности отказов;
- затраты на изменение критериев отказов – изменить минимальное время перерыва при отказе.

Потери ресурсов при отказах – нерационально использованная (без получения продукции) или уничтоженная часть средств труда, рабочего времени, готовой продукции – брак продукции, порча и уничтожение предметов труда, простой рабочей силы и средств труда, выпуск продукции пониженного качества и т.д.

Затраты на снижение потерь ресурсов при отказах – создание резервов производственной мощности с целью компенсации возможных недовыпусков продукции при перерывах электроснабжения и недоотпуске электроэнергии, мероприятия по защите окружающей среды, рассчитанные на снижение вредных последствий для окружающей среды при внезапном останове агрегатов и технологических установок потребителей.

Затраты на компенсацию негативных последствий отказов ЭЭС – затраты на



восстановление и наладку нарушенного технологического процесса или окружающей среды.

Затраты на повышение надежности ЭЭС или снижение вероятности отказов – это резервный переход на другое оборудование.

Все отмеченные составляющие ущерба можно определить оценочно с помощью удельных ущербов:

$Y_1$  – в расчете на 1 кВт·ч недоотпущенной электроэнергии и (или) 1 кВт отключенной мощности ( $Y_2$ ) и (или) на 1 ч перерыва электроснабжения ( $Y_3$ ).

Уточним взаимосвязь между объемом недовыпущенной продукции и объемом недоотпущенной потребителю электроэнергии. Величина недовырабатываемой предприятием продукции зависит не только от объема недополученной им электроэнергии, но и глубины ограничения, т.е. от соотношения между отключенной мощностью предприятия  $\Delta P$  и его максимальной нагрузкой в часы максимума нагрузки ЭЭС  $P_{max}$ .

При команде на осуществление разгрузки предприятие в первую очередь отключает второстепенные электроприемники, а по мере возрастания степени требуемой разгрузки в число отключенных попадают все более важные и на каком-то этапе прекращается технологический процесс. Это описывается коэффициентом эластичности.

Коэффициент эластичности недовыпуска продукции по недоотпуску электроэнергии

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Pi / \Pi_n}{\Delta W / W}.$$

где  $\Pi_n$  – плановый выпуск продукции;

$W$  – объем годового электропотребления при плановом выпуске продукции.

Отсюда объем недовыпущенной продукции определяется как

$$\Delta \Pi = \Pi_n \frac{\varepsilon' \Delta W}{W},$$

где  $\varepsilon' = \Delta P / P_{max}$  – фактическое значение коэффициента эластичности при данной степени ограничения нагрузки предприятия.

При определении  $\varepsilon'$  целесообразно использовать технологическую броню потребителя, которая отражается в графиках ограничения потребителей.

Рассмотрим составляющую ущерба, связанную с фактором внезапности отключения потребителей.

Ущерб, связанный с фактором внезапности определяется следующим образом /19/:

$$Y_{BH} = y_w \left[ W_{\delta} + W_{m,\delta} \alpha_c (1 - K_{ucn}) \right] + \begin{cases} y_p W_B & \text{при } W_B + W_{ав} \leq W_{рез}; \\ y_p W_B + y_w (W_B - W_{рез} - W_{ав}) & \text{при } W_B + W_{ав} > W_{рез}. \end{cases}$$

Здесь энергия, безвозвратно теряемая для народного хозяйства при отключении потребителя на время  $t$ :

$$W_{\delta} = W_{ц} \frac{t}{t_{ц}},$$

где  $W_{ц}$  – энергия, необходимая на технологический цикл;

$t_{ц}$  – время цикла.

$W_{m,\delta} = W_{ц} \frac{t_{ц} - t}{t_{ц}}$  – энергия, потраченная на изготовление бракованной продукции, т.к.

часть продукции будет не изготовлена;

$W_B$  – электроэнергия, которую необходимо затратить после восстановления электроснабжения до доведения технологического цикла от начала до того

- состояния, при котором произошло отключение;
- $K_{исп}$  - коэффициент, упорядочивающий степень возможного использования бракованной продукции;
- $\alpha_c$  - доля сырья в стоимости выпускаемой продукции;
- $y_w$  - удельный ущерб от недоотпуска (дефицита) электроэнергии;
- $W_{ав}$  - электроэнергия, недоданная во время ограничения;
- $y_p$  - удельный ущерб по мощности;
- $W_{рез}$  - предельная энергия, которую можно недодать потребителю за время ограничения, не нарушая график выдачи им продукции смежным предприятиям.

По полученным выражениям можно оценить ущерб, связанный с фактором внезапности при известных моментах наступления аварии после начала цикла – для анализа при фактических авариях.

В практических расчетах можно пользоваться удельными величинами ущерба.

В данном случае удобно отнести величину всего ущерба к мощности технологической брони, или к максимальной мощности рассматриваемого потребителя.

В первом случае

$$y_{ВН} = Y_{ВН} / P_{техн.брони} \cdot$$

Во втором

$$y_{ВН} = Y_{ВН} / P_{max} \cdot$$

Удельный (в расчете на 1 кВт·ч недоотпущенной электроэнергии) ущерб потребителя при ограничении или отключении электроэнергии с предупреждением определяется по формулам /19/:

$$y_n = y_{nl} \frac{\Delta P}{P_{max} - P_{техн.брони}} \text{ при } \Delta P \leq P_{max} - P_{техн.брони} ;$$

$$y_n = y_{nl} \text{ при } \Delta P > P_{max} - P_{техн.брони} \cdot$$

Удельный (в расчете на 1 кВт·ч недоотпущенной электроэнергии и 1 кВт отключенной мощности) ущерб потребителя при внезапном ограничении или отключении электроэнергии определяется по формулам:

$$y_B = y_{nl} \frac{\Delta P}{P_{max} - P_{техн.брони}} \text{ при } \Delta P \leq P_{max} - P_{техн.брони} ;$$

$$y_B = y_{nl} + y_{ВН} \text{ при } \Delta P > P_{max} - P_{техн.брони} \cdot$$

Ущерб потребителей из-за плановых ограничений

$$Y_{огр}^{пл} = W_{огр}^{пл} y_{пл}$$

или для одного часа

$$Y_{огр}^{пл} = P_{огр}^{пл} y_{пл} ,$$

где  $P_{огр}^{пл}$  - плановые ограничения потребителя в час;

$y_{пл}$  - удельный ущерб потребителя при плановых ограничениях.

Аналогично ущерб потребителей из-за диспетчерских ограничений

$$Y_{огр}^{дисп} = P_{огр}^{дисп} y_o^{дисп} \text{ или } Y_{огр}^{дисп} = \tau_{рем} P_{огр}^{дисп} y_o^{дисп} \cdot 8760 .$$

Основной ущерб – ущерб, обусловленный перерывом в электроснабжении, при

условии сохранения технологического процесса, оборудования, отсутствия брака, т.е. ущерб  $Y_0$  из-за невыполнения плана по производству продукции.

*Ущерб внезапности* – составляющая ущерба, связанная с появлением фактора внезапности, в результате которого могут произойти нарушения технологического процесса, брак, поломка оборудования и т.д.

Этот ущерб зависит от типа потребителя, величины недоданной энергии, глубины ограничения и наличия у потребителя резервов разного рода.

Если величина резервов достаточна, чтобы компенсировать невыработанную за время его ограничения по энергии продукцию. В этом случае недополученная электроэнергия за время ограничения компенсируется системой, и потребитель дорабатывает свою продукцию. В итоге нет ограничения по электроэнергии. Деформируется лишь режим ее потребления. Такой ущерб является по мощности  $Y_N$ , т.е.

$$Y_N = Z_{рез} = y_N \mathcal{E}_{нед},$$

где  $Z_{рез}$  - величина тех затрат, которые изъяты из доходов предприятия на создание резервов;

$y_N$  - удельный ущерб на создание резервов предприятия;

$\mathcal{E}_{нед}$  - предельная электроэнергия, которую допустимо недодать потребителю за время ограничения, не нарушая срыва графика выдачи им продукции сниженным предприятием.

Ущерб внезапности определяется по выражению:

$$Y_{BH}^{max} = y_{BH}(t_B) N^{max},$$

где  $y_{BH}(t_B)$  - удельный ущерб внезапности;

$N^{max}$  - max нагрузка потребителя.

$$y_{BH} = y_{BH}^{max}(t) \Delta N^{*\alpha},$$

где  $\Delta N$  - отключаемая мощность потребителя;

$\alpha$  - показатель степени /15/.

Ущерб каждого потребителя при отключении составит:

$$y = y_0 N_n t_{опр} + (y_0 + y_{BH} / t_{опр}) N_{тех\ бр} t_{опр},$$

где  $y_0$  - удельный основной ущерб;

$N_n$  - мощность потребителя, отключаемая в первую очередь;

$t_{опр}$  - длительность ограничения;

$N_{тех\ бр}$  - мощность технологической брони, отключаемая во вторую очередь при необходимости.

*Материал, выносимый на самостоятельную проработку:* экономико-математическая модель для оптимизации надежности; критерии эффективности и целевые функции; методы оптимизации.

#### Выводы

1. Даны основные понятия и определения ущербов.
2. Показано как влияет коэффициент эластичности, невыпуска продукции по недоотпуску электроэнергии на полный ущерб от перерывов электроснабжения.
3. Приведены выражения, позволяющие определить ущерб внезапности, основной ущерб, ущерб каждого потребителя при отключении.

## Лекция 14.

Критерии эффективной надежности. Задачи по обеспечению надежности.

*Цель лекции:* раскрыть экономический подход и задачи по обеспечению надежности электроснабжения.

*План лекции.*

1. Алгоритм определения ущербов от перерывов в электроснабжении.
2. Экономический подход к обеспечению надежности электроснабжения.
3. Принципы обеспечения надежности электроснабжения потребителей.
4. Механизм согласования интересов субъектов.
5. Задачи и средства обеспечения надежности.

*Краткое содержание лекции.*

Рассмотрим алгоритм определения ущербов от перерывов в электроснабжении.

1. Любой элемент схемы, который может отказать, заменяем прямоугольником. Эквивалентизируем схему электроснабжения до параллельных цепочек.
2. Определяем значения возможных дефицитов мощности при частичном перерыве в электроснабжении.

$$P_{дефи} = P_{треб} - P_{прони},$$

где  $P_{треб}$  - требуемая мощность.

3. Определяем вероятности данных дефицитов мощности с помощью теорем сложения и умножения вероятностей

$$p_i(P_{дефи}).$$

4. Определяем длительность возможных дефицитов мощности:

$$t_i(P_{дефи}) = p_i(P_{дефи}) T_{Г},$$

где  $T_{Г} = 8760 \text{ ч}$ .

5. Определяем математическое ожидание количества недоотпущенной электроэнергии потребителю при частичных перерывах в электроснабжении

$$\sum_i^n p_{дефи} t_i(P_{дефи}).$$

6. Эквивалентизируем схему до одного элемента и определяем вероятность полного перерыва в электроснабжении:

$$q_{пер} = q_{экв}.$$

7. Определяем математическое ожидание количества недоотпущенной электроэнергии при полном перерыве в электроснабжении:

$$\bar{W}_{пер} = P_{треб} q_{пер} T_{Г}.$$

8. Определяем суммарное количество недоотпущенной потребителю электроэнергии в результате частичных или полного перерывов в электроснабжении:

$$\bar{W}_{\Sigma} = \bar{W}_{нед} + \bar{W}_{пер}.$$

9. Находим основной ущерб

$$Y_{осн} = Y_0 \bar{W}_{\Sigma},$$

где  $Y_0$  - средняя величина удельного основного ущерба, руб/кВт.ч

Значения  $Y_0$  для различных отраслей и предприятий приведены в /17/.

10. Находим значение удельного ущерба внезапности при полном отключении при расчетной продолжительности отключения  $Y_{вн}$ . Для этого определим длительность полного перерыва в электроснабжении:

$$t_{пер.} = q_{пер} T_{Г}$$

и в зависимости от полученного значения по /17/ определяем удельный ущерб  $Y_{вн}$ , [руб /кВт].

11. Определяем ущерб внезапности  $Y_{вн}$  :

$$Y_{вн} = Y_{вн} P_{треб}$$

где  $P_{треб}$  - максимальная мощность предприятия.

12. Находим суммарный ущерб:

$$Y_{\Sigma} = Y_{осн} + Y_{вн}$$

Критерий эффективности с позиции электроснабжающей организации может быть найден с использованием общепринятой методики оценки эффективности инвестиционных проектов.

Критерием согласованной степени (эффективной) надежности объекта-системы электроснабжения может служить один из следующих:

1) чистый дисконтированный доход (ЧДД) эффективного (i-го) варианта объекта системы должен быть положительным и максимальным;

2) индекс доходности (ИД) i-го варианта должен быть не меньше 1 и максимальным;

3) внутренняя норма доходности (ВНД), определяемая из условия  $R - Z - Y = K$ , для эффективного (i-го) варианта объекта-системы электроснабжения должна быть не меньше нормы дисконта и максимальной;

4) срок окупаемости  $T_{ок}$  эффективного (i-го) варианта объекта-системы должен быть не больше периода  $T$  и минимальным.

Если субъект делает какие-то затраты на обеспечение надежности, то он должен быть уверен, что они будут оправданы с учетом ожидаемого риска, т.е. его расчетные затраты должны быть  $Z_{расч} = \bar{Z} + C_p Z_{ср}$ , где  $\bar{Z}$  - суммарные средние затраты, включая среднее значение ущерба, а  $C_p$  - цена риска.

Величина  $C_p$  зависит от допустимой степени риска и от того каким ресурсным потенциалом обладает субъект, принимающий решение.

Для потребителя электроэнергии важно оценить реальные затраты, которые он будет иметь из-за ненадежности электроснабжения и которые он мог бы закладывать, с одной стороны в договорные отношения с электроснабжающей организацией, а с другой – со смежными предприятиями в случае срыва поставок своей продукции к ним из-за недополучения электроэнергии.

Опыт и анализ проблемы показывают, что можно выделить следующие существенные факторы, которые определяют величину ущерба: тип потребителя и характер его производства (i), величину недоданной во время ограничения электроэнергии ( $\Delta E$ ), глубину ограничения по мощности ( $\Delta P$ ), время ограничения  $t_{огр}$ , степень внезапности, наличие технологических и иных резервов у рассматриваемого электропотребителя ( $E_{рез}$ ), момент наступления (t) и др.

Электроэнергетическая система обеспечивает необходимый уровень надежности в узлах основной электрической сети, от которых осуществляется питание схемы электроснабжения потребителя электроэнергией (питающих узлов). Этот необходимый уровень надежности в питающих узлах должен быть таким, чтобы при выбранной схеме электроснабжения обеспечивались интегральные требования потребителя по надежности электроснабжения его электроприемников. Отсюда следует, что требования по надежности в питающих узлах ЭЭС должен также формулировать потребитель. При этом ЭЭС должна определять свои возможности по обеспечению надежности в питающих узлах и оценивать затраты на их реализацию. Тогда потребитель будет анализировать

соотношение затрат на обеспечение надежности электроснабжения своих электроприемников за счет возможностей схемы электроснабжения и стоимости услуг ЭЭС по обеспечению некоторого уровня надежности в питающих узлах. На основе такого анализа потребитель будет выбирать наиболее рациональное решение по соотношению этих двух направлений обеспечения надежности электроснабжения.

В рыночных условиях надежность – это услуга, обеспечивающая выполнение необходимых требований по надежности электроснабжения потребителей. Стоимость этой услуги определяется на рыночной основе, т.е. взаимные обязательства электроснабжающей организации и потребителя и ответственность за их выполнение имеют экономическое выражение и реализуются через соответствующие двух- или многосторонние договоры. При этом нормативный принцип остается на уровне фиксации требований конкретных электроприемников к частоте, продолжительности и глубине перерывов электроснабжения, что выражается затем в требованиях к схеме электроснабжения и уровню надежности в питающих узлах и закрепляется через категорирование электроприемников. Таким образом, имеет место сочетание рыночного и нормативного подходов, хотя роль нормативной составляющей вспомогательная.

Оптимизация надежности с учетом ущербов у потребителей.

Подобная постановка задачи возникает тогда, когда электроснабжающая организация и потребители принадлежат одному собственнику. Реальный ущерб у потребителя от ненадежности электроснабжения обозначен  $Y_i^*$ .

Тогда задача запишется в виде  $\min(K_i + Z_i + Y_i^*)$ .

Возможны также разновидности данной постановки задачи при условиях, когда необходимо знание реальных характеристик удельных ущербов.

Механизм согласования интересов субъектов.

В общем случае оба субъекта отношений – электроснабжающая организация и потребитель – имеют разные критерии надежности, которые не совпадают. Рассмотрим возможный механизм взаимоотношений субъектов с целью нахождения компромиссного решения по обеспечению надежности электроснабжения. Наиболее общим критерием для всех субъектов является критерий максимума чистого дисконтированного дохода (ЧДД). Рассмотрим этот критерий для энергоснабжающей организации и потребителя.

Для энергоснабжающей организации  $\text{ЧДД}_o = D_o + D_n - Z - Y \rightarrow \max$ ,

где  $D_o$  - суммарный приведенный доход от реализации электроэнергии за период  $T$ ;  $D_n$  - суммарный приведенный доход от оплаты потребителем за надежность за период  $T$ ;  $Z$  - суммарные приведенные затраты на функционирование электроснабжающей организации, включающие приведенную долю капитальных затрат и текущие издержки за период  $T$ ;  $Y$  – суммарный приведенный ущерб (выплаты потребителям за недостаточный уровень надежности электроснабжения по отношению к согласованному уровню, зафиксированному в договоре на электроснабжение между электроснабжающей организацией и потребителем за период  $T$ ).

Для потребителя  $\text{ЧДД}_n = P_p - Z_o - Z_n + Y - Y^* \rightarrow \max$ ,

где  $P_p$  - суммарный приведенный доход от реализации продукции потребителя без затрат на электроснабжение;  $Z_o$  - суммарные приведенные затраты на оплату электроснабжения (имеется в виду, что потребитель не только покупает электроэнергию, но и проводит у себя некоторые мероприятия для ее приема);  $Z_n$  - суммарные приведенные затраты на оплату надежности;  $Y$  - суммарный приведенный ущерб, компенсируемый энергоснабжающей организацией;  $Y^*$  - полный суммарный приведенный ущерб потребителя от ненадежности электроснабжения.

Очевидно, что потребитель имеет полный ущерб от ненадежности электроснабжения, равный  $Y^*$ , но часть этого ущерба, соответствующая недостаточному уровню надежности электроснабжения по отношению к согласованному уровню, зафиксированному в договоре на электроснабжение между электроснабжающей организацией и потребителем, равное  $Y$ , компенсируется электроснабжающей организацией.

При заданной реализации электроэнергии и соответственно затратах интерес электроснабжающей организации определяется критерием  $D_n - Y \rightarrow \max$ . Для потребителя же  $Y - Y^* - Z_n \rightarrow \max$ . При этом для совокупного потребителя, суммарно представляющего всех потребителей, обслуживаемых данной энергоснабжающей организацией,  $Z_n = D_n$ .

Если электроснабжающая организация сможет эффективно использовать средства  $D_n$  и повысить надежность электроснабжения, снизив выплаты ущерба в большей степени, чем произведенные затраты на надежность из  $D_n$ , то она получит дополнительную прибыль. Следовательно, у электроснабжающего предприятия появляется стимул эффективного повышения надежности.

Потребитель же заинтересован в получении большей компенсации  $Y$ , чем стоит оплата надежности  $Z_n$ . Если он заявляет необходимую ему надежность заданием величины удельных ущербов (из-за внезапного отключения мощности) и (из-за недоотпуска электроэнергии), то повышение  $Y$  можно обеспечить, увеличивая величины удельных ущербов. Однако при этом возрастает оплата надежности потребителем, которая должна зависеть от величины удельных ущербов. Кроме того, электроснабжающая организация постарается повысить надежность именно этого потребителя, чтобы уменьшить  $Y$ .

Т.о., рассматриваемый экономический механизм взаимоотношений электроснабжающей организации и потребителя обеспечивает экономический баланс их интересов, представляет потребителю право выбрать любую надежность, задавая свои характеристики удельных ущербов. Электроснабжающая организация за счет соответствующего назначения оплат потребителем надежности электроснабжения может стимулировать потребителя анализировать свои реальные характеристики удельных ущербов, не завышая их чрезмерно. Все это создает экономические стимулы для эффективного повышения электроснабжающей организацией надежности электроснабжения и позволяет потребителям рационализировать свои требования по надежности электроснабжения. Рационализация этих требований сводится к тому, что потребителю оказывается выгодным назначать значения удельных ущербов равными реальным. Завышение этих значений требует повышенной оплаты за надежность, а занижение не полностью компенсирует ущербы от недостаточного уровня надежности электроснабжения.

Следуя системному подходу, можно структурировать общую задачу надежности следующим образом (рис.).

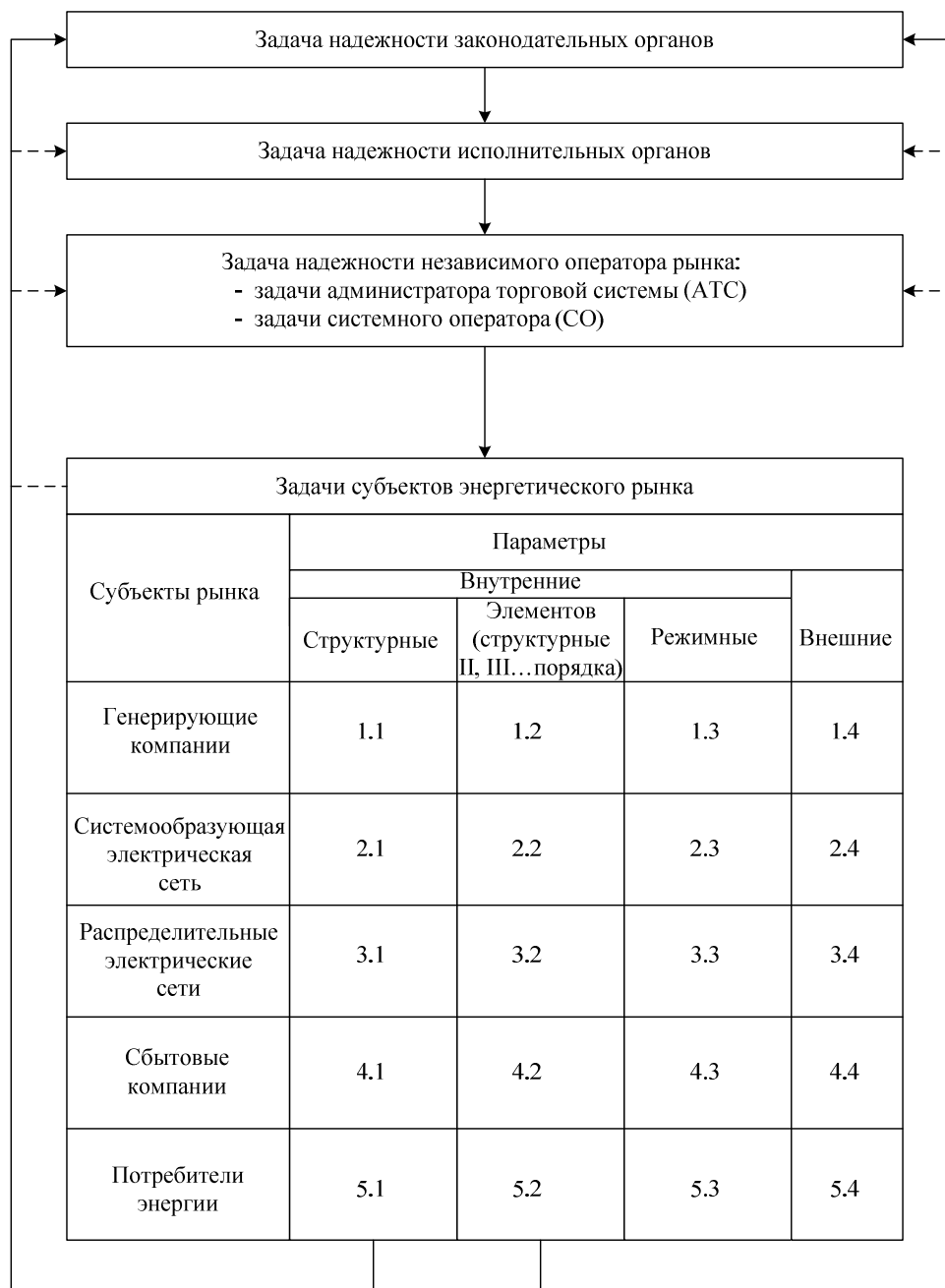


Рис. Структуризация задач надежности

### **Задачи законодательных органов власти**

Разработка и принятие законов и законодательных актов (Закон об энергетике, Гражданский кодекс, Указы Президента и др.), их последующее улучшение, которые во многом определяют организацию энергетики, отношения между субъектами, права, ответственность, нормы и стандарты по надежности, ограничение на использование тех или иных энергоресурсов, энергетическую безопасность страны, регионов и т.д.

Решают эти задачи на основе политических, экономических, экологических критериев. В результате их решения определяются параметры среды, в которой функционирует и развивается экономика, в том числе и энергетика, формируются требования к энергетике, ее надежности.

### **Задачи исполнительных органов власти**

Разработка и реализация энергетических стратегий (политик) страны, регионов, установление льгот и ограничений на использование энергетических ресурсов, их квотирование, установление норм, контроль и регулирование уровня надежности энергоснабжения, уровня энергетической безопасности.



Решают эти задачи преимущественно на основе экономических и экологических критериев. В результате их решения уточняются и конкретизируются требования к энергетике, ее надежности, выявляются параметры для мониторинга и определяются законы регулирования.

#### **Задачи надежности независимого оператора электроэнергетического рынка**

##### *Задачи администратора торговой системы.*

Определение состава и объемов необходимых резервов мощности и организация рынка резервов.

Решение этих задач осуществляется на основе конкретных ценовых критериев (закона спроса-предложения).

В результате их решения определяются ценовые сигналы по резервам мощности, уточняются их структура, размеры, размещение в энергосистеме и др.

##### *Задачи системного оператора.*

Определение рациональных правил, алгоритмов использования выделенных резервов мощности, пропускной способности электрических сетей, в том числе рациональной величины включенного резерва мощности.

Выявление рациональных масштабов привлечения отключаемых потребителей для обеспечения надежности энергоснабжения и разработка систем противоаварийной автоматики (автоматической частотной разгрузки – АЧР, специальной автоматики отключения нагрузки – САОН и др.), разработка законов регулирования и др.

Решение этих задач осуществляется на основе экономических критериев и нормативов надежности. В результате их решения, помимо указанных выше, определяется уровень надежности, который системный оператор обеспечивает потребителям энергии.

#### **Задачи надежности субъектов энергетического рынка**

(номера задач см. на рис.)

##### 1.1. Определение:

- структуры генерирующих мощностей с учетом их надежности;
- структуры резервов генерирующих мощностей (по виду резервов, их размерам, размещению по энергоузлам системы и т.п.).

##### 1.2. Определение:

- единичной мощности агрегатов электростанции с учетом надежности;
- схем коммутации оборудования электростанций с учетом надежности;
- системы организации ремонтного обслуживания оборудования электростанций.

##### 1.3. Планирование:

- режима использования оборудования электростанций с учетом его надежности;
- рационального включенного резерва;
- сроков и объемов проведения ремонтов оборудования электростанций;
- объема топлива на складах электростанций.

##### 1.4. Определение:

- требований, в том числе и по надежности к оборудованию, поставляемому на электростанции;
- требований к ремонтному обслуживанию, осуществляемому внешними организациями.

2.1. Определение структуры системообразующей электрической сети с учетом надежности ее оборудования и степени реализации системных эффектов, в том числе и по надежности (взаиморезервирования и сокращения резервов др.).

##### 2.2. Определение:

- параметров линий электропередачи (пропускная способность, материал и конструкция с учетом климатических условий прохождения и т.п.), подстанций и коммутационных пунктов (схем коммутаций, управляемости, резервирования аппаратуры, трансформаторов и т.п.);

- системы ремонтно-эксплуатационного обслуживания электрических сетей (количество и размещение ремонтно-производственных баз, количество подстанций с обслуживающим персоналом на подстанции, на дому, количество оперативно-выездных бригад и т.п.).

### 2.3. Планирование:

- режимов использования сети с учетом ее надежности, ограничений по пропускной способности;
- ремонтных воздействий (объемов, сроков и т.д.).

2.4. Определение требований по надежности к поставляемому в электрические сети оборудованию (к коммутационной аппаратуре: выключателям, разъединителям, отделителям; трансформаторам; компенсирующим устройствам; арматуре; изоляции и т.д.).

3.1 – 3.4. Эти задачи по форме подобны задачам 2.1 – 2.4, отличие их – в функциональном значении этих сетей. Кроме того, следует ожидать отличие еще и в том, что за надежность на выходе генерирующей подсистемы и системообразующей сети в конечном итоге отвечает Системный Оператор, а за надежность на выходе распределительной сети отвечает распределительная сетевая компания.

4.1 – 4.4. Одной из главных общих задач здесь будет переупаковка порций энергии, закупаемой сбытовой компанией на оптовом рынке (рынке резервов, балансирующем рынке, на бирже) или прямо у производителей, в свои обязательства перед розничными потребителями.

В итоге решения должны быть получены в виде «меню», в котором розничному потребителю предлагается электроэнергия с разными параметрами (одноставочными, двухставочными и другими тарифами, в том числе с различной надежностью). Нормативная документация такого рода еще разрабатывается

5.1 – 5.4. Суть этих задач будет заключаться в выборе сбытовых компаний и выработке решений по установлению договорных отношений с ней, в том числе и по надежности электроснабжения.

Далее, на основе этих договорных отношений – выработка решений о степени технологического резервирования, размеров запаса и других мероприятий по снижению ущербов от ненадежности на самом предприятии потребителя электроэнергии.

Решение всех задач 1.1 – 5.4 осуществляется на основе экономических и нормативных критериев, на основе функций полезностей соответствующих субъектов. В результате их решения, помимо указанного выше, вырабатываются также правила, инструкции для деятельности персонала в возможных ситуациях.

Создание объекта (системы электроснабжения), выполняющего заданные функции, обычно начинается с анализа существенных процессов, которые должны протекать в его элементах (например, потоки мощности в элементах электрической сети), а затем подбора элементов, которые обеспечат протекание этих процессов.

Очевидно, от количества и качества элементов будут зависеть работоспособность объекта, его способность выдерживать возможные возмущения, перегрузки, т.е. надежность.

Создание запаса прочности элементов является одним из средств повышения надежности систем электроснабжения.

Надежность объекта- системы определяется не только прочностью конструкций материалов, из которого изготовлены элементы, но и тем, как вообще структурированы элементы системы. Та же электрическая сеть может быть построена по кольцеобразной, радиальной или смешанной схеме. И во всех этих вариантах сети даже при одинаковых запасах прочности в элементах надежность ее будет различной. Это следует из известного положения, что структура объекта во многом обуславливает его свойства. Следовательно, определенным образом направленная структуризация объекта (системы) при его создании также является средством обеспечения надежности.

Резервирование (лат. *reservo* – сберегаю, сохраняю) – повышение надежности системы введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения системой заданных функций. Различают следующие виды.

*Структурное резервирование* - метод повышения надежности системы, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру системы (например, установка дополнительных трансформаторов на подстанциях, когда пропускная способность еще не исчерпана.).

*Временное резервирование* - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения объектом его заданных функций.

*Информационное резервирование*- метод повышения надежности объекта, предусматривающий исполнение избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения заданных функций.

*Функциональное резервирование* – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных или наряду с ними.

*Нагрузочное резервирование* - метод повышения надежности объекта, предусматривающий способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных. Как правило, здесь временное повышение степени использования (увеличения объема выполняемых функций) осуществляется за счет более быстрого срабатывания ресурса объекта.

В зависимости от схемы использования резервного элемента в системе различают:

- общее резервирование, при котором резервируется объект в целом;
- раздельное резервирование, при котором резервируются отдельные элементы системы или их группы;
- скользящее резервирование (резервирование замещением), при котором группа основных элементов системы резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе.

В зависимости от использования резервного элемента различают:

- нагруженный резерв, когда резервный элемент находится в том же режиме загрузки, что и основной;
- облегченный резерв, когда резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной;
- включенный резерв (в энергетической практике часто называемый «горячим»), когда резервный элемент готов в любое время взять на себя функции резервного элемента;
- невключенный резерв (в энергетической практике часто называемый «холодным»), когда требуется определенное время для ввода резервного в работу.

Адекватная система управления является эффективным средством обеспечения надежности.

Задачи надежности при развитии систем электроснабжения включают следующие:

- анализ состава электроприемников потребителя и определение параметров электроприемников различных категорий по надежности;
- формирование элементов схем внутреннего электроснабжения потребителя с учетом требований по надежности;
- оценка показателей надежности вариантов схем внутреннего электроснабжения потребителя;
- выбор наиболее рациональной схемы внутреннего электроснабжения потребителя при использовании заданных средств обеспечения надежности;

- формирование вариантов схем внешнего электроснабжения потребителей с учетом требований по надежности;
- оценка показателей качества надежности вариантов схем внешнего электроснабжения потребителей;
- выбор наиболее рациональной схемы внешнего электроснабжения потребителей при использовании заданных средств обеспечения надежности;
- выбор средств релейной защиты, автоматики и управления для обеспечения надежности системы электроснабжения;
- определение требований по надежности к поставляемому в системы электроснабжения оборудованию (коммутационная аппаратура, трансформаторы, изоляция и др.).

Задачи функционирования.

Основной смысл задач надежности при функционировании систем электроснабжения потребителей заключается в поддержании уровня надежности электроснабжения, заложенного при проектировании этих систем. Состав решаемых задач надежности включает следующие:

- планирование технического обслуживания и ремонтов оборудования;
- диагностика состояния оборудования;
- планирование работ по обнаружению и ликвидации отказов и повреждений оборудования;
- анализ эксплуатационных схем и режимов системы электроснабжения с точки зрения требований по обеспечению надежности электроснабжения потребителей;
- оценка надежности системы электроснабжения при различных ее эксплуатационных схемах и режимах;
- выбор установок релейной защиты, управляющих воздействий автоматики, уставок устройств для обеспечения надежности системы электроснабжения потребителей;
- формирование договорных отношений между электроснабжающими организациями и потребителями, включающих экономические механизмы взаимной ответственности за обеспечение надежности электроснабжения.

В результате решения указанных задач, помимо обеспечения надежности электроснабжения потребителей, вырабатываются правила, инструкции для деятельности эксплуатационного персонала в возможных ситуациях.

*Материал для самостоятельной проработки:* нормативный подход к обеспечению надежности, интервальный метод сопоставления вариантов систем электроснабжения с учетом надежности; структура средств обеспечения надежности.

#### *Выводы*

1. Приведен алгоритм расчета ущербов от перерывов в электроснабжении.
2. Показан экономический подход к обеспечению надежности, основанный на механизме согласования интересов субъектов.
3. Охарактеризованы принципы, задачи и средства обеспечения надежности.

### **III. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ**

#### **3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий**

Практические занятия проводятся для того, чтобы студенты получили навыки и умения в анализе надежности электрических станций, подстанций, электрических сетей, систем электроснабжения, электроэнергетических систем, а также для закрепления теоретического материала, изученного на лекциях и самостоятельно. Итогом практических занятий является выполнение расчетно-графической работы по реальным объектам энергетических компаний Дальневосточного региона.

В результате проведения практических занятий студенты должны научиться рассчитывать и анализировать показатели надежности типовых схем РУ ПС и электростанций, и всех подсистем энергетической системы с учетом средств релейной защиты и автоматики, применять полученные навыки к определению надежности реальных схем энергетических компаний, уметь определять недоотпуска электроэнергии и ущербы от них при перерывах в электроснабжении, выбирать средств обеспечения надежности.

Согласно учебным планам при изучении дисциплины предусмотрено 14 практических занятий и расчетно-графическая работа.

Перечень практических занятий.

1. Применение методов теории вероятностей для анализа надежности простейших схем.
2. Определение вероятностей отказов и безотказной работы систем.
3. Модели отказов нерезервированных и резервированных систем.
4. Учет АВР при расчете надежности электрических схем энергосистем.
5. Оценка надежности состояния схем.
6. Составление расчетных схем и схем замещения, типовых схем РУ подстанции и станций.
7. Расчет надежности систем аналитическим методом.
8. Расчет надежности систем логико-вероятностным методом.
9. Оценка надежности систем методом путей и минимальных сечений.
10. Определение надежности распределительных сетей 35-110 кВ.
11. Расчет надежности кольцевых и петлевых схем сетей.
12. Расчет надежности сложнозамкнутых схем энергосистем.
13. Определение ущербов от перерывов электроснабжения.
14. Обзор всех типов задач.

В процессе обучения студенты используют для расчета и анализа надежности информационные и компьютерные технологии. Практические занятия проводятся с привлечением программных комплексов Excel, MathCad, Visio, используется банк данных кафедры по реальным схемам энергокомпаний и промышленных предприятий Дальневосточного региона.

Практические занятия рекомендуется проводить согласно следующему плану.

План проведения практического занятия.

1. Цель занятия.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Блиц-опрос студентов.
4. Решение задач.
5. Анализ качества выполнения индивидуальных домашних заданий и разбор типовых ошибок.
6. Выводы и обобщение результатов.
7. Домашнее задание и задание на самостоятельную проработку.

На первом занятии целесообразно устроить входной контроль, на последнем – комплексную проверку качества знаний студентов.

При изложении кратких теоретических сведений рекомендуется систематизировать и обобщить материал, выделив при этом главные моменты. В процессе изложения материала целесообразно вовлекать студентов в его анализ, активизировать процесс мышления студентов за счет средств интенсивного обучения.

Блиц-опрос студентов или небольшая самостоятельная работа по теме практического занятия позволят лучше усвоить ход решения задач, понять их сущность.

При решении задач можно использовать разные формы. Например, преподаватель, решая задачу на доске, поясняет ее и привлекает к работе всю группу путем вопросов, постоянно подводя студентов к правильному решению.

Другая форма решения задач - самостоятельная работа студентов под контролем преподавателя с пояснением наиболее трудных моментов. Возможно решение задачи на доске студентом, но в этом случае преподаватель руководить процессом решения и вовлекает в работу всю группу.

Как правило, защита индивидуальных домашних заданий должна проводиться во внеаудиторное время, а на практическом занятии следует показать типовые ошибки, проанализировать результаты выполнения и защиты индивидуальных заданий, отметить лучшие и худшие из них, предложить студентам в виде деловой игры принять решение по устранению замечаний. Индивидуальное домашнее задание может выдаваться по расчетно-графической работе.

В конце практического занятия преподаватель называет тему следующего, указывает разделы теоретического материала, которые студент должен освоить для наиболее эффективного решения задач, выдает домашнее задание.

В процессе проведения практических занятий используются классические и современные педагогические технологии.

### 3.2. Методические указания по проведению практических занятий

#### Практическое занятие № 1.

#### «Применение методов теории вероятностей для анализа простейших схем»

*Цель занятия:* научиться определять вероятности отказов и безотказной работы простейших схем электрических сетей с помощью теории вероятностей.

При подготовке к практическому занятию используется материал, изложенный в [1, 2, 4].

#### Примеры решения задач.

**Задача 1.** Определить вероятность перерыва электроснабжения в схеме, показанной на рис.

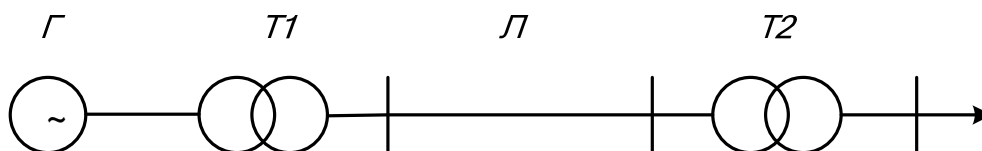


Рис. Схема электропередачи

Известны вероятности отказов элементов схемы:

$$q_G = 2 \cdot 10^{-3}; \quad q_{T1} = 5 \cdot 10^{-5}; \quad q_L = 2 \cdot 10^{-3}; \quad q_{T2} = 4 \cdot 10^{-5}.$$

Определим вероятности безотказной работы каждого элемента схемы как противоположное событие

$$p_G = 1 - q_G = 1 - 2 \cdot 10^{-3} = 0,998;$$

$$p_T = 1 - q_{T1} = 1 - 5 \cdot 10^{-5} = 0,99995;$$

$$p_L = 1 - q_L = 1 - 2 \cdot 10^{-3} = 0,998;$$

$$p_{T2} = 1 - q_{T2} = 1 - 4 \cdot 10^{-5} = 0,99996.$$

Эту задачу можно решить двумя способами: по теореме сложения для совместных событий (I способ) и через противоположные события (II способ).

### I способ.

Одновременно могут отказать и один и любые два, и любые три, и четыре элемента, поэтому вероятность перерыва в электроснабжении будет:

$$\begin{aligned} q_{cx} = p(0) &= \sum q_i - \sum q_i q_j + \sum q_i q_j q_k - \prod_1^4 q_i = \\ &= q_G + q_{T1} + q_L + q_{T2} - q_G q_{T1} - q_G q_L - q_L q_{T2} - q_{T1} q_L - q_{T1} q_{T2} - \\ &- q_G q_{T2} + q_G q_{T1} q_L + q_G q_L q_{T2} + q_{T1} q_L q_{T2} + q_G q_{T1} q_{T2} - \\ &- q_G q_{T1} q_L q_{T2}. \end{aligned}$$

Подставляем вместо вероятностей отказов их значения, получим

$$q_{cx} = 0,00408546 = 4,08546 \cdot 10^{-3}.$$

Учитывая, что произведение двух и более вероятностей отказов - величины практически равные нулю, можно записать:

$$q_{cx} = q_G + q_{T1} + q_L + q_{T2} = 2 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-5} = 4,09 \cdot 10^{-3}.$$

Сравнивая два результата, видно, что погрешность второго решения составляет 0,9%.

Следовательно, в электроэнергетике при последовательном соединении небольшого количества элементов вероятность отказа схемы (перерыва в электроснабжении) определяется как сумма вероятностей отказов ее элементов:

$$q_{cx} = \sum_1^n q_i.$$

### II способ.

В предыдущем случае точные расчеты громоздки, а допущения о пренебрежительности произведения вероятностей при увеличении числа элементов схемы будет приводить к увеличению погрешности расчета. Возможен другой путь.

Определим вероятность передачи электроэнергии в рассматриваемой схеме. Для того чтобы потребитель получил электроэнергию все элементы схемы должны работать, тогда по теореме умножения для совместных событий:

$$p_{cx} = p_G \cdot p_{T1} \cdot p_L \cdot p_{T2},$$

а вероятность отказа схемы определяется как противоположное событие:

$$q_{cx} = 1 - p_{cx} = 1 - p_G \cdot p_{T1} \cdot p_L \cdot p_{T2} = 4,08546 \cdot 10^{-3}.$$

Аналогично решается задача по отказу схемы однострансформаторной подстанции (см. рис.).

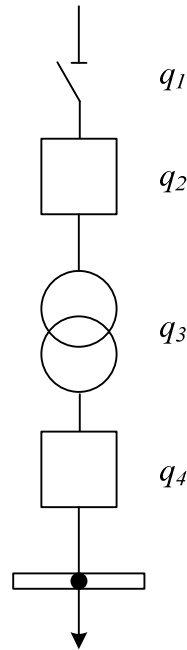


Рис. Схема подстанции

Вероятность отказа схемы определяется через противоположное событие:

$$q_{cx} = 1 - p_{cx} = 1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4.$$

**Задача 2.** Определить вероятность передачи в энергорайон мощности равной 100 MBm, 50 MBm для структурной схемы сети, приведенной на рис.

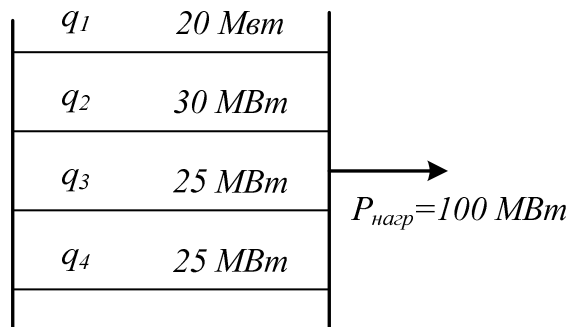


Рис.

Вероятность передачи мощности определяется сочетаниями количества включенных и отключенных линий по теореме умножения для совместных событий:

$$\begin{aligned}
 p(P = 100 \text{ MBm}) &= p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 = (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4); \\
 p(P = 50 \text{ MBm}) &= p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 = \\
 &= (1 - q_1)(1 - q_2)q_3q_4 + q_1q_2(1 - q_3)(1 - q_4).
 \end{aligned}$$



**Задача 3.** Определить вероятность возможных дефицитов мощности в схеме, приведенной на рис., и вероятность передачи потребителю требуемой мощности.

В данном случае целесообразно представить подстанцию в виде двух параллельно соединенных цепочек.

Определим вероятность безотказной работы по теореме умножений для независимых совместных событий и отказа каждой цепочки как противоположное событие:

$$P_I = p_1 p_2 p_3 p_4,$$

где  $p_i = 1 - q_i$  – вероятность безотказной работы каждого  $i$ -того элемента цепочки.

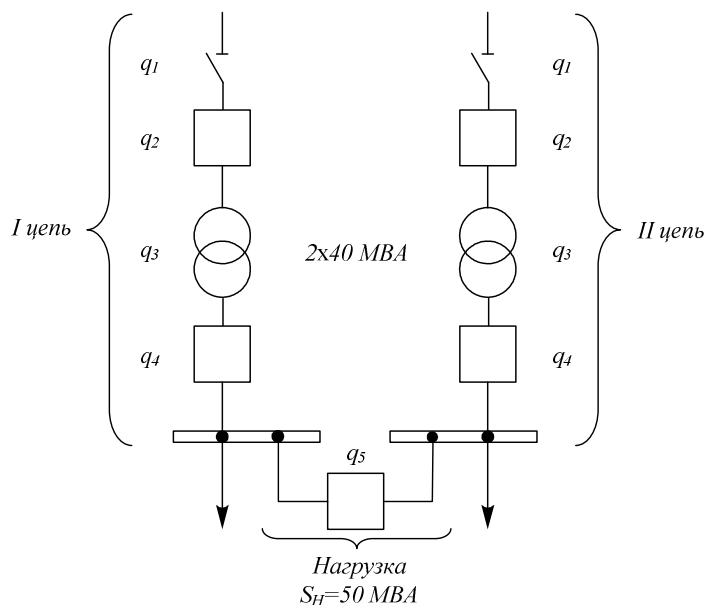
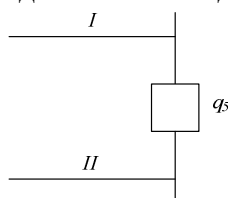


Рис.

$$q_I = 1 - p_I.$$

Тогда схема подстанции будет представлена в виде:



Отказ схемы приведет к дефициту мощности в  $50 \text{ MVA}$ , его вероятность равна:  
 $q(p_{\text{деф}} = 50 \text{ MVA}) = q_I q_{II}.$

Вероятность передачи потребителю требуемой мощности будет определяться двумя сложными событиями: нормальная работа всех элементов схемы и рабочее состояние одной цепи и нерабочее состояние другой:

$$p(p_{\text{пер}} = 50 \text{ MVA}) = p_I p_{II} + 2 p_I q_{II} p_5.$$

## Практическое занятие № 2.

### «Определение вероятностей отказов и безотказной работы системы»

*Цель занятия:* научиться определять вероятности передачи мощности при различных нарушениях в электроснабжении и вероятности безотказной работы для простейших схем систем.

При подготовке к практическому занятию используется теоретический материал, изложенный в [1, 3, 4].

#### Примеры решения задач.

##### Задача 1

Потребитель получает электроэнергию по двум цепям линии электропередачи, сооружённым по разным трассам.

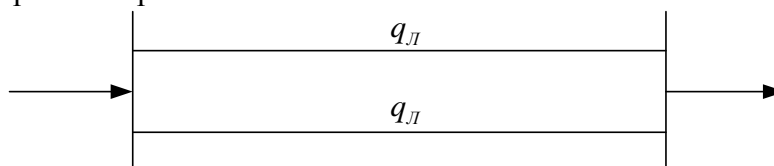


Рис.

Вероятность отказа каждой цепи  $q_{л} = 4 \cdot 10^{-3}$ . События отказов цепей независимые. Каждая цепь может пропустить 50% мощности, необходимой потребителю. Считая потребление мощности в течение всего рассчитываемого периода равным 100%, определить:

1. Вероятность передачи 100% мощности.
2. Вероятность передачи 50% мощности.
3. Вероятность полной потери питания.

##### Решение

Первый способ.

1. Осуществление передачи 100% мощности возможно только при одновременной работе двух цепей ЛЭП. Вероятность этого события соответствует параллельному соединению элементов

$$P(100\%) = p_{л}p_{л} = (1 - q_{л})^2 = 0.992.$$

2. Передача 50% мощности возможна тогда, когда одна из цепей в рабочем состоянии, вторая - в состоянии отказа, всего таких случаев - 2.

$$P(50\%) = p_{л}q_{л} + p_{л}q_{л} = 2p_{л}q_{л} = 0.00752.$$

3. Полная потеря питания возможна в случае одновременного отказа обеих цепей ЛЭП

$$P(0\%) = q_{л}q_{л} = q_{л}^2 = 16 \cdot 10^{-6}.$$

Второй способ.

Раскрывая произведение  $\prod_1^n (p_i + q_i) = 1$ , где  $n$  - число элементов в системе, и анализируя слагаемые, которые соответствуют различным состояниям элементов, получаем

$$(p_{л} + q_{л}) \cdot (p_{л} + q_{л}) = (p_{л} + q_{л})^2 = p_{л}^2 + 2p_{л}q_{л} + q_{л}^2 = 1,$$

где  $p_{л}^2$  - вероятность работы 2-х цепей, т.е. передача 100% мощности равна 0,992;

$2p_{л}q_{л}$  - вероятность работы одной из цепей, т.е. передачи 50% мощности равная

0,00752;

$q_n^2$  - вероятность отказа двух цепей, полной потери питания, равная  $16 \cdot 10^{-6}$ .

Второй способ наиболее общий и может быть использован для расчёта показателей надёжности схем любой сложности, однако необходим анализ  $2^n$  состояний системы, что при большом числе элементов вызывает серьёзные затруднения.

### Задача 2

Решить предыдущую задачу при условии, что вероятность того, что потребителю требуется 100% мощности равна 0,3, а 50% мощности равна 0,7, т.е. определить вероятность передачи всей требуемой мощности, 50% мощности и полной потери питания.

### Решение

1. Так как с вероятностью 0,7 потребителю требуется только 50% мощности то вероятность передачи всей мощности по сравнению с предыдущим случаем увеличивается на величину  $0,7(2p_n q_n)$ .

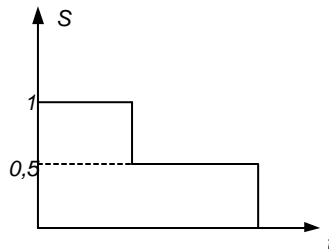


Рис.

$$P(100\%) = p_n^2 (0,3 + 0,7) + 0,7 \cdot 2p_n q_n = 0,992 \cdot 1 + 0,7 \cdot 0,00752 = 0,9974$$

2. Вероятность передачи 50% мощности остаётся без изменения:

$$P(50\%) = 2p_n q_n (0,3) = 0,00226.$$

3. Вероятность полной потери питания

$$P(0\%) = q_n^2 = 16 \cdot 10^{-6}.$$

В этом случае, с учётом графика нагрузки, недоотпуск электроэнергии уменьшится.

### Задача 3

Двухцепная линия электропередачи напряжением 110 кВ, длиной 80 км, сооружённая на одних опорах, имеет следующие показатели надёжности среднее значение параметра потока отказов одной цепи  $\lambda_{01} = 0,01$  1/км.год;  $\lambda_{02} = 0,01$  1/км.год. Доля отказов линии, приводящих к отключению двух цепей по одной причине равна  $\gamma = 0,3$ . Среднее время аварийного восстановления одной цепи  $t_B = 15$  час, двух цепей – 100 час. Время планового простоя одной цепи  $t_{np} = 140$  час/год при четырех отключениях в год. Пропускная способность каждой цепи - 100% передаваемой мощности.

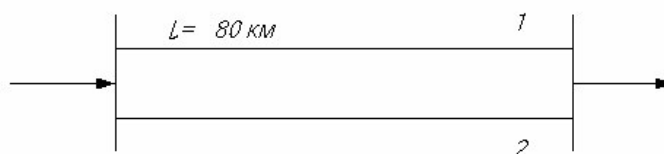


Рис. Схема электропередачи

Определить вероятность простоя двухцепной линии и её среднее эквивалентное время простоя, а также суммарный параметр потока отказов.

### Решение

Как следует из условия задачи и статистических данных, все отказы двухцепных ЛЭП делятся на две группы:

1. отказы только одной цепи;
2. одновременные отказы обеих цепей, вызванные одной и той же причиной;

Поэтому при таких условиях задачи двухцепная ЛЭП в расчёте надёжности должна представляться в виде двух параллельно соединённых элементов, характеризующих параллельные отказы каждой цепи ЛЭП, и одного последовательно соединённого элемента, характеризующего одновременный отказ обеих цепей, вызванный одной и той же причиной.

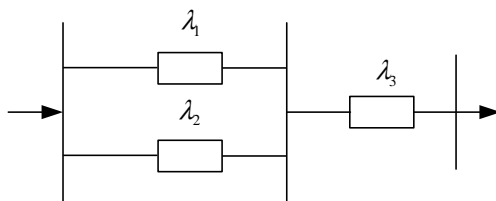


Рис. Расчётная схема по надёжности

1. Определяем параметры потоков отказов эквивалентных элементов расчётной схемы

$$\lambda_1 = \lambda_2 = (1 - \gamma) \lambda_{01} l = 0,7 \cdot 0,01 \cdot 80 = 0,56 \quad 1/\text{год};$$

$$\lambda_3 = \gamma \lambda_{01} l = 0,24 \quad 1/\text{год}.$$

Вероятность аварийного простоя каждой цепи ЛЭП

$$q_1 = q_2 = \lambda_1 t_B = 0,56 \cdot 15 / 8760 = 0,96 \cdot 10^{-3};$$

двух цепей ЛЭП

$$q_3 = \lambda_3 t_{B2} = 0,24 \cdot 100 / 8760 = 2,74 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность простоя каждой цепи в преднамеренном отключении

$$q_{II} = t_{np} / T = 140 / 8760 = 16 \cdot 10^{-3}.$$

Параметр потока отказов двухцепной ЛЭП

$$\lambda_2 = \lambda_3 + 2\lambda_1 (q_1 + q_2) = 0,24 + 2 \cdot 0,56 (0,96 + 16) \cdot 10^{-3} = 0,24 + 19 \cdot 10^{-3} = 0,259 \quad 1/\text{год}.$$

Здесь  $q_1 + q_2$  - вероятность аварийного и преднамеренного отключения одной цепи.

Вероятность простоя двухцепной ЛЭП

$$q_{\Sigma} = q_1 q_2 + 2K q_1 q_2 + q_3.$$

В этом выражении неизвестной величиной является коэффициент, учитывающий уменьшение вероятности совпадения аварийных и плановых ремонтов одной цепи вследствие того, что возможно лишь наложение аварийного ремонта на плановый, а не наоборот.

$$K = \frac{t_{np1}}{t_{np1} + t_e} = \frac{35}{35 + 15} = 0,7,$$

где  $t_{np1} = \frac{t_{np}}{4} = \frac{140}{4} = 35$  часов - среднее время одного преднамеренного отключения;

$t_e$  - среднее время одного аварийного ремонта.

Тогда вероятность простоя двухцепной ЛЭП

$$q_{\Sigma} = (0,96 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,96 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^{-3} + 2,74 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,92 \cdot 10^{-6} + 21,5 \cdot 10^{-6} + 2,74 \cdot 10^{-3} = 2,7626 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, видно, что вероятность простоя двухцепной ЛЭП, в основном, определяется одновременными отказами двух цепей, вызванных одной и той же причиной.

Среднее эквивалентное время простоя двухцепной ЛЭП:

$$t_{\Sigma} = \frac{q_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{2,7626 \cdot 10^{-3}}{0,259 \frac{1}{год}} = 10,7 \cdot 10^{-3} год = 93,7 \text{ часа в год.}$$

#### Задача 4

Решить ту же задачу при условии, что две цепи ЛЭП сооружены на разных опорах и проходят по разным трассам, с учётом того, что время восстановления каждой цепи увеличивается в два раза  $t_g = 30 \text{ час}$ .

#### Решение

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \lambda_{01} l = 0,01 \cdot 80 = 0,8 \text{ 1/год};$$

$$q_1 = q_2 = \lambda_1 t_g = 0,8 \cdot 30 / 8760 = 2,74 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{II} = t_{np} / T = 140 / 8760 = 16 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda_{\Sigma} = 2\lambda_1 (q_2 + q_2) = 2 \cdot 0,8 \cdot (2,74 + 16) \cdot 10^{-3} = 27,2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{год};$$

$$q_{\Sigma} = q_1^2 + 2Kq_1 q_2 = 2,74^2 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot (35 / 35 + 30) \cdot 2,74 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7,5 \cdot 10^{-6} + 47,2 \cdot 10^{-6} = 54,2 \cdot 10^{-6};$$

$$t_{\Sigma} = \frac{54,2 \cdot 10^{-6}}{27,2 \cdot 10^{-3}} \approx 2 \cdot 10^{-3} = 17,5 \text{ час / год}$$

Сравнивая полученный результат с результатом предыдущей задачи, видим, что эквивалентное время простоя двух одноцепных линий уменьшилось в  $93,7/17,5=5,35$  раз. Примерно во столько же раз, можно считать, уменьшается недоотпуск электроэнергии.

#### Практическое занятие № 3.

#### «Модели отказов нерезервируемых и резервируемых систем»

*Цель занятия:* научиться применять модели внезапных отказов нерезервируемых и резервируемых систем, определять кратность резервирования.

#### Примеры решения задач.

##### Пример 1.

Рассмотрим схемы питания одното трансформаторных подстанций напряжением 110 кВ. Отказ системы электроснабжения таких подстанций вызывается отказом любого из элементов системы.

Частота отказов элементов:

$$\lambda_1=0,02, \lambda_2=0,01, \lambda_3=1, \lambda_4=0,02, \lambda_5=0,01, \lambda_6=0,01, \lambda_7=0,01 \text{ (1/год).}$$

а)  $\lambda = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_7 = 1,06 \text{ 1/год};$

б)  $\lambda = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_7 = 1,08 \text{ 1/год};$

в)  $\lambda = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 = 1,08 \text{ 1/год}$ ;

г)  $\lambda = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6 + \lambda_7 = 1,07 \text{ 1/год}$ ;

д)  $\lambda = 2\lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_7 = 1,08 \text{ 1/год}$ .

Эти результаты показывают, что доминирующее влияние на частоту погашения подстанций оказывает повреждаемость ВЛ ( $\lambda_3$ ).

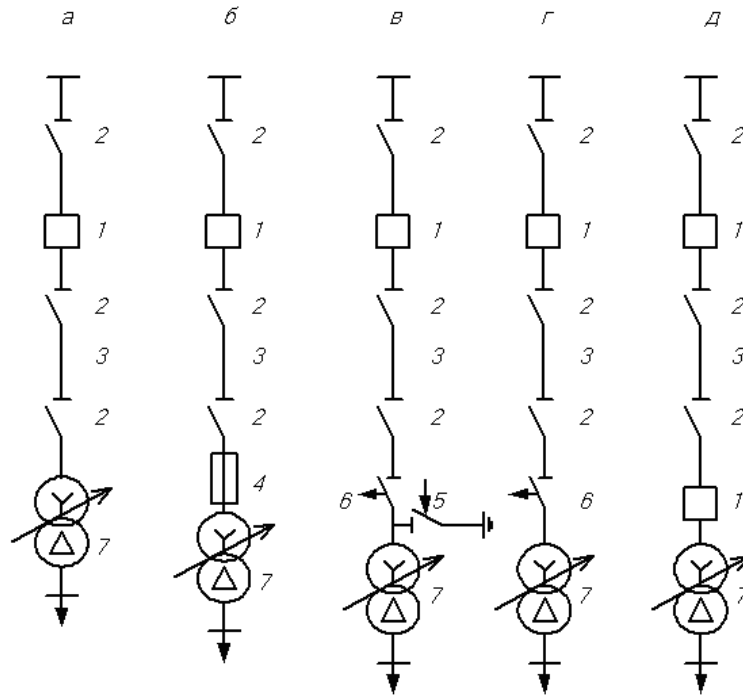


Рис. Однолинейные схемы подстанций

**Пример 2.**

Рассмотрим секцию РУ 10 кВ, от которой питается 21 отходящая линия. Частота отказов с коротким замыканием для выключателей 10 кВ  $\lambda_B = 0,003 \text{ 1/год}$ , частота отказов с коротким замыканием для сборных шин  $\lambda_{III} = 0,03 \text{ 1/год}$ .

Частота кратковременных погашений секции шин 10 кВ из-за КЗ на шинах и на выключателях:

$$\lambda = 22\lambda_B + \lambda_{III} = 22 \cdot 0,003 + 0,03 = 0,096 \text{ 1/год}.$$

Из примера видно, что частота погашений секции 10 кВ определяется в основном числом присоединений и надежностью выключателей.

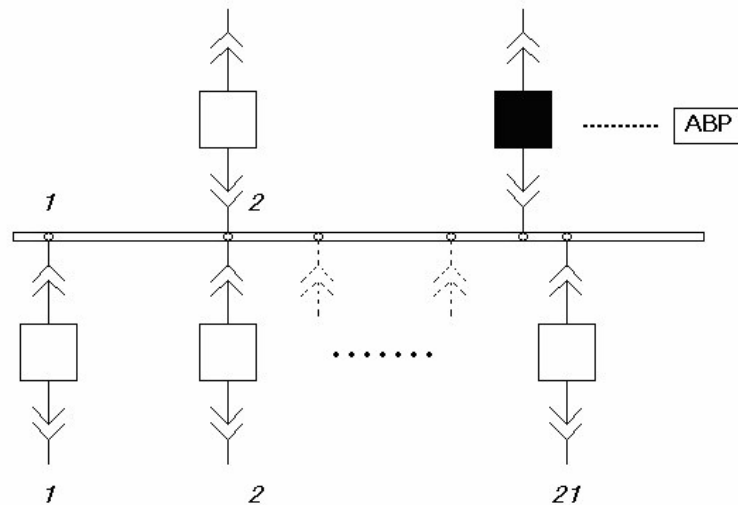


Рис. Схема РУ секции шин 10 кВ

### Пример 3.

Определить влияние кратности резервирования на вероятность безотказной работы при  $p(t) = e^{-\lambda t}$ , если при трех генераторах ( $n=3$ ) для работы необходимо иметь два генератора ( $r=2$ ), тогда кратность резервирования составит  $k = \frac{1}{2}$ .

Т.к. кратность при постоянном резервировании равна

$$k = \frac{n-r}{r} = \frac{m-1}{n-m+1},$$

тогда

$$p_k(t) = \sum_{k=r}^n c_n^k p^k(t) q^{n-k}(t) = c_3^2 p^2 q + c_3^3 p^3 q^0 = 3p^2(1-p) + p^3 = 3p^2 - 3p^3 + p^3 = 3p^2 - 2p^3$$

или  $p_k = 3p^2 - 2p^3$ , при  $\lambda t = 0.1$ ,  $p = 0.9735$ .

### Практическое занятие № 4.

«Учет АВР при расчете надежности электрических схем энергосистем»

*Цель занятия:* научиться использовать формулу полной вероятности при оценке надежности схем систем, имеющих АВР.

Примеры решения задач.

### Пример 1.

Потребители собственных нужд станции подключены по схеме (рис.). Вероятность безотказной работы источника в течение времени между плановыми остановками блока равна 0,9. Вероятность отказа в отключении одной секции шин равна  $q(A_1) = 0,05$  и во включении –  $q(A_2) = 0,01$ , секционный выключатель осуществляет АВР секции, оставшейся без питания, за счет соседней секции и ее источника. Определить вероятность бесперебойного электроснабжения любого из потребителей этой системы.

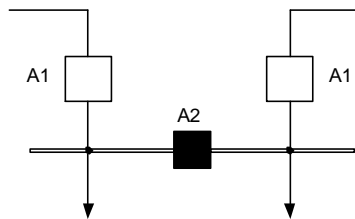


Рис. Схема питания потребителей собственных нужд станции

Решение. В соответствии с условиями примера  $q(A_1) = 2 \cdot 0,05 = 0,1$ , т.к. две секции шин, тогда  $p(A_1) = 0,9$ ;  $q(A_2) = 0,01$  и  $p(A_2) = 0,99$ . Каждый из потребителей может оказаться подсоединенным к одной из секций шин с вероятностью 0,5, поэтому:  $q(S / \bar{A}_1 A_2) = 0,5$ ;  $q(S / A_1 \bar{A}_2) = 0,5$ ;  $q(S / \bar{A}_1 \bar{A}_2) = 0,5$ .

При отсутствии отказов аппаратуры отказ системы происходит при совпадении отказа одного из источников с аварийным простоем другого, т.е.

$$q(S / A_1 A_2) = 2(1-0,9)(1-0,99) = 0,002,$$

т.к. вероятность безотказной работы источника в течение времени между плановыми остановками блока равна 0,9, а вероятность застать резервный источник в работоспособном состоянии в любой момент времени между плановыми остановками равна 0,99.

По формуле полной вероятности

$$q_c = q(S/A_1A_2)p(A_1)p(A_2) + q(S/\bar{A}_1A_2)q(A_1)p(A_2) + q(S/A_1\bar{A}_2)p(A_1)q(A_2) + q(S/\bar{A}_1\bar{A}_2)q(A_1)q(A_2),$$

$$q_c = 0.002 \cdot 0.9 \cdot 0.99 + 0.5 \cdot 0.1 \cdot 0.99 + 0.5 \cdot 0.9 \cdot 0.01 + 0.5 \cdot 0.1 \cdot 0.01 = 0.05628;$$

$$p_c = 1 - 0.05628 = 0.94372.$$

Применение схемы с постоянным резервированием и АВР на секционном выключателе повышает вероятность бесперебойного электроснабжения потребителей. Кроме того, секционирование снижает вероятность полного погашения всех потребителей. Без секционирования отказ выключателя любого из присоединений приводит к полному погашению, а при секционировании – к отключению только одной из секций, т.е. к погашению половины потребителей.

Практическое занятие № 5.  
«Оценка надежности состояний схем»

*Цель занятия:* научиться составлять графы перехода из состояния в состояние и определять установившиеся (стационарные) значения вероятностей состояний схем.

При подготовке к практическому занятию используется [1,5].

Примеры решения задач.

Нерезервированные схемы

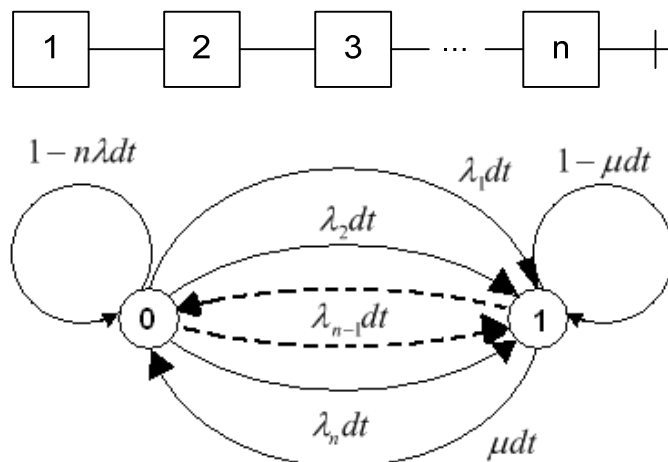


Рис. Граф переходов для схемы с последовательно соединенными элементами

0 – все элементы в безотказном состоянии;

1 – один из элементов, а следовательно и система, в состоянии

отказа.

Для стационарного состояния ( $t \rightarrow \infty$ )  $K_T$  и  $K_{II}$  имеют вид:

$$p_0 = K_{T.c.} = \frac{\mu}{n\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{n\lambda}{\mu}} = \frac{\bar{T}}{nt_B + \bar{T}};$$

$$p_1 = K_{II.c.} = \frac{n\lambda}{n\lambda + \mu} = \frac{nt_B}{nt_B + \bar{T}}.$$



### Взаиморезервируемая система из двух элементов

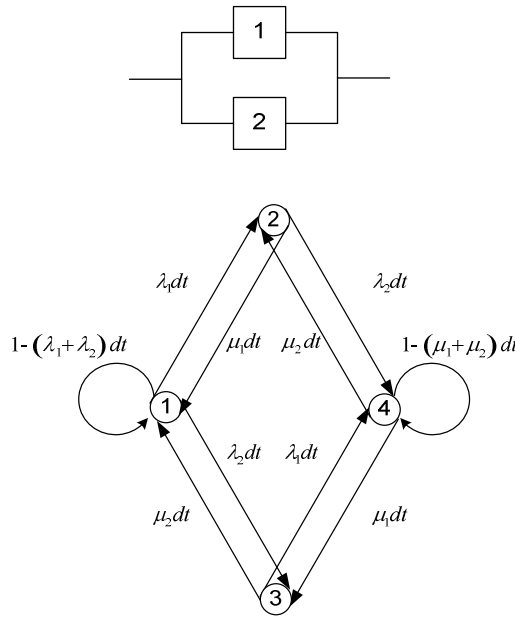


Рис. Граф переходов из состояния в состояние для двух взаиморезервируемых элементов

Функции готовности и вынужденного простоя системы имеют вид:

$$K_{Г.С.}(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t);$$

$$K_{П.С.}(t) = 1 - K_{Г.С.}(t) = p_4(t).$$

Для стационарного состояния (при  $t \rightarrow \infty$ ) средние вероятности состояний следующие:

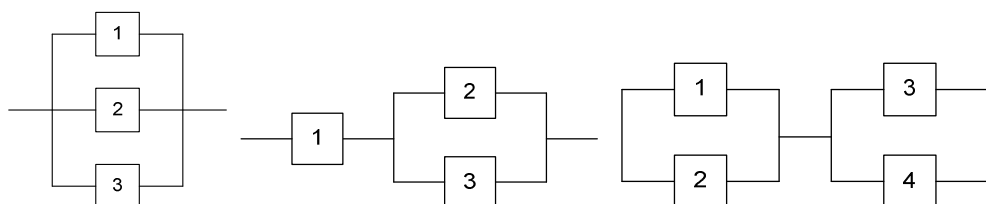
$$p_1 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{T}_1}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} \frac{\bar{T}_2}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} = K_{Г1} K_{Г2};$$

$$p_2 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{t}_{B1}}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} \frac{\bar{T}_2}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} = K_{П1} K_{Г2};$$

$$p_3 = \frac{\lambda_2 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{t}_{B2}}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} \frac{\bar{T}_1}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} = K_{Г1} K_{П2};$$

$$p_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\bar{t}_{B1}}{(\bar{T}_1 + \bar{t}_{B1})} \frac{\bar{t}_{B2}}{(\bar{T}_2 + \bar{t}_{B2})} = K_{П1} K_{П2}.$$

Студентам предлагается под руководством преподавателя составить графы перехода из состояния в состояние и найти стационарные значения вероятностей состояния следующих схем:



## Практическое занятие № 6.

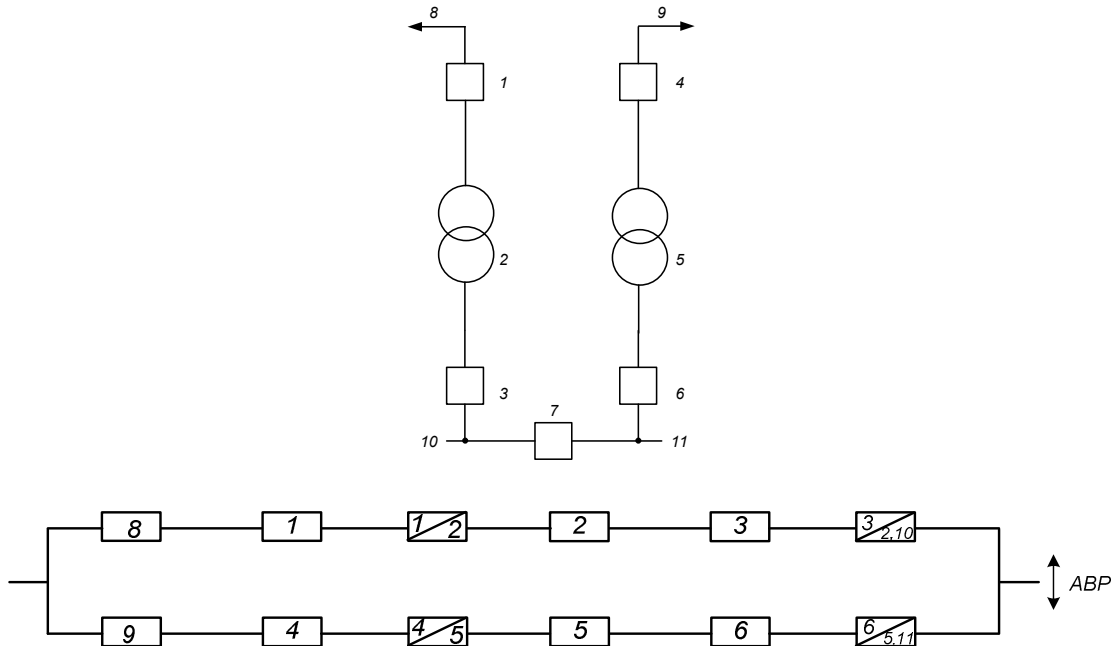
### «Составление расчетных схем и схем замещения типовых схем РУ подстанций и электростанций»

*Цель занятия:* научиться составлять из типовых схем РУ ПС и электростанций расчетные схемы по надежности, а по ним схемы замещения.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1].

#### Примеры решения задач.

##### Схема подстанции «Два блока трансформатор - линия»



##### Схема «Мостик с выключателями в цепях линий»

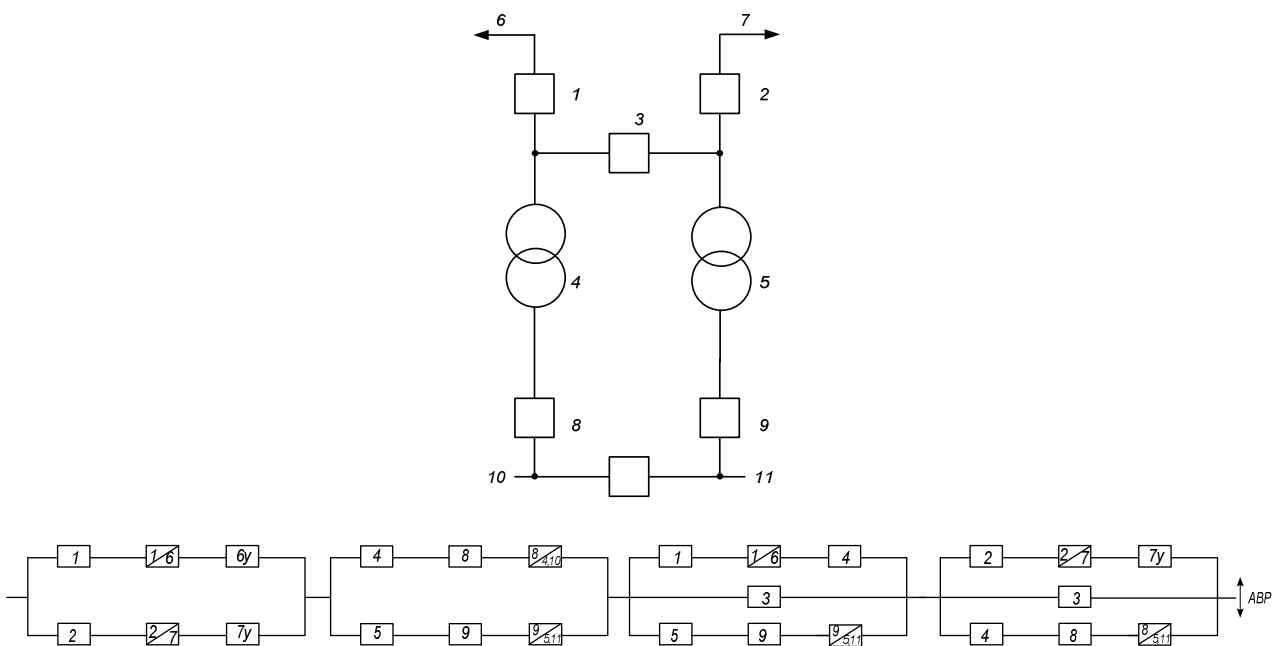


Схема «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов»

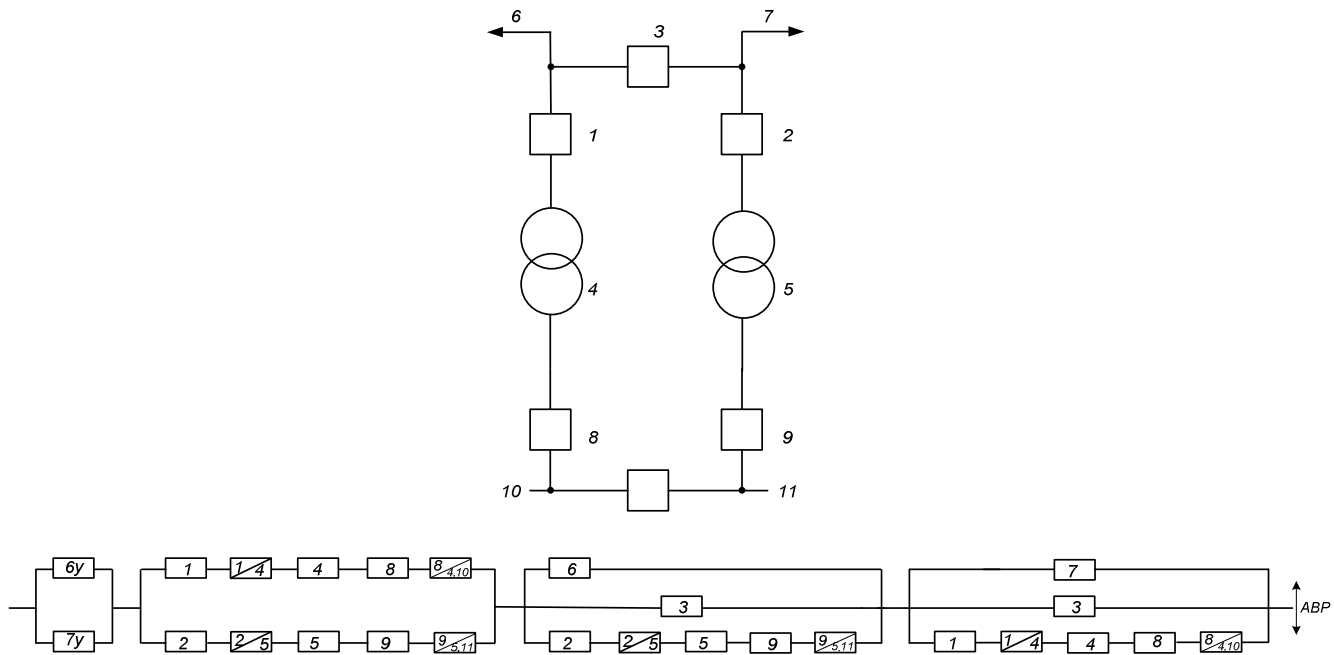


Схема подстанции с РУ «Четырехугольник»

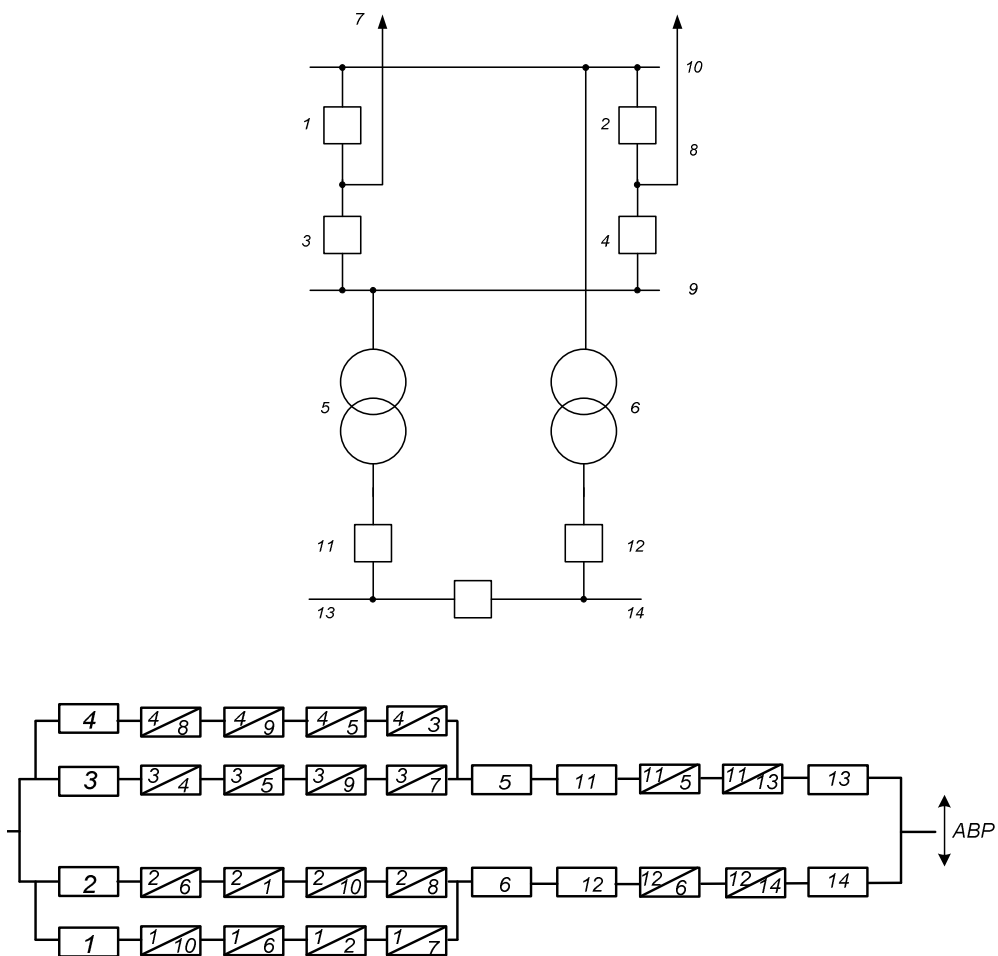


Схема «Одна секционированная система шин с обходной и совмещенным секционным и обходным выключателем»

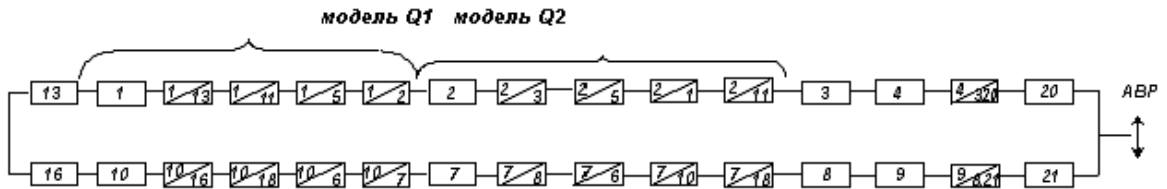
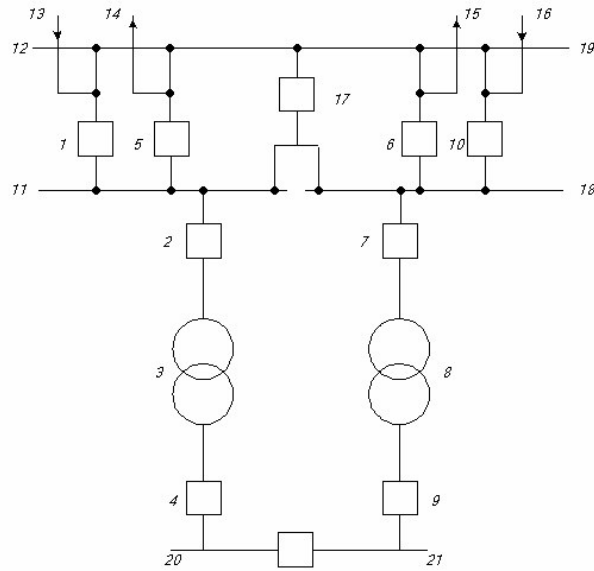
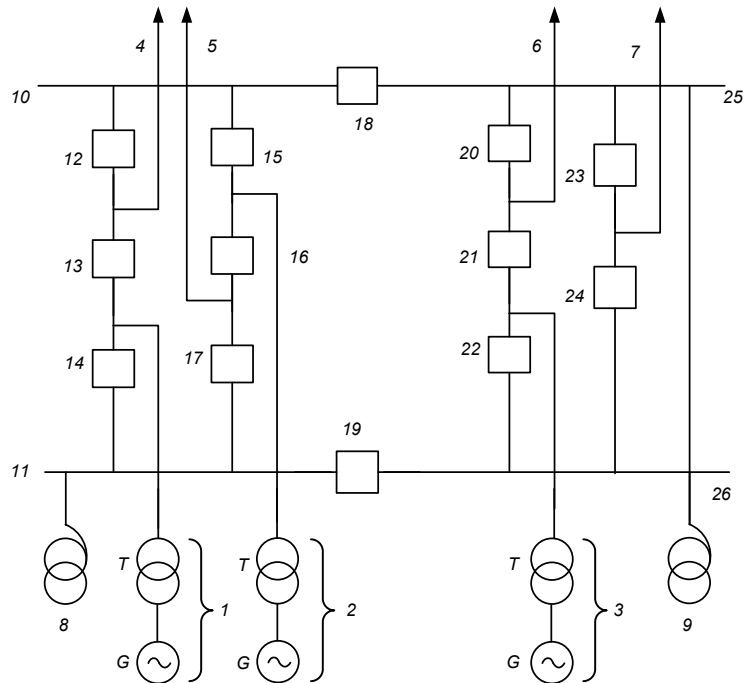
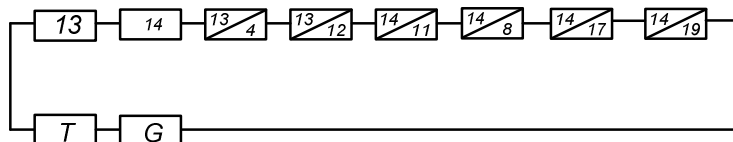


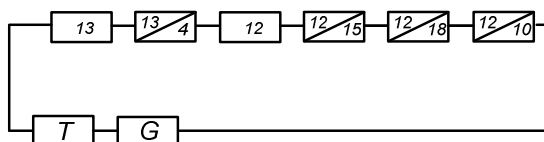
Схема «ОРУ-220 кВ» электрической станции



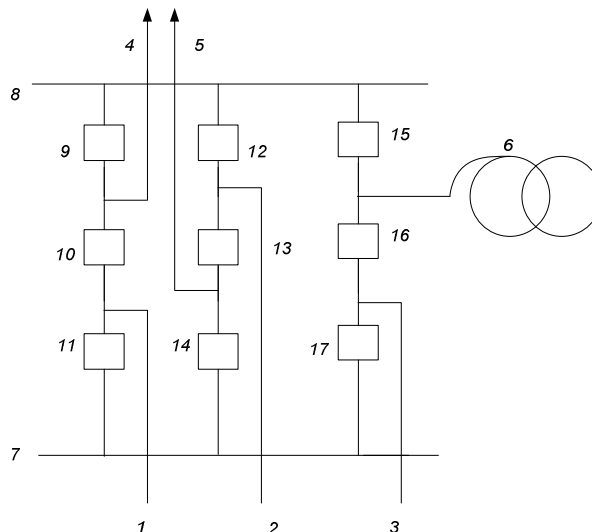
Вероятность отказа энергоблока №1 в нормальном режиме



Состояние ремонта выключателя №14 и отказ энергоблока №1



«Схема РУ-500 кВ» электрической станции



1,2,3 – генераторные блоки; 4,5 – ВЛ; 6 – АТ; 9-17 – выключатели.

Состояние полного отказа схемы РУ относительно генераторных блоков (нормальная схема)



### Практическое занятие № 7.

«Расчет надежности систем аналитическим методом»

*Цель занятия:* научиться оценивать надежность систем с учетом ремонтных состояний и преднамеренных отключений с помощью аналитического метода.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1].

Примеры решения задач.

**Пример 1.** Промышленное предприятие (потребитель) получает электроэнергию от двух источников питания (ИП) – ГРЭС и районной подстанции системы (см. рис.). Каждая цепь может пропустить всю необходимую мощность. Параметры потока отказов и преднамеренных отключений элементов системы электроснабжения, среднее время восстановления и длительность преднамеренных отключений приведены в таблице. Среднегодовая мощность потребителя  $\bar{P} = 30 \text{ MВт}$ . Определить надежность электроснабжения предприятия.

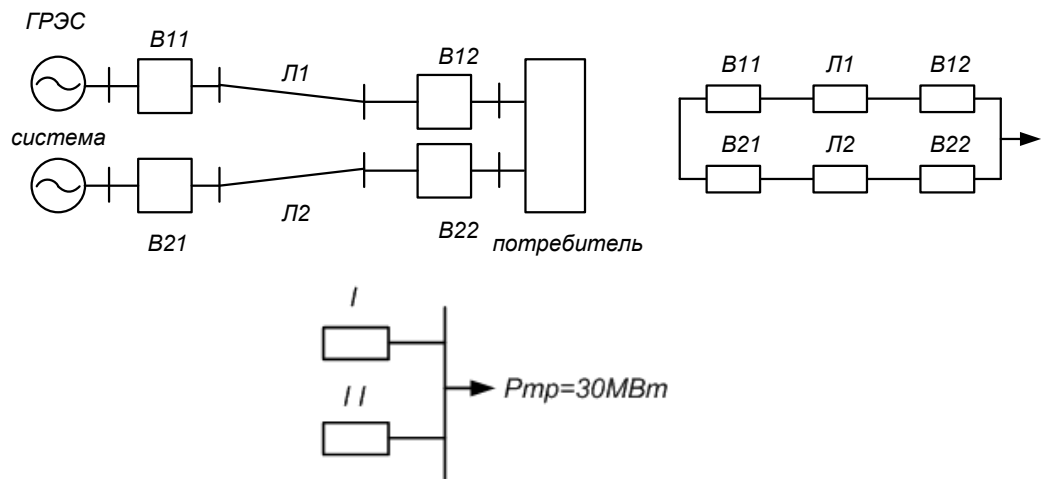


Рис. Расчетная схема электроснабжения и схема замещения

Параметр	Элемент					
	В11	Л1	В12	В21	Л2	В22
$\lambda_o, \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}; \lambda, \frac{1}{\text{год}}$	0,099	0,023	0,048	0,137	0,019	0,137
$l, \text{км}$	-	80	-	-	30	-
$\bar{t}_B, \text{ч}$	10	30	10	15	30	15
$\lambda_{np}, \frac{1}{\text{год}}$	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
$\bar{t}_{np}, \text{ч}$	60	50	60	80	20	80

Надежность ИП не учитывать. В табл. приведены значения параметров потока отказов выключателей, определенные по модели выключателя.

**Решение.**

1. Определим параметры потока отказов первой и второй цепей, учитывая их преднамеренные отключения, пользуясь следующей формулой:

$$\lambda_c = \sum_1^n \lambda_i + \lambda_{np.n\bar{o}}.$$

$$\lambda_{cI} = \lambda_I = \lambda_{B11} + \lambda_{OЛ1} l_1 + \lambda_{B12} + \lambda_{npB11} = 0,099 + 0,023 \cdot 80 + 0,048 + 0,4 = 2,387 \quad 1/\text{год}$$

;

$$\lambda_{cII} = \lambda_{B21} + \lambda_{OЛ2} l_2 + \lambda_{B22} + \lambda_{npB21} = 0,137 + 0,019 \cdot 30 + 0,137 + 0,4 = 1,244 \quad 1/\text{год}.$$

2. Определяем вероятность отказов I и II цепей:

$$q_u = \sum_1^n \lambda_i t_{Bi};$$

$$q_I = q_{B11} + q_{Л1} + q_{B12} = \lambda_{B11} \bar{t}_{B11} + \lambda_{Л1} \bar{t}_{Л1} + \lambda_{B12} \bar{t}_{B12},$$

т.к.  $t_B$  задано в часах, то его нужно выразить в годах ( $\lambda$  имеет размерность  $1/\text{год}$ ), т.е.

$$t_B^* = \frac{t_B}{8760}.$$

$$q_I = 0,099 \frac{10}{8760} + 1,84 \frac{30}{8760} + 0,048 \frac{10}{8760} = 6,47 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{II} = q_{B21} + q_{Л2} + q_{B22} = (0,137 \cdot 15 + 0,57 \cdot 30 + 0,137 \cdot 15) / 8760 = 2,43 \cdot 10^{-3}.$$

3. Определим среднее время восстановления каждой цепи:

$$\bar{t}_{B_c} = q_c / \lambda_c;$$

$$\bar{t}_{B_I} = \frac{q_I}{\lambda_I^*} = \frac{q_I}{\lambda_I - \lambda_{npB11}} = \frac{6,47 \cdot 10^{-3}}{2,387 - 0,4} = 28,524ч;$$

$$\bar{t}_{B_{II}} = \frac{q_{II}}{\lambda_{II}^*} = \frac{q_{II}}{\lambda_{II} - \lambda_{npB21}} = \frac{2,43 \cdot 10^{-3}}{1,244 - 0,4} = 25,2ч.$$

4. Определим параметр потока отказов системы, состоящей из двух параллельных элементов:

$$\lambda_c = \sum_1^n \lambda_i \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (\lambda_j \bar{t}_{Bj} + \lambda_{npj} \bar{t}_{npj});$$

$$\lambda_c = \lambda_I \lambda_{II} \bar{t}_{B2} + \lambda_I^* \lambda_{npII} \bar{t}_{npII} + \lambda_{II} \lambda_I \bar{t}_{B1} + \lambda_{II}^* \lambda_{npI} \bar{t}_{npI} = \lambda_I q_{II} + \lambda_{II} q_I + \lambda_I^* q_{npII} + \lambda_{II}^* q_{npI};$$

$$\lambda_c = 2,387 \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} + 1,244 \cdot 6,47 \cdot 10^{-3} + \frac{(1,987 \cdot 0,4 \cdot 80 + 0,844 \cdot 0,4 \cdot 60)}{8760} =$$

$$= 2,341 \cdot 10^{-2} \text{ 1/год}.$$

5. Средняя вероятность состояния отказа системы:

$$q_c = K_{II.C} = \prod_{i=1}^n \lambda_i \bar{t}_{Bi} + \prod_{i=1}^n K_{npi} \lambda_{npi} \bar{t}_{npi} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \lambda_j \bar{t}_{Bj},$$

где  $K_{npi}$  – коэффициент, учитывающий фактор уменьшения вероятности преднамеренного отключения одного элемента и аварийного отключения другого.

$$K_{np} = 1 - e^{-\bar{t}_{npi} / \bar{t}_{Bэкс}};$$

$$K_{npI} = 1 - e^{-\bar{t}_{npI} / \bar{t}_{BII}} = 1 - e^{-60 / 25,2} = 0,9075;$$

$$K_{npII} = 1 - e^{-\bar{t}_{npII} / \bar{t}_{BI}} = 1 - e^{-80 / 28,524} = 0,939;$$

$$q_c = q_I q_{II} + K_{npI} \lambda_{npI} \bar{t}_{npI} q_{II} + K_{npII} \lambda_{npII} \bar{t}_{npII} q_I = 6,47 \cdot 10^{-3} \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ (0,9075 \cdot 0,4 \cdot 60 \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} + 0,939 \cdot 0,4 \cdot 80 \cdot 6,47 \cdot 10^{-3}) / 8760 = 43,92 \cdot 10^{-6}.$$

6. Среднее время безотказной работы системы:

$$\bar{T}_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{2,341 \cdot 10^{-2}} = 42,7 \text{ лет}.$$

Расчетное время безотказной работы при  $\alpha=0,1$

$$\bar{T}_p = -\ln(1 - \alpha) \bar{T} = 4,48 \text{ лет}.$$

7. Среднее время восстановления системы:

$$\bar{t}_{BC} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{43,92 \cdot 10^{-6}}{2,341 \cdot 10^{-2}} \cdot 8760 = 16,43ч.$$

8. Математическое ожидание количества недоотпущенной электроэнергии:

$$W_{нео} = \bar{P}_{деф.p} p(\bar{P}_{деф.i}) T = 30 \cdot 10^3 \cdot 43,92 \cdot 10^{-6} \cdot 8760 = 11,542 \text{ MВт} \cdot \text{ч}.$$

**Пример 2.** Определить вероятность и интенсивность полного отказа схемы подстанции, приведенной на рис.

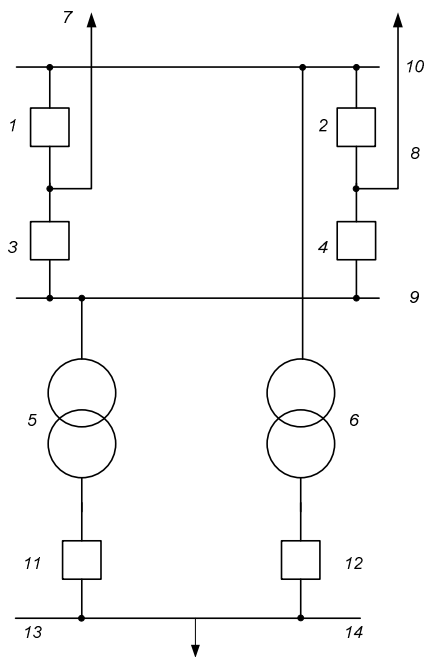
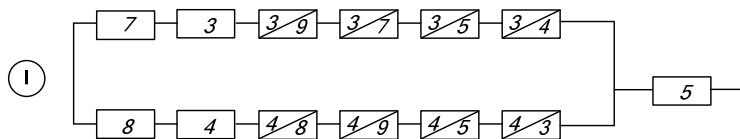


Рис. Расчетная схема подстанции

Составляем схемы замещения:  
относительно Т5



относительно Т6

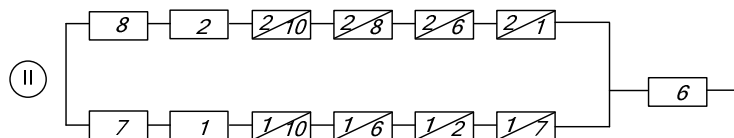


Рис. Схемы замещения подстанции относительно силовых трансформаторов

$$q_c = q_I q_{II} + K_{npI} q_{npI} q_{II} + K_{npII} q_{npII} q_I;$$

$$K_{npI} = 1 - e^{-t_{npI}/t_{BII}};$$

$$q_I = \left[ \lambda_7 t_{B7} + \lambda_3 t_{B3} + a_{Baem3} (\lambda_9 t_{B9} + \lambda_7 t_{B7} + \lambda_5 t_{B5} + \lambda_4 t_{B4}) \right] \times$$

$$\times \left[ \lambda_8 t_{B8} + \lambda_4 t_{B4} + a_{Baem4} (\lambda_8 t_{B8} + \lambda_9 t_{B9} + \lambda_5 t_{B5} + \lambda_4 t_{B4}) \right] + \lambda_5 t_{B5};$$

$$\lambda_I = 2\lambda_3 \left[ \lambda_{cm4} t_{B4} + a_{Baem4} (\lambda_8 t_{B8} + \lambda_9 t_{B9} + \lambda_5 t_{B5} + \lambda_3 t_{B3}) \right];$$

$$\lambda_{II} = 2\lambda_1 \left[ \lambda_{cm2} t_{B2} + a_{Baem2} (\lambda_{10} t_{B10} + \lambda_6 t_{B6} + \lambda_1 t_{B1} + \lambda_8 t_{B8}) \right] + \lambda_6.$$

$$\lambda_c = \lambda_I q_{II} + \lambda_{II} q_I = 2\lambda_1 q_I = 4\lambda_3 \left\{ \left[ \lambda_{CT4} t_{B4} + a_{aem4} (\lambda_8 t_{B8} + \lambda_9 t_{B9} + \lambda_5 t_{B5} + \lambda_3 t_{B3}) \right] + \lambda_5 \right\}.$$



Практическое занятие № 8.

«Расчет надежности систем логико-вероятностным методом»

*Цель занятия:* научиться оценивать надежность схем энергетических компаний с помощью логико-вероятностного метода и выбирать те схемы, для которых он оптимален.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1,5,6,7].

Примеры решения задач.

**Пример 1.** Электроснабжение потребителей собственных нужд (СН) энергоблока (ЭБ) КЭС осуществляется от рабочего трансформатора (ТСН), подключенного к выводам турбогенератора. Резервное питание – от пускорезервного трансформатора (ПРТ), подключенного к РУСН (см. рис.). В технологической схеме водяного тракта парогенератора ЭБ подключается 4 конденсатных насоса (КН), каждый из которых обеспечивает паропроизводительность котла при 50% уровне мощности ЭБ. Определить вероятность отказа ЭБ (вершинное действие) по причинам отказов КН и схемы электроснабжения СН логико-вероятностным методом (методом деревьев событий).

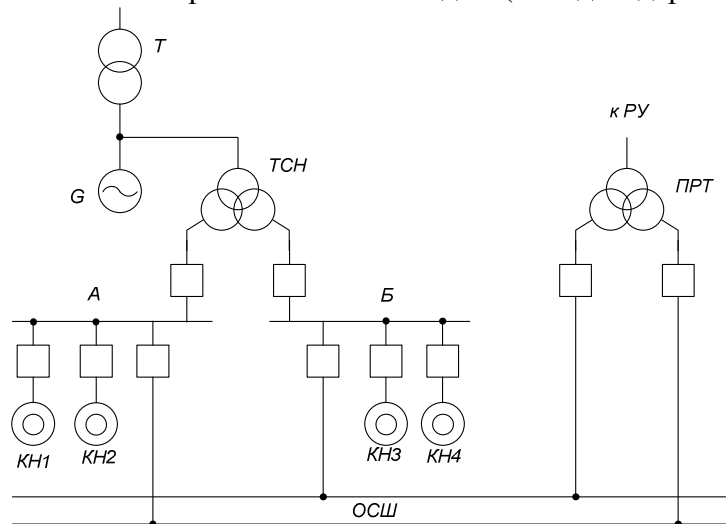


Рис. Расчетная схема электроснабжения потребителей СН

$$q_{КН1} = q_{КН2} = q_{КН3} = q_{КН4} = 6 \cdot 10^{-4};$$

$$q_A = q_B = 4,8 \cdot 10^{-4};$$

$$q_{рсш} = 0,6 \cdot 10^{-4};$$

$$q_{тсл} = q_{прт} = 1,7 \cdot 10^{-4};$$

$$q_{ру} = 0,5 \cdot 10^{-4};$$

$$q_G = 55 \cdot 10^{-4}.$$

1. Составляется структурная схема с точки зрения надежности

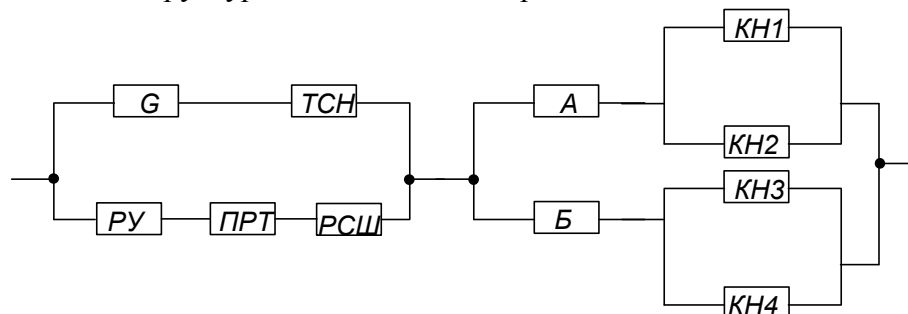
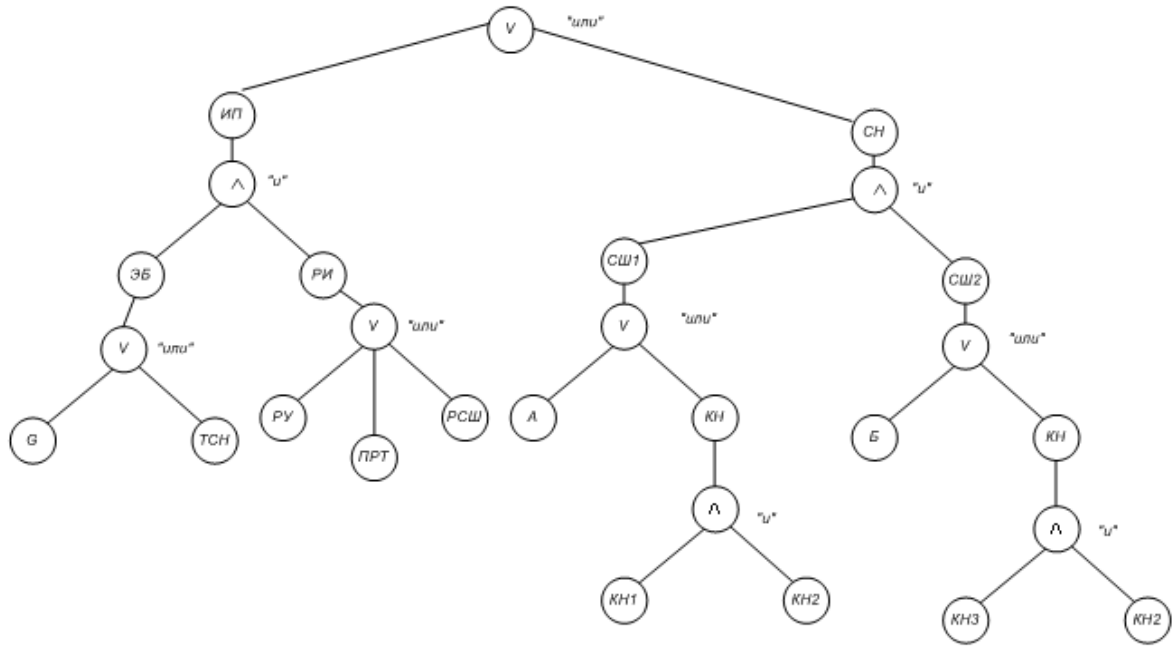


Рис. Структурная схема

## 2. Граф дерева событий



Здесь РИ – резервный источник питания  
Рис. Граф дерева событий

## 3. Логическое описание вероятности отказа:

а) в системе собственных нужд (СН):

$$\bar{X}_{CH} = \bar{X}_{сш1} \wedge \bar{X}_{сш2},$$

где

$$\bar{X}_{сш1} = \bar{X}_A \vee \bar{X}_{KH(1,2)};$$

$$\bar{X}_{сш2} = \bar{X}_B \vee \bar{X}_{KH(3,4)};$$

$$\bar{X}_{KH(1,2)} = \bar{X}_{KH1} \wedge \bar{X}_{KH2};$$

$$\bar{X}_{KH(3,4)} = \bar{X}_{KH3} \wedge \bar{X}_{KH4};$$

$$\bar{X}_{CH} = (\bar{X}_A \vee \bar{X}_{KH1} \wedge \bar{X}_{KH2}) \wedge (\bar{X}_B \vee \bar{X}_{KH3} \wedge \bar{X}_{KH4}).$$

б) для источников питания

$$\bar{X}_{ИП} = \bar{X}_{ЭБ} \wedge \bar{X}_{РИ};$$

$$\bar{X}_{ЭБ} = \bar{X}_G \vee \bar{X}_{ТСН};$$

$$\bar{X}_{РИ} = \bar{X}_{РУ} \vee \bar{X}_{ПРТ} \vee \bar{X}_{РСШ}$$

$$\bar{X}_{ИП} = (\bar{X}_G \vee \bar{X}_{ТСН}) \wedge (\bar{X}_{РУ} \vee \bar{X}_{ПРТ} \vee \bar{X}_{РСШ}).$$

в) для всей системы СН в целом

$$\bar{X} = \bar{X}_{CH} \vee \bar{X}_{ИП}.$$

4) Переход от логических переменных к вероятностным

$$q_c = q_{CH} + q_{ИП} = (q_A + q_{KH1}q_{KH2})(q_B + q_{KH3}q_{KH4}) + (q_G + q_{ТСН})(q_{РУ} + q_{прт} + q_{рсш}).$$

5) Расчет численных значений

$$q_c = (4,8 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 10^{-4})^2 + (55 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-4})(0,5 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-4} + 0,6 \cdot 10^{-4}) = 1,8 \cdot 10^{-6}$$

**Пример 2.** Определить вероятность отказа схемы РУ-500 кВ относительно генераторного блока и вероятность отказа при полном погашении РУ-500 кВ логико-вероятностным методом.

Схема РУ-500 кВ приведена на рис.

1. Составляется структурная схема с точки зрения надежности

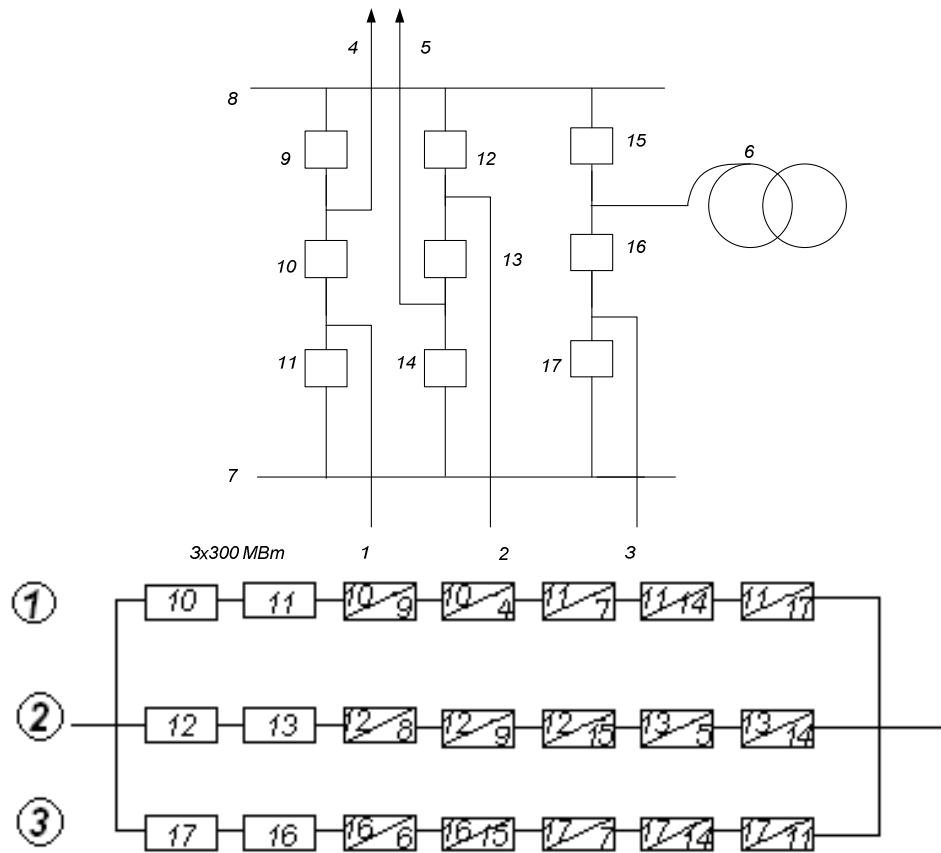
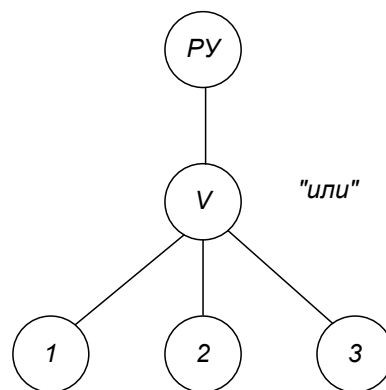


Рис. Расчетная схема РУ-500 кВ и ее схема замещения

2. Дерево событий

Отказ схемы относительно блоков в нормальном режиме



а)

Полное погашение РУ-500 кВ

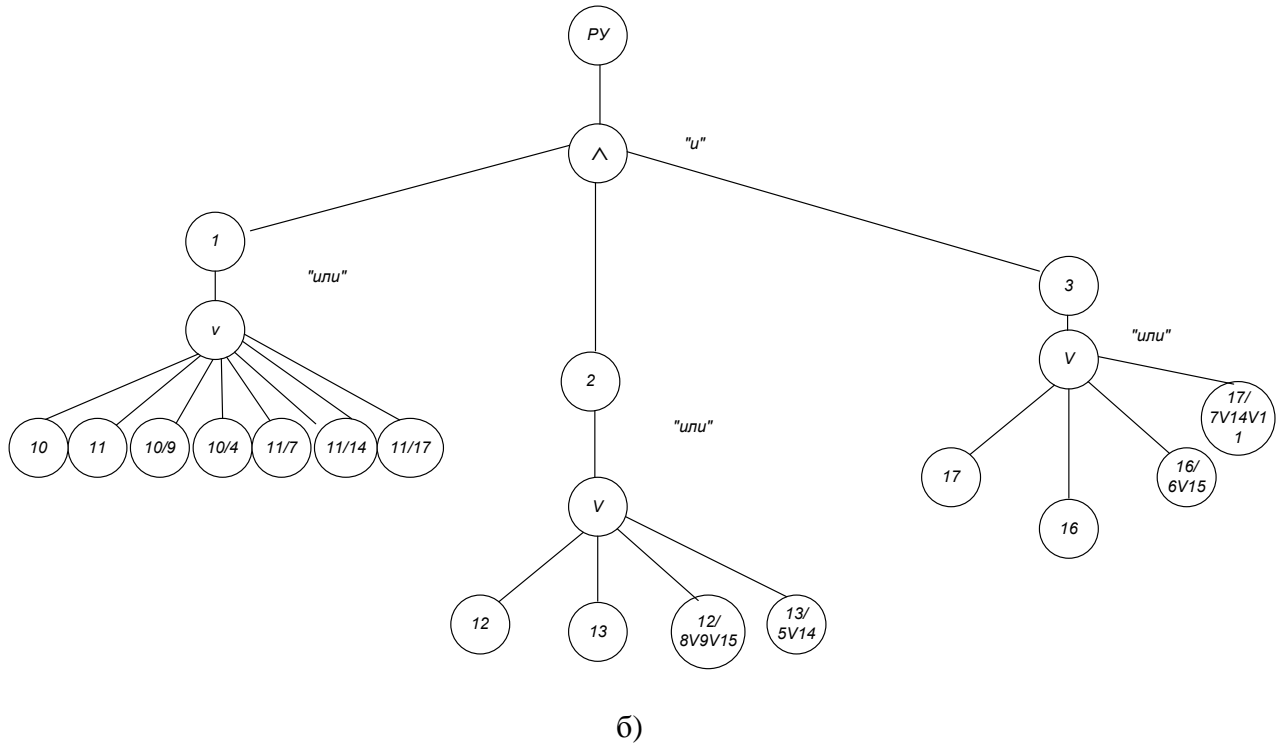


Рис. Дерево событий (ДС)

Здесь на рис. а) состояния ①, ②, ③ такие же как и на рис. б).

3. Логическое описание отказов на основе графа ДС

$\vee$  - дизъюнкция (+);  $\wedge$  - конъюнкция (x).

Генераторные блоки:

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_{10} \vee \bar{X}_{11} \vee \bar{X}(10/9) \vee \bar{X}(10/4) \vee \bar{X}(11/7) \vee \bar{X}(11/14) \vee \bar{X}(11/17);$$

$$\bar{X}_2 = \bar{X}_{12} \vee \bar{X}_{13} \vee \bar{X}(12/8) \vee \bar{X}(12/9) \vee \bar{X}(12/15) \vee \bar{X}(13/5) \vee \bar{X}(13/14);$$

$$\bar{X}_3 = \bar{X}_{17} \vee \bar{X}_{16} \vee \bar{X}(16/6) \vee \bar{X}(16/15) \vee \bar{X}(17/7) \vee \bar{X}(17/14) \vee \bar{X}(17/11).$$

Полное погашение РУ:

$$\bar{X}_{py} = \bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3.$$

Отказ схемы РУ в нормальном режиме относительно блоков

$$\bar{X}_{cx} = \bar{X}_1 \vee \bar{X}_2 \vee \bar{X}_3.$$

4. Переход от логических переменных к вероятностным

а) полное погашение РУ

$$q_1 = \omega_{cm10}T_{II} + \omega_{cm11}T_{II} + a_{aem10}\omega_9T_{II} + a_{aem10}\omega_4T_{II} + a_{aem11}(\omega_7 + \omega_{14} + \omega_{17})\omega_9T_{II} =$$

$$= [0,17 \cdot 1 + 0,17 \cdot 1 + 0,003 \cdot 1(0,21 \cdot 5 + 0,17) + 0,003(0,039 + 0,17 + 0,17)] / 8760 = 3,9326 \cdot 10^{-5}$$

$$q_2 = \omega_{cm12}T_{II} + \omega_{cm13}T_{II} + a_{aem12}(\omega_8 + \omega_9 + \omega_{15})T_{II} + a_{aem13}(\omega_5 + \omega_{14})T_{II} =$$

$$= [(0,17 \cdot 1 + 0,17 \cdot 1 + 0,003 \cdot 1(0,039 + 0,17 + 0,17 + 0,21 \cdot 5 + 0,17))] / 8760 = 3,9326 \cdot 10^{-5};$$

$$q_3 = \omega_{17}T_{II} + \omega_{16}T_{II} + a_{aem16}(\omega_6 + \omega_{15})T_{II} + a_{aem17}(\omega_7 + \omega_{11} + \omega_{14})T_{II} =$$

$$= [(0,17 \cdot 1 + 0,17 \cdot 1 + 0,003 \cdot 1(0,072 + 0,17 + 0,039 + 0,17 + 0,17))] / 8760 = 3,903 \cdot 10^{-5}.$$

$$q_{py} = q_1 q_2 q_3 = 10^{-15} - \text{практически невозможное событие.}$$

б) отказ схемы относительно блоков в нормальном режиме

$$q_{cx} = q_1 + q_2 + q_3 = 2 \cdot 3,9236 \cdot 10^{-5} + 3,903 \cdot 10^{-5} = 11,769 \cdot 10^{-5}.$$

Условный недоотпуск при отказе генераторных блоков из-за ненадежной работы РУ-500 кВ (нормальная схема)

$$\Delta W_{нео} = K_{max} P_{бл} q_{cx} = 0,5 \cdot 300 \cdot 11,769 \cdot 10^{-5} \cdot 8760 = 15,464 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

### Практическое занятие № 9.

«Оценка надежности систем методом путей и минимальных сечений»

*Цель занятия:* научиться оценивать надежность сложных систем при рассмотрении случаев полной работоспособности и полного отказа.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1,3,5].

Примеры решения задач.

*Пример.* Для узла схемы II определить вероятность отказа системы с учетом преднамеренных отключений элементов. Отказы узлов не учитывать.

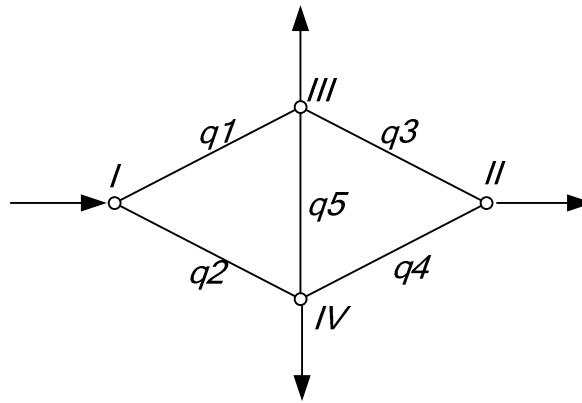


Рис. Граф сети

Определим вероятность отказа схемы относительно узла II.

Матрица сечений исходной схемы:

$$C_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Показываем минимальные сечения от ИП к узлу II для нормального режима.

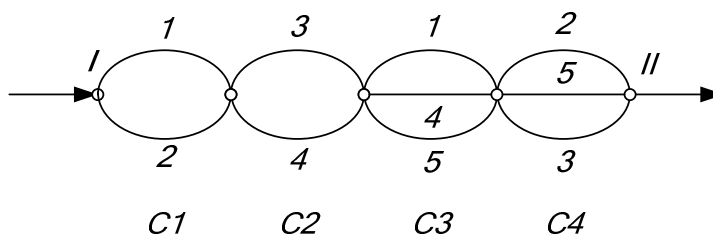


Рис. Структурная схема сечений нормального режима

Рассмотрим ремонтные режимы.

Ремонтный режим: отключение первого элемента.

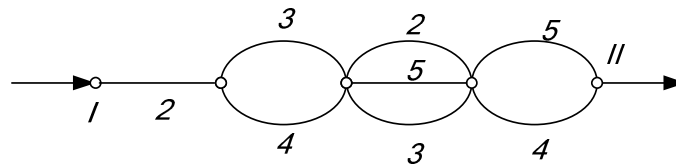


Рис. Структурная схема сечений первого ремонтного режима  
Откуда

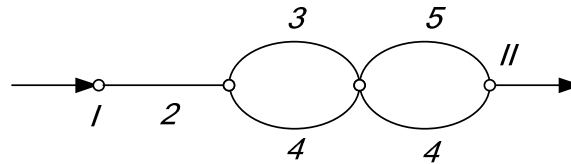


Рис. Упрощенная структурная первого ремонтного режима

В упрощенной схеме пренебрегаем вероятностью отключения трех элементов, т.к. она будет умножаться на вероятность преднамеренного отключения первого элемента.

Матрица сечений схемы

$$C_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_{1-1} \\ c_{1-2} \\ c_{1-3} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Отключение второго элемента

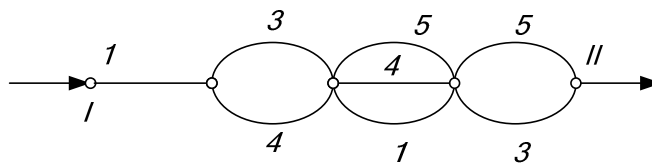


Рис. Структурная схема сечений второго ремонтного режима  
Откуда

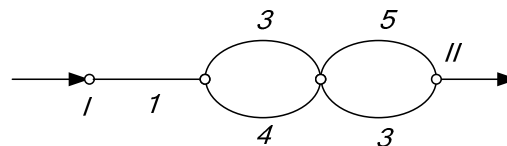


Рис. Упрощенная структурная второго ремонтного режима

$$C_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_{2-1} \\ c_{2-2} \\ c_{2-3} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Отключение третьего элемента

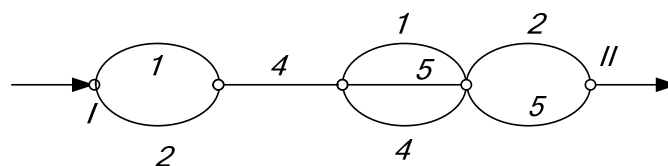


Рис. Структурная схема сечений третьего ремонтного режима

Откуда

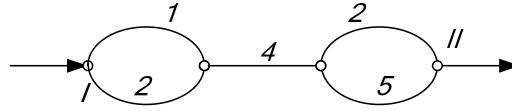


Рис. Упрощенная структурная третьего ремонтного режима

$$\begin{aligned} c_{3-1} &: (1,2) \\ c_{3-2} &: (4) \quad . \\ c_{3-3} &: (2,5) \end{aligned}$$

Отключение четвертого элемента

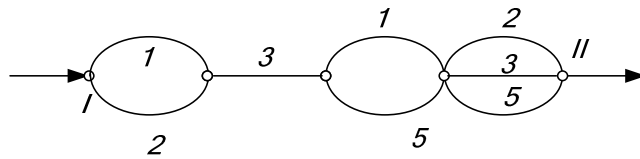


Рис. Структурная схема сечений четвертого ремонтного режима

Откуда

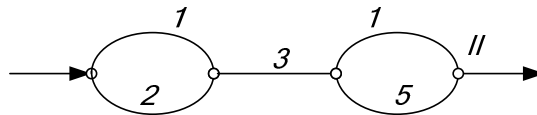


Рис. Упрощенная структурная четвертого ремонтного режима

$$\begin{aligned} c_{4-1} &: (1,2) \\ c_{4-2} &: (3) \quad . \\ c_{4-3} &: (1,5) \end{aligned}$$

Отключение пятого элемента

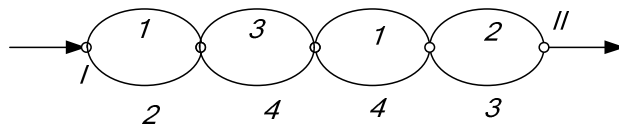


Рис. Структурная схема сечений пятого ремонтного режима

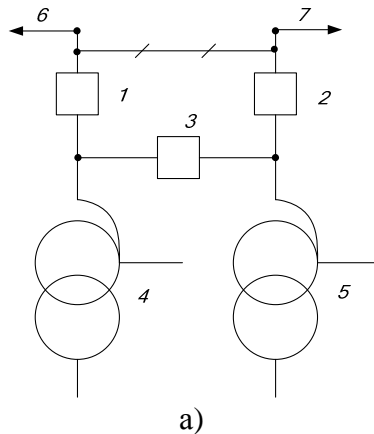
$$\begin{aligned} c_{5-1} &: (1,2) \\ c_{5-2} &: (3,4) \\ c_{5-3} &: (1,4) \quad . \\ c_{5-4} &: (2,3) \end{aligned}$$

Вероятность отказа схемы относительно узла II с учетом преднамеренных отключений равна

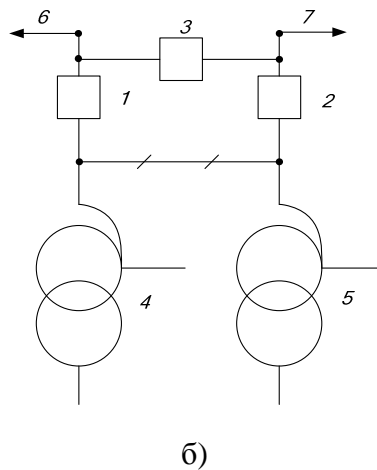
$$\begin{aligned} q_c = & q_1 q_2 + q_3 q_4 + q_1 q_4 q_5 + q_2 q_5 q_3 + k_{np1} q_{np1} (q_2 + q_3 q_4 + q_4 q_5) + k_{np2} q_{np2} (q_1 + q_3 q_4 + q_5 q_3) + \\ & + k_{np3} q_{np3} (q_1 q_2 + q_4 + q_2 q_5) + k_{np4} q_{np4} (q_1 q_2 + q_3 + q_1 q_5) + k_{np5} q_{np5} (q_1 q_2 + q_3 q_4 + q_1 q_4 + q_2 q_3). \end{aligned}$$

*Примеры анализа надежности схем различных типов методом путей и минимальных сечений*

Мостик с выключателями в цепях линий



Мостик с выключателями в цепях автотрансформаторов



«Четырехугольник»

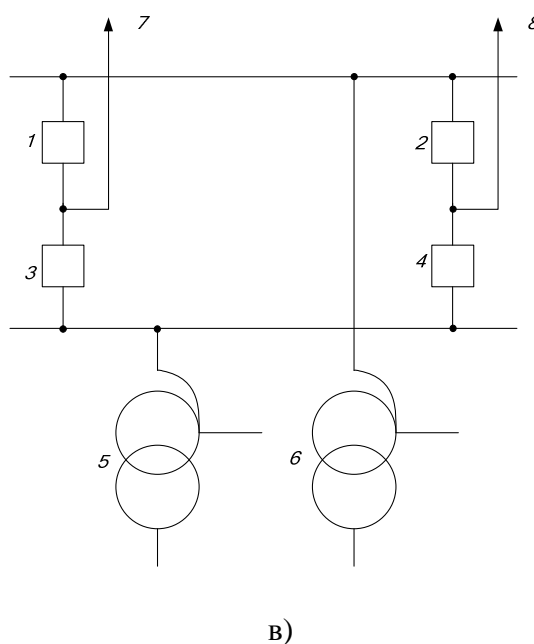


Рис. Расчетные схемы подстанций



1) Полное погашение подстанции (т.е. отключение обеих ВЛ и обоих АТ).  
 Схема а).

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} c-1 \\ c-2 \\ c-3 \\ c-4 \\ c-5 \\ c-6 \\ c-7 \\ c-8 \\ c-9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} .$$

Минимальные сечения для нормального режима.

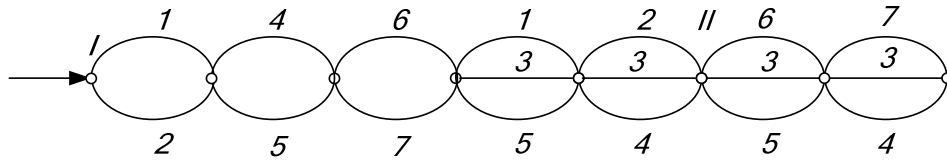


Рис. Нормальный режим

$$q_c = q_1q_2 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_1q_3q_5 + q_2q_3q_4 + q_6q_3q_5 + q_7q_3q_4 .$$

Отключение 1(2) – ремонтный режим.

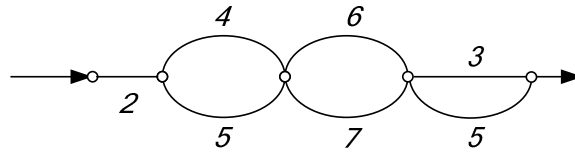


Рис. Первый ремонтный режим

Остальными сечениями, т.е. 2,3,5; 6,3,5; 7,3,4 пренебрегаем, т.к. значение  $q_c$  в этом случае пренебрежимо мало.

$$q_c = q_2 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_3q_5$$

или

$$q_c = q_1 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_3q_4 .$$

Отключение 4(5) – ремонтный режим.

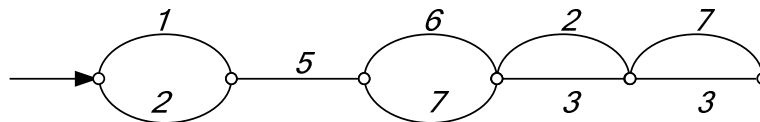


Рис. Второй ремонтный режим

$$q_c = q_1q_2 + q_5 + q_6q_7 + q_2q_3 + q_7q_3$$

или

$$q_c = q_1q_2 + q_4 + q_6q_7 + q_6q_3 + q_1q_3 .$$

Отключение б(7) – ремонтный режим.

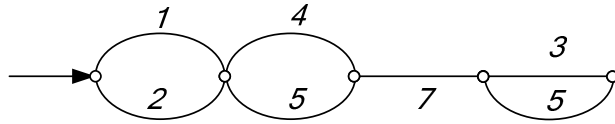


Рис. Третий ремонтный режим

$$q_c = q_1q_2 + q_4q_5 + q_7 + q_3q_5$$

или

$$q_c = q_1q_2 + q_4q_5 + q_6 + q_3q_4.$$

Отключение 3 – ремонтный режим.

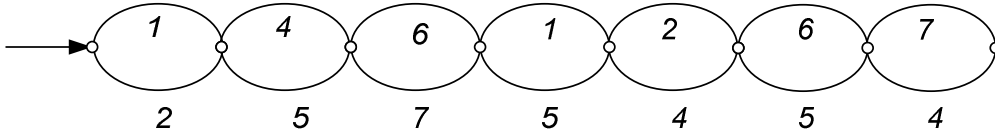


Рис. Четвертый ремонтный режим

$$q_c = q_1q_2 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_1q_5 + q_2q_4 + q_6q_5 + q_7q_4;$$

$$q_c = q_1q_2 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_1q_3q_5 + q_2q_3q_4 + q_1q_2q_6 + q_6q_3q_5 + q_7q_3q_4 + 2k_{np1}q_{np1} \times \\ \times (q_{2(1)} + q_4q_5 + q_6q_7 + q_3q_5) + 2k_{np4}q_{np4} (q_1q_2 + q_{5(4)} + q_6q_7 + q_2q_3 + q_7q_3) + \\ + 2k_{np6}q_{np6} (q_1q_2 + q_4q_5 + q_{7(6)} + q_3q_5) + k_{np3}q_{np3} (q_1q_2 + q_4q_5 + q_6q_6 + q_1q_5 + q_2q_4 + q_6q_5 + q_7q_4).$$

Схема б) анализируется аналогично.

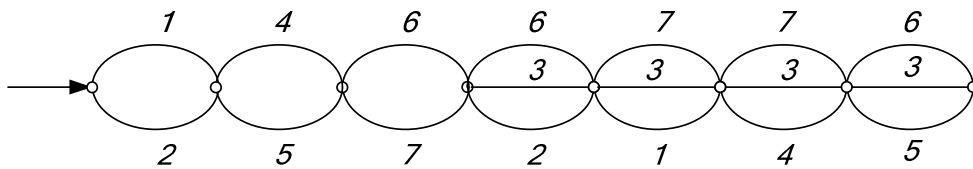


Рис. Нормальный режим схемы б)

$$q_c = q_1q_2 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_6q_3q_2 + q_7q_3q_1 + q_7q_3q_4 + q_6q_3q_5 + 2k_{np1}q_{np1} (q_{2(1)} + q_4q_5 + q_6q_7 + q_{7(6)}q_3) + \\ + 2k_{np4}q_{np4} (q_1q_2 + q_{5(4)} + q_6q_7 + q_{7(6)}q_3) + 2k_{np6}q_{np6} (q_1q_2 + q_4q_5 + q_{7(6)} + q_{2(1)}q_3 + q_3q_{5(4)}) + \\ + 2k_{np3}q_{np3} (q_1q_2 + q_4q_5 + q_6q_7 + q_{6(7)}q_2 + q_7q_1 + q_6q_2 + q_6q_5)$$

Схема в).

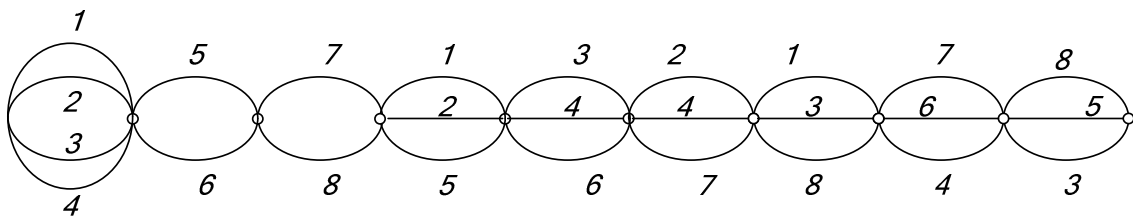


Рис. Нормальный режим работы схемы в)

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} c-1 \\ c-2 \\ c-3 \\ c-4 \\ c-5 \\ c-6 \\ c-7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} .$$

$$q_c = q_1 q_2 q_3 q_4 + q_5 q_6 + q_7 q_8 + q_1 q_2 q_5 + q_3 q_4 q_6 + q_2 q_4 q_7 + q_1 q_3 q_8 + q_7 q_6 q_4 + q_8 q_5 q_3 +$$

$$+ 2k_{np1(3)} q_{np1(3)} (q_2 q_3 q_4 + q_5 q_6 + q_7 q_8 + q_2 q_5 + q_3 q_4 q_7 + q_2 q_4 q_7 + q_3 q_8 + q_6 q_7 q_4 + q_8 q_5 q_3) +$$

$$+ 2k_{np2(4)} q_{np2(4)} (q_1 q_3 q_4 + q_5 q_6 + q_7 q_8 + q_1 q_5 + q_3 q_4 q_6 + q_4 q_7 + q_1 q_3 q_8 + q_7 q_6 q_4 + q_8 q_5 q_3) +$$

$$+ 2k_{np5} q_{np5(6)} (q_1 q_2 q_3 q_4 + q_6 + q_7 q_8 + q_1 q_2 + q_8 q_3) + 2k_{np7} q_{np7} (q_5 q_6 + q_{8(7)} + q_6 q_4)$$

**Практическое занятие № 10.**  
«Определение надежности распределительных сетей 35-110 кВ»

*Цель занятия:* изучить особенности расчета надежности распределительных сетей 35-110 кВ.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1,8].

Примеры решения задач.

**Пример.** Определить показатели надежности в расчетных точках схемы сети 110 кВ: точке А (II с.ш. ПС1) и точке В (см. рис.).

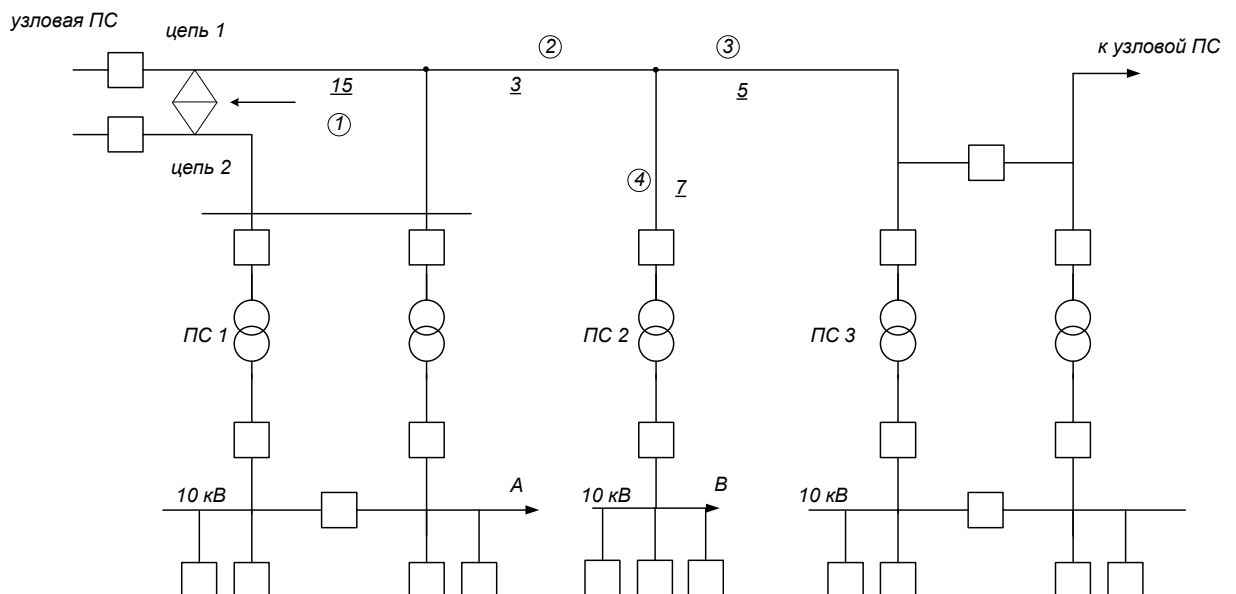


Рис. Расчетная схема сети

Цифра в кружке – номер участка. Подчеркнутая цифра – длина участка, км. Первый участок ВЛ 110 кВ – двухцепная линия. ПС1 и ПС2 без обслуживающего персонала.

$$l_{\Sigma 10 ПС1} = 50 \text{ км}, \quad l_{\Sigma 10 ПС2} = 30 \text{ км}, \quad l_{ДП-ПС1} = 20 \text{ км}, \quad l_{ДП-ПС2} = 25 \text{ км}.$$

$$\nu = 20 \text{ км/ч}, \quad K_{кр} = 1,3, \quad K_{рз10} = 0,015, \quad K_{рз110} = 0,01, \quad \omega_{010\Sigma} = 1,25 \text{ год}^{-1},$$

$$\omega_{0110\Sigma} = 0,3 \text{ год}^{-1}.$$

$\omega_{0110} = 0,06 \text{ год}^{-1}$  (параметр потока отказов одной цепи ВЛ 110 кВ);  $T_{B110} = 4,8 \text{ ч}$  – время восстановления одной цепи ВЛ 110 кВ;  $T_{B110}^{(2)} = 5,8 \text{ ч}$  – время восстановления двух цепей ВЛ 110 кВ;  $T_{np110}^{(2)} = 6 \text{ ч}$  – время восстановления одной цепи после преднамеренного отключения.

**Решение.** Определение показателей надежности в точке А.

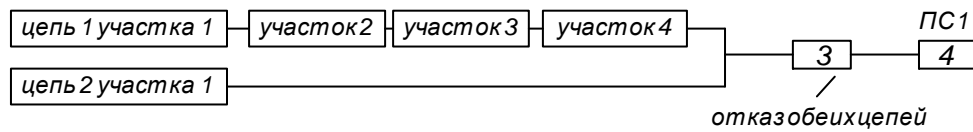


Рис. Подробная расчетная схема

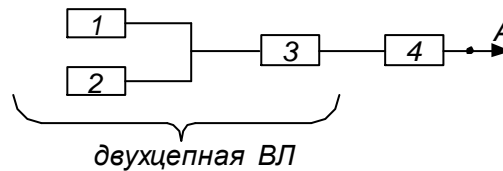


Рис. Схема замещения

Рассчитываем показатели надежности элементов, входящих в схему замещения.

Элемент 1 – отказ цепи 1 участка 1 и участков 2, 3, 4 ВЛ 110 кВ:

$$\omega_1 = \omega_{1(цепи)} + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = \omega_{0110} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) = \omega_{0110} l_{\Sigma} = 0,06 \cdot 30 = 1,8 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{B1} = T_{B110} = 4,8 \text{ ч};$$

$$\omega_{np1} = \omega_{np110}^0 (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) = 0,1 \cdot 30 = 3 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{np1} = T_{np110} = 6 \text{ ч}.$$

Элемент 2 – отказ цепи 2 участка 1 ВЛ 110 кВ:

$$\omega_2 = \omega_{0110} l_1 = 0,06 \cdot 15 = 0,9 \text{ год}^{-1};$$

$$\omega_{np2} = \omega_{np110}^0 l_1 = 0,1 \cdot 15 = 1,5 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{B2} = T_{B110} = 4,8 \text{ ч};$$

$$T_{np2} = T_{np110} = 6 \text{ ч}.$$

Элемент 3 – одновременный отказ обеих цепей участка 1 ВЛ 110 кВ

$$\omega_3 = \omega_{одн0} = 0,008 \cdot 15 = 0,12 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{B3} = 5,8 \text{ ч};$$

$$\omega_{np} = T_{np} = 0.$$

Элемент 4 – отказ двухтрансформаторной ПС1 с питанием по двум ВЛ-110кВ с двумя линейными выключателями при ручном резервировании по сети 10 кВ от соседней ПС:

$$\begin{aligned}\omega_{p310} &= \omega_{0\Sigma10} l_{\Sigma10} K_{p310} = 1,25 \cdot 30 \cdot 0,015 = 0,5625 \text{ год}^{-1}; \\ l_{\Sigma110} &= l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = 15 \cdot 2 + 3 + 5 + 7 = 45 \text{ км}; \\ \omega_{p3110} &= \omega_{0\Sigma110} l_{\Sigma110} K_{p3110} = 0,3 \cdot 45 \cdot 0,01 = 0,135 \text{ год}^{-1}; \\ \omega_{4.110} &= 0,2 + \omega_{p310} + \omega_{p3110} = 0,2 + 0,5625 + 0,135 = 0,9 \text{ год}^{-1}; \\ T_{\text{непПС1}} &= 0,3 + l_{\text{ДПП-ПС}} K_{\text{кр}} \nu^{-1} = 0,3 + 20 \cdot 1,3 \cdot 20^{-1} = 1,6 \text{ ч}.\end{aligned}$$

Годовая продолжительность отключений элемента 4:

$$\begin{aligned}\theta_4 &= 0,6(\omega_{p310} + \omega_{p3110}) T_{\text{непПС}} = 0,6(0,5625 + 0,135) 1,6 = 1,72 \text{ ч} / \text{год}; \\ \omega_{\text{np4}} &= T_{\text{np4}} = 0.\end{aligned}$$

3) Производится поэтапное преобразование схемы замещения и определение показателей надежности в расчетной точке А.

Элемент 5 – отказ параллельно соединенных элементов 1 и 2:

$$\begin{aligned}\omega_5 &= \left[ \omega_1 \omega_2 (T_{B1} + T_{B2}) + \omega_1 \omega_{\text{np1}} T_{\text{np1}} + \omega_2 \omega_{\text{np1}} T_{\text{np1}} \right] \cdot \frac{1}{8760} = \omega^I + \omega^{II} + \omega^{III} = \\ &= \left[ 1,8 \cdot 0,9 (4,8 + 4,8) + 1,8 \cdot 1,5 \cdot 6 + 0,9 \cdot 3 \cdot 0,6 \right] \cdot \frac{1}{8760} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};\end{aligned}$$

$$T_B^I = \frac{T_{B1} T_{B2}}{T_{B1} + T_{B2}} = \frac{4,8^2}{2 \cdot 4,8} = 2,4 \text{ ч};$$

$$T_B^{II} = T_B^{III} = \frac{4,8 \cdot 6}{4,8 + 6} = 2,72 \text{ ч}.$$

Годовая продолжительность отключений элемента 5:

$$\theta_5 = \omega^I T_B^I + \omega^{II} T_B^{II} + \omega^{III} T_B^{III} = 12,26 \cdot 10^{-3} \text{ ч} / \text{год};$$

$$T_{05} = \theta_5 \omega_5^{-1} = 2,66 \text{ ч}; \quad \omega_{\text{np5}} = 0; \quad T_{\text{np5}} = 0.$$

Показатели надежности в расчетной точке А (последовательно соединенные элементы 5,3,4):

$$\omega_A = \omega_5 + \omega_3 + \omega_4 = 4,6 \cdot 10^{-3} + 0,12 + 0,9 = 1,025 \text{ 1} / \text{год};$$

$$\theta_A = \theta_5 + \omega_3 T_{B3} + \theta_4 = 12,26 \cdot 10^{-3} + 0,12 \cdot 5,8 + 1,72 = 2,34 \text{ ч} / \text{год};$$

$$T_{BA} = \frac{\theta_A}{\omega_A} = 2,4 \text{ ч}; \quad \omega_{\text{npA}} = 0; \quad T_{\text{npA}} = 0.$$

Определение показателей надежности в расчетной точке В.

1) Составляется схема замещения.

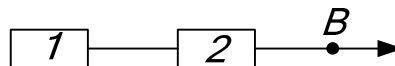


Рис. Схема замещения сети относительно точки В

2) Производится расчет надежности элементов схемы замещения.

Элемент 1 (отказ цепи 1 и участков 2,3,4 ВЛ 110 кВ) – показатели определяются аналогично элементу 1 для расчетной точки А:

$$\omega_1 = 1,8 \text{ 1} / \text{год}; \quad T_{B1} = 4,8 \text{ ч}; \quad \omega_{\text{np1}} = 3 \text{ 1} / \text{год}; \quad T_{\text{np1}} = 6 \text{ ч}.$$

Элемент 2 (отказ трансформаторной подстанции ПС2, питание по одной ВЛ 110 кВ):

$$\omega_{p_{310}пс2} = \omega_{10\Sigma}^0 I_{\Sigma 10} K_{p_{310}} = 1,25 \cdot 50 \cdot 0,015 = 0,94 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{непПс2} = 0,3 + 25 \cdot 1,3 \cdot 20^{-1} = 1,925 \text{ ч}.$$

Без резервирования по сети 10 кВ:

$$\omega_{2}^{\delta/p} = 0,05 + \omega_{p_{310}} = 0,05 + 0,94 = 0,99 \text{ 1/год};$$

$$\theta_{2}^{\delta/p} = 1,8 + \omega_{p_{310}} T_{непПс2} = 1,8 + 0,94 \cdot 1,925 = 3,61 \text{ ч/год}.$$

Резервирование вручную от соседней подстанции:

$$\omega_{2}^{p/p} = \omega_{p_{310}} = 0,94 \text{ 1/год};$$

$$\theta_{B2}^{p/p} = \omega_{p_{310}} T_{непПс2} = 1,81 \text{ ч/год}.$$

Автоматическое резервирование от соседней подстанции:

$$\omega_{2}^{a/p} = 0,2 + \omega_{p_{310}} = 1,14 \text{ 1/год};$$

$$\theta_{B2}^{a/p} = 2,5 + \omega_{p_{310}} T_{непПс2} = 4,31 \text{ ч/год}.$$

3) Определяются показатели надежности в расчетной точке В:

$$\omega_B^{\delta/p} = \omega_1 + \omega_2^{\delta/p} = 2,89 \text{ 1/год};$$

$$\theta_B^{\delta/p} = \omega_1 T_{B_1} + \theta_2^{\delta/p} = 12,25 \text{ ч/год}.$$

$$\omega_B^{p/p} = 1,8 + 0,94 = 2,74 \text{ 1/год};$$

$$\theta_B^{p/p} = 1,8 \cdot 4,8 + 1,81 = 10,45 \text{ ч/год}.$$

$$\omega_B^{a/p} = 1,8 + 1,14 = 2,94 \text{ 1/год};$$

$$\theta_B^{a/p} = 1,8 \cdot 4,8 + 4,31 = 12,95 \text{ ч/год}.$$

#### Практическое занятие № 11.

##### «Расчет надежности кольцевых и петлевых схем»

*Цель занятия:* Научиться определять надежность кольцевых и петлевых схем.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1,8].

Примеры решения задач.

#### Задача 1

Система передачи электроэнергии состоит из двух повышающих трансформаторов ( $T_1$ ), трёх ЛЭП (а,б,с) и двух понижающих подстанциями с трансформаторами  $T_2$ , и  $T_3$ . Пропускные способности ЛЭП и трансформаторов указаны в табл.

Таблица. Исходные данные к задаче

Элемент сети	а	б	с	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Пропускная способность, (МВА)	70	30	20	100/100	70/20/50	30/20
q	0,08	0,05	0,01	0,003	0,004	0,002

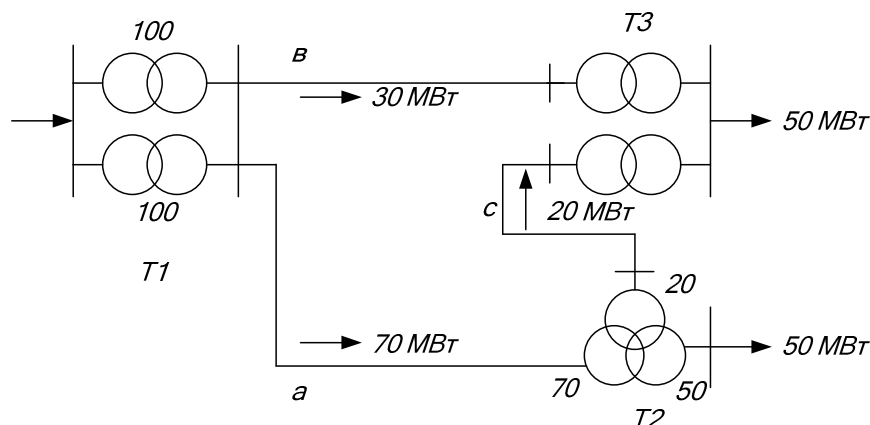


Рис. Схема электрической сети

Определить вероятность потери потребителями 50 МВт, 70 МВт.

### Решение

При повреждении любой обмотки трёхобмоточного трансформатора он отключается. Для того чтобы потребители получали 50 МВт, необходима в любом случае работа:

1. хотя бы одного трансформатора ПС 1, т.е. T<sub>1</sub>;
2. обязательная работа ЛЭП - "а";
3. обязательная работа T<sub>2</sub>.

Тогда вероятность потери потребителями 50 МВт:

$$\begin{aligned}
 p(P_{\text{деф}} = 50 \text{ Мвт}) &= p(P_{\text{неп}} = 50 \text{ Мвт}) = (1 - q_{T1}^2) p_a p_{T2} [(q_b + q_{T3} - q_b q_{T3})(q_c + q_{T3} - q_c q_{T3})] = \\
 &= (1 - 0,003^2)(1 - 0,08)(1 - 0,04)[(0,05 + 0,002 - 0,05 \cdot 0,002) \times \\
 &\quad \times (0,01 + 0,002 - 0,01 \cdot 0,002)] = 5,73 \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned}$$

Аналогично рассуждая, определим вероятность потери 70 МВт и 30 МВт.

$$\begin{aligned}
 p(P_{\text{деф}} = 70 \text{ Мвт}) &= p(P_{\text{неп}} = 30 \text{ Мвт}) = (1 - q_{T1}^2) p_B p_{T3} (q_a + q_{T2} - q_a q_{T2})(p_c + q_c)(p_{T3} + q_{T3}) = \\
 &= 7,95 \cdot 10^{-2}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p(P_{\text{деф}} = 30 \text{ Мвт}) &= p_{T1} \{ q_{T3}^2 (1 - q_{T1}^2) [1 - q_B (q_a + q_c - q_a q_c)] + \\
 &\quad + q_{T2}^2 (1 - q_{T3}^2) [1 - q_a (q_B + q_c - q_B q_c)] \} = \\
 &= 0,999 \{ 0,003^2 (1 - 0,002^2) [1 - 0,06(0,07 + 0,09 - 0,07 \cdot 0,09)] + \\
 &\quad + 0,002^2 (1 - 0,003^2) [1 - 0,07(0,06 + 0,09 - 0,06 \cdot 0,09)] \} = 1,292 \cdot 10^{-5}.
 \end{aligned}$$

## Задача 2

Система передачи электроэнергии состоит из одного повышающего трансформатора  $T_1$ , трёх ЛЭП (а, б, с) и двух ПС с понижающими трансформаторами  $T_2$  и  $T_3$ . Пропускные способности ЛЭП и трансформаторов указаны в таблице.

Таблица. Исходные данные к задаче

Элемент сети	а	б	с	$T_1$	$T_2$	$T_3$
Пропускная способность, МВт	60	60	60	30/30	30/30	
$q$	0,07	0,06	0,09	0,001	0,002	0,003

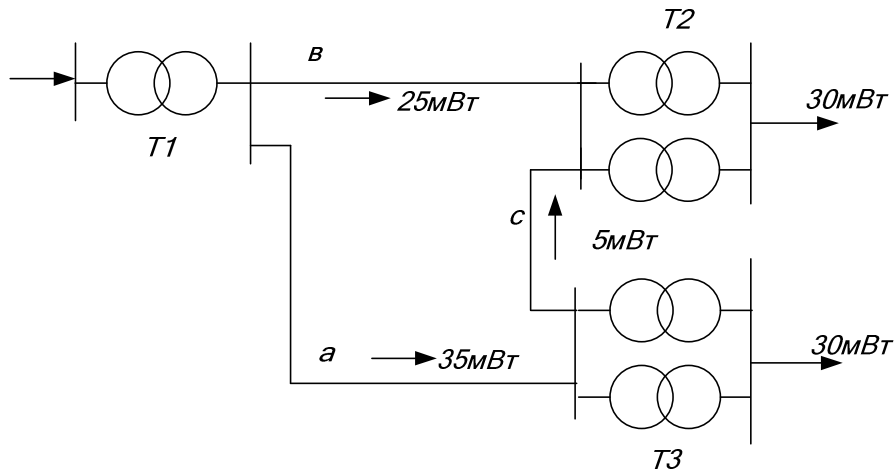


Рис.

Определить вероятность потери потребителями 30 МВт мощности.

### Решение

В любом случае должен оставаться в работе трансформатор  $T_1$ , хотя бы одна ЛЭП: "а" или "б", хотя бы один из трансформаторов на подстанциях:  $T_2$  или  $T_3$ .

Обозначим:

$$\begin{aligned} 1 - q_{T_1} &= p_{T_1}; & 1 - q_b &= p_b; \\ 1 - q_{T_2} &= p_{T_2}; & 1 - q_a &= p_a; \\ 1 - q_{T_3} &= p_{T_3}; & 1 - q_c &= p_c. \end{aligned}$$

Тогда вероятность потери 30 МВт мощности потребителями равна

$$\begin{aligned} p(30) &= p_{T_1} \left[ q_a q_c p_b (1 - q_{T_2}^2) + q_b q_c p_a (1 - q_{T_3}^2) \right] + \\ &+ q_{T_3}^2 (1 - q_{T_2}^2) (p_b + p_a p_c) + q_{T_2}^2 (1 - q_{T_3}^2) (p_b p_c + p_a) \Big] = \\ &= 0,999 \left[ 0,07 \cdot 0,09 \cdot 0,94 (1 - 0,002^2) + 0,06 \cdot 0,09 \cdot 0,93 (1 - 0,003^2) \right] + \\ &+ 0,003^2 (1 - 0,002^2) (0,94 + 0,93 \cdot 0,91) + 0,002^2 (1 - 0,003^2) (0,94 \cdot 0,91 + 0,93) = 5,98 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$



Пример. Составить схему замещения петлевой схемы в нормальном режиме.

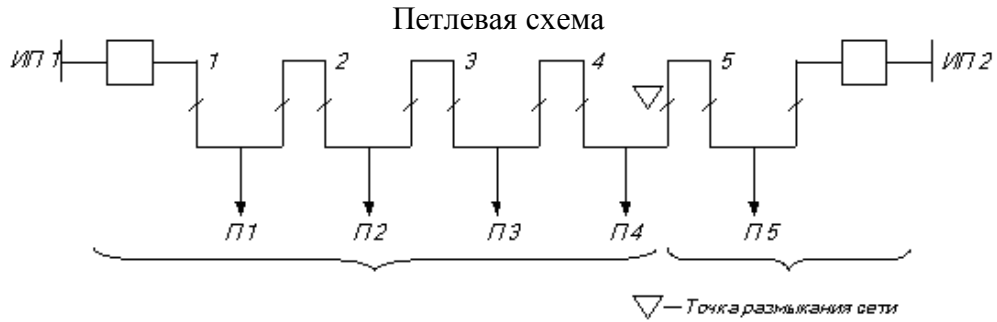


Рис. Результирующая распределительная сеть с двумя независимыми источниками питания

Нормальный режим – сеть разомкнута.

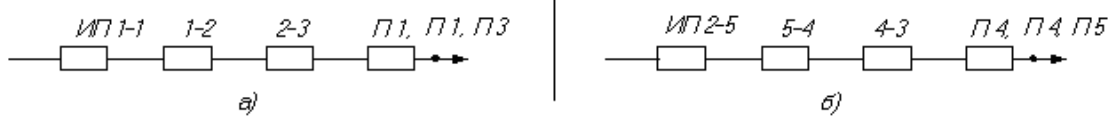


Рис. Схема замещения полуцепочки сети

### Практическое занятие № 12.

«Расчет надежности сложноразомкнутых схем энергосистем»

Цель занятия: рассмотреть способы определения надежности сложноразомкнутых схем.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1].

#### Пример решения задачи.

Система передачи электроэнергии состоит из пяти линий передачи (см. рис.) и двух понижающих трансформаторов в пункте 4.

Пропускная способность каждой линии относительно узла нагрузки п.4 составляет 100% мощности, передаваемой в п.4.

Пропускная способность каждого понижающего трансформатора 50%. вероятность отказов состояний линии А, В, С, Д, Е соответственно  $q_A=0,15$ ,  $q_B=0,1$ ,  $q_C=0,2$ ,  $q_D=0,12$ ,  $q_E=0,01$ , каждого трансформатора Т1  $q_{T1}=0,003$ .

Считая график потребления мощности в п.4 постоянным и неизменным в течение рассматриваемого периода времени, определить вероятность передачи 100%, 50%, и 0% мощности потребителю п.4.

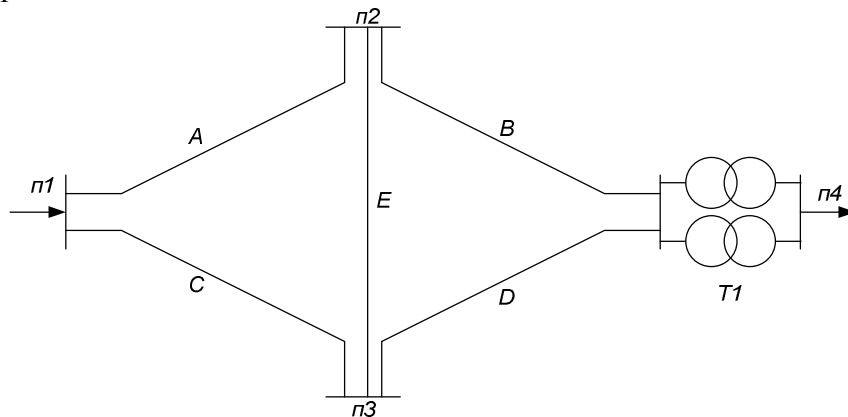


Рис.

## Решение

Первый способ.

Для решения этой задачи неприменимы методы расчётов последовательных и параллельных соединений схем, поэтому целесообразно воспользоваться формулой полной вероятности. В качестве "особого" элемента целесообразно выбрать элемент Е.

1. Вероятность передачи полной мощности в п.4

$$P(100\%) = p_{T1}^2 \left\{ p_E (1 - q_A q_C) (1 - q_B q_D) + q_E [1 - (q_A + q_B - q_A q_B)] [1 - (q_C + q_D - q_C q_D)] \right\} = \\ = p_{T1}^2 p(F) = 0,9486.$$

2. Вероятность передачи 50% мощности:

$$P(50\%) = P(F) 2 p_{T1} q_{T1} = 0,953 \cdot 2 \cdot 0,003 \cdot 0,997 = 0,0057.$$

Здесь  $p(F)$  - вероятность надёжной работы системы относительно шин высшего напряжения ПС п.4.

3. Вероятность передачи 0% мощности, т.е. полной потери питания:

$$q = p(0\%) = 1 - p(100\%) - p(50\%) = 1 - 0,948 - 0,0057 = 0,0457$$

Второй способ.

Воспользуемся представлением исходной сложной схемы относительно узла нагрузки п. 4 структурной с помощью метода путей и минимальных сечений.

Заметим, что при определении вероятности передачи 100% мощности два трансформатора Т1 ПС 4 целесообразно в структурной схеме путей представить в виде одного эквивалентного элемента, с вероятностью надёжной работы  $p_{T1}^2$ .

Эквивалентная схема путей от узла источника питания п.1 до узла нагрузки п. 4

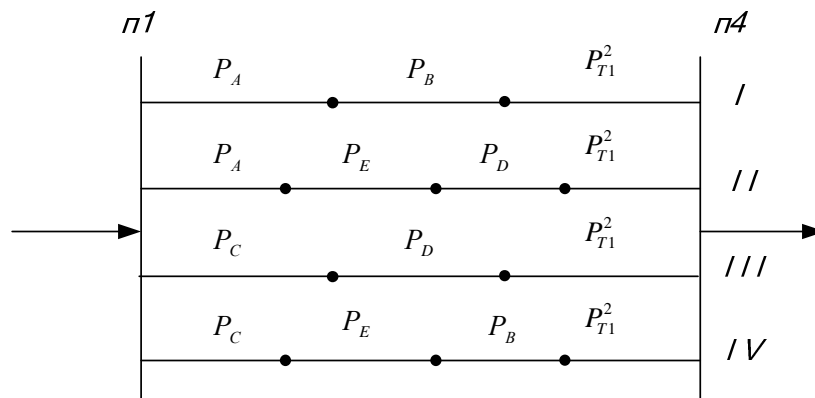


Рис.

1. Вероятность передачи 100% мощности определим как вероятность надёжной работы четырёх путей: I, II, III, IV.

$$P(100\%) = p_I + p_{II} + p_{III} + p_{IV} - p_I p_{II} - p_I p_{III} - p_I p_{IV} - p_{II} p_{III} - p_{II} p_{IV} - p_{III} p_{IV} + p_I p_{II} p_{III} + \\ + p_I p_{II} p_{IV} + p_I p_{III} p_{IV} + p_{II} p_{III} p_{IV} - p_I p_{II} p_{III} p_{IV} = p_{T1}^2 \left\{ p_A p_B + p_A p_E p_D + p_C p_D + p_C p_E - \right. \\ \left. - (p_A p_B p_E + p_A p_B p_C p_D + p_A p_B p_C p_E + p_A p_E p_C p_D + p_A p_E p_D p_C p_B + p_C p_D p_E p_B) + 4 p_A p_B p_C p_D p_E \right. \\ \left. - p_A p_B p_C p_D p_E \right\} = p_{T1}^2 P(F) = 0,948.$$

Здесь  $P(F)$  - вероятность надёжной работы схемы относительно шин ВН п. 4.

2. При определении вероятности передачи 50% мощности число путей в эквивалентной схеме путей увеличивается в два раза по сравнению с предыдущим случаем, если параллельно соединённые трансформаторы Т1 не представить одним

эквивалентным с вероятностью надёжной работы  $2p_{T1}q_{T1}$ . Тогда

$$P(50\%) = 2p_{T1}q_{T1}P(F) = 0.0057.$$

3. При определении вероятности полной потери питания целесообразно воспользоваться представлением исходной схемы с помощью минимальных сечений.

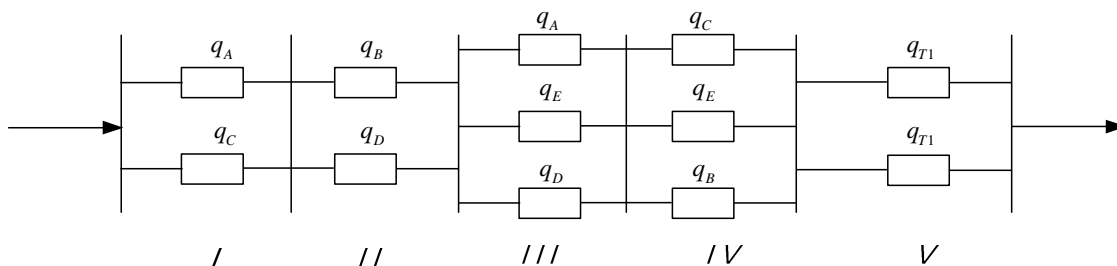


Рис. Расчетная схема замещения

Вероятность полной потери питания определим как вероятность отказов состояний пяти сечений:

$$P(0\%) = q_I + q_{II} + q_{III} + q_{IV} + q_V = q_A q_C + q_B q_D + q_A q_E q_D + q_C q_E q_B + q_{T1}^2 = 0.15 \cdot 0.2 + 0.1 \cdot 0.12 + 0.15 \cdot 0.01 \cdot 0.12 + 0.2 \cdot 0.01 \cdot 0.1 + 0.01^2 = 0.0425.$$

Разница по сравнению с первым способом составляет около 8%.

### Практическое занятие № 13.

#### «Определение ущерба от перерывов электроснабжения»

*Цель занятия:* научиться определять полные ущербы от недоотпуска электроэнергии из-за частичных или полных перерывов в электроснабжении.

При подготовке к практическому занятию используются теоретические материалы, изложенные в [1, 2, 3, 4].

#### Пример решения задачи.

Пример. Определить суммарный ущерб от перерывов в электроснабжении глиноземного завода, для предложенной схемы электроснабжения (см. рис.), и оценить надежность данной схемы.

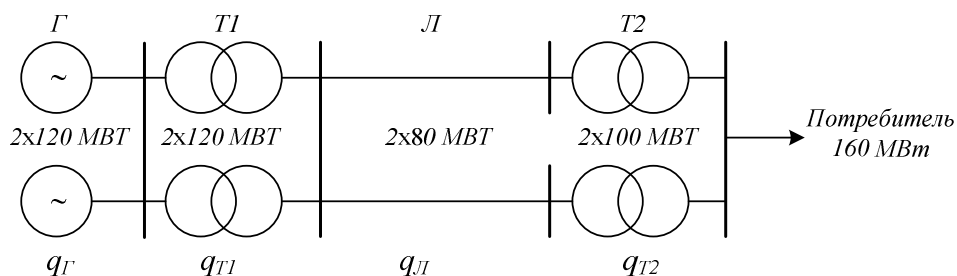
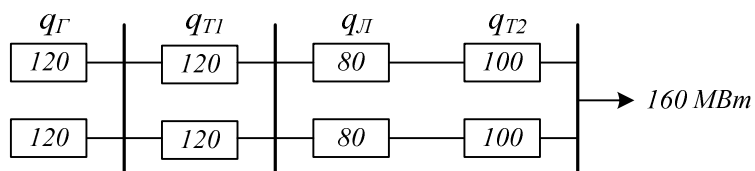
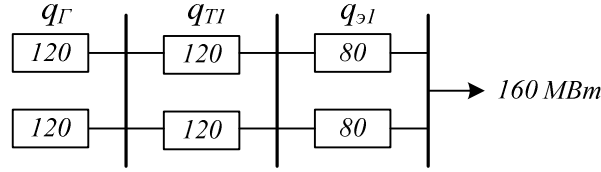


Рис. Схема электропередачи

Составляем схему замещения.



Эквивалентуем схему замещения до параллельных цепочек.



$$q_{Э1} = q_{Г} + q_{T2} = 3 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-4} = 0,0037$$

Определяем возможные дефициты мощности:

$$P_{деф} = \{40; 80; 160\} \text{ MBm}.$$

Определяем вероятности возможных дефицитов мощности при частичном перерыве в электроснабжении с помощью теорем сложения и умножения:

$$\begin{aligned} p(p_{деф} = 80) &= 2p_{Э}q_{Э1}(p_G^2 + 2p_Gq_G) \cdot (p_{T1}^2 + 2p_{T1}q_{T1}) = \\ &= 2 \cdot 0,9963 \cdot 0,0037 \cdot (0,99996^2 + 2 \cdot 0,99996 \cdot 0,00004) \cdot (0,9993^2 + \\ &+ 2 \cdot 0,9993 \cdot 0,0007) = 0,00737, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p(p_{деф} = 40) &= 2p_Gq_G(p_{T1}^2 + 2p_{T1}q_{T1})p_{Э1}^2 + 2p_{T1}q_{T1}p_G^2p_{Э1}^2 = \\ &= 2 \cdot 0,99996 \cdot 0,00004 \cdot (0,9993^2 + 2 \cdot 0,9993 \cdot 0,0007) \cdot 0,997^2 + \\ &+ 2 \cdot 0,0007 \cdot 0,9993 \cdot 0,99996^2 \cdot 0,997^2 = 0,00147. \end{aligned}$$

Определяем длительность возможных дефицитов мощности при частичном перерыве в электроснабжении

$$t(p_{деф}) = p(p_{деф})T_G,$$

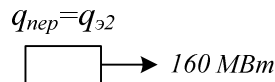
$$t(p_{деф} = 40) = p(p_{деф} = 40) \cdot 8760 = 0,00147 \cdot 8760 = 12,877 \text{ ч},$$

$$t(p_{деф} = 80) = p(p_{деф} = 80) \cdot 8760 = 0,00737 \cdot 8760 = 64,561 \text{ ч}.$$

Определяем математическое ожидание количества недоотпущенной электроэнергии при частичном перерыве питания:

$$\bar{W}_{нед} = \sum_1^n p_{деф_i} t_i(p_{деф_i}) = 40 \cdot 12,877 + 80 \cdot 64,561 = 5679,96 \text{ MBm} \cdot \text{ч}.$$

Эквивалентуем схему до одного элемента.



$$q_{Э2} = q_G^2 + q_{T1}^2 + q_{Э1}^2 = 0,00004^2 + 0,0007^2 + 0,003^2 = 9,492 \cdot 10^{-6}.$$

Определяем длительность полного перерыва в электроснабжении:

$$t(p_{деф} = 160) = q_{неп} \cdot T_G = 9,492 \cdot 10^{-6} \cdot 8760 = 0,083 \text{ ч}.$$

Определяем количество недоотпущенной электроэнергии при полном перерыве электроснабжения:

$$\bar{W}_{неп} = 160t(p_{деф} = 160) = 160 \cdot 0,083 = 13,3 \text{ MBm} \cdot \text{ч}.$$

Находим общее количество недоотпущенной электроэнергии при перерывах в электроснабжении:

$$\bar{W}_{\Sigma} = \bar{W}_{нед} + \bar{W}_{пер} = 5679,96 + 13,3 = 5693,26 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Определяем основной ущерб, предварительно взяв по /4/ значение удельного основного ущерба:

$$Y_o = 0,15 \text{ у.е./кВт} \cdot \text{ч}.$$

Тогда:

$$Y_{осн} = Y_o \bar{W}_{\Sigma} = 0,15 \cdot 5693,26 \cdot 10^{-3} = 853,989 \text{ тыс.у.е.},$$

условная единица соответствует доллару США.

Определяем ущерб внезапности.

Для этого по /4/ находим удельную величину ущерба при продолжительности полного отключения

$$t(p_{деф} = 160) = 0,083 \text{ ч},$$

$$y_{ВН} = 10,6 \text{ у.е./кВт}.$$

Тогда:

$$Y_{ВН} = y_{ВН} \cdot p_{треб} = 10,6 \cdot 160 \cdot 10^3 = 1696 \text{ тыс.у.е.}$$

Суммарный ущерб равен:

$$Y_{\Sigma} = Y_{осн} + Y_{ВН} = 853,989 + 1696 = 2549,989 \text{ тыс.у.е.}$$

Вывод: предложенный вариант схемы электроснабжения глиноземного комбината ненадежен. Необходимо увеличить пропускную способность до 160 МВт. В этом случае будет только ущерб внезапности, равный 1696 тыс. у.е. Если увеличить число резервируемых цепей, например до трех, то ущерб внезапности снизится до 37,8 у.е. Для того, чтобы выбрать окончательный вариант, необходимо рассчитать дополнительные затраты, связанные с введением третьей резервируемой цепочки в схему и сравнить с ущербом при двух резервируемых цепочках.

#### Практическое занятие № 14. «Обзор всех типов задач»

*Цель занятия:* подвести итог в получении практических навыков по определению и анализу надежности.

Данное занятие посвящается систематизации и обобщению полученных знаний в течение изучения дисциплины.

Рекомендуется на нем выполнение самостоятельной работы по комплексной оценке надежности.

## IV. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

### 4.1. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ

При изучении дисциплины предусмотрено выполнение 13 индивидуальных домашних заданий, расчетно-графической работы для студентов очной формы обучения и одной контрольной работы для студентов заочной сокращенной формы обучения.

Прежде чем приступить к выполнению домашних заданий, необходимо изучить соответствующий теоретический материал и разобраться с решением аналогичных задач, рассмотренных на практических занятиях или в литературе. Перечень видов индивидуальных заданий приведен в табл., а необходимая литература, которая поможет успешно справиться с индивидуальными домашними заданиями, и сроки его выполнения указаны в предыдущем пункте данного УМКД.

Таблица. Перечень видов индивидуальных домашних заданий

Номер ПЗ	Наименование вида индивидуального задания
1	Определение вероятностей передачи требуемой мощности и дефицита мощности
2	Определение вероятностей отказов и безотказной работы простых разомкнутых схем
3	Расчет надежности простых нерезервируемых и резервируемых схем, определение кратности резервирования
4	Определение вероятностей безотказной работы систем с учетом АВР
5	Построение графов перехода из состояния в состояние для систем и определение вероятностей состояния
6	Составление схем замещения типовых схем РУ ПС и электростанций
7	Определение надежности систем аналитическим методом
8	Определение надежности систем логично-вероятностным методом
9	Определение надежности систем методом путей и минимальных сечений
10	Определение надежности распределительных сетей (возможно по заданию РГР)
11	Определение надежности кольцевых и петлевых схем сетей (возможно по заданию РГР)
12	Определение надежности сложнзамкнутых схем систем (возможно по заданию РГР)
13	определение ущербов от перерывов электроснабжения

Индивидуальные домашние задания выполняются с помощью программного комплекса MathCad и графического редактора Visio.

Расчетно-графическая работа на тему «Расчет и анализ надежности систем электроснабжения предприятий, городов» выполняется в течение всего семестра и защищается в течение последней учебной недели семестра. Задания на РГР выдаются по реальным схемам предприятий и энергокомпаний Дальневосточного региона. Студент может в качестве РГР выполнять анализ надежности объекта будущего дипломного проектирования.

Контроль хода выполнения РГР ведется еженедельно.

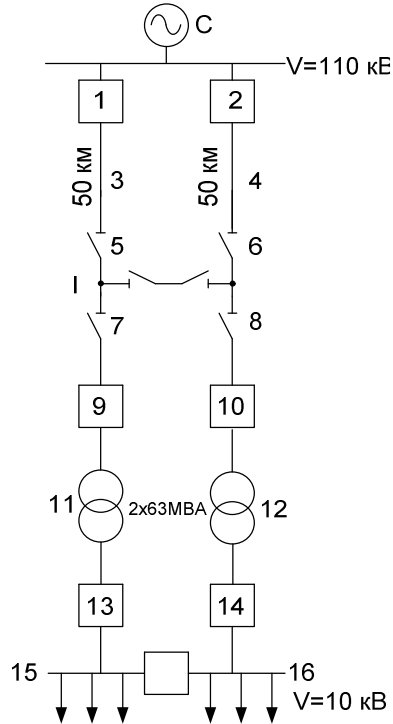
Контрольная работа для студентов заочной и сокращенной заочной форм обучения предусматривает выполнение трех заданий, включающих применение аналитического метода расчета надежности, метода путей и сечений и оценку вероятностей состояний схем с построением графов перехода из состояния в состояние. Для выполнения контрольной работы следует пользоваться п.3.2 и п.4.1 данного УМКД.

Ниже приводится пример решения одного из вариантов контрольной работы.

## Контрольная работа

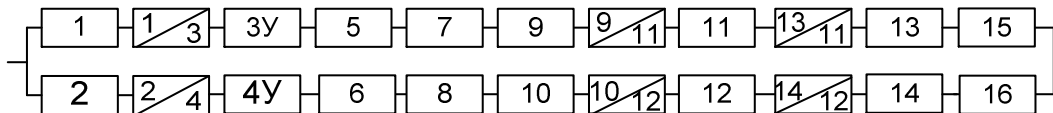
### Билет №1

- 1) Рассчитать надежность системы внешнего электроснабжения предприятия с электроприемниками I, II категории, если  $P_{cp}=80$  МВт



### Решение

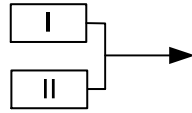
Составим схему замещения



Показатели надежности:

№ оборудования на схеме	Показатели надежности			
	Средний параметр потока отказов $\omega$ , 1/год	Среднее время восстановления $t_B$ , ч	Частота ремонтов $\mu$ , 1/год	Продолжительность ремонтов $T_p$ , ч
1,2,9,10	0,016	40	0,14	30
3,4	0,053	8,8	2,1	14,5
5,6,7,8	0,01	11	0,166	8,15
11,12	0,014	70	0,75	28
13,14	0,009	20	0,14	10
15,16	0,030	7	0,166	5

Определим параметры потока отказов первой и второй цепей, учитывая их преднамеренные отключения.



$$\lambda_C = \sum_1^n \lambda_i + \lambda_{\text{пр.нб}}$$

$$\lambda_{\text{CI}} = \lambda_I = \lambda_1 + \lambda_3 \cdot 50 + \lambda_5 + \lambda_7 + \lambda_9 + \lambda_{11} + \lambda_{13} + \lambda_{15} = 0.016 + 0.053 \cdot 50 + 0.01 + 0.01 + 0.02 + 0.014 + 0.009 + 0.030 + 0.75 = 3,509 \text{ 1/год}$$

$$\lambda_{\text{CII}} = \lambda_{\text{II}} = \lambda_2 + \lambda_4 \cdot 50 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{16} = 0.016 + 0.053 \cdot 50 + 0.01 + 0.01 + 0.02 + 0.014 + 0.009 + 0.030 + 0.75 = 3,509 \text{ 1/год}$$

Определяем вероятность отказов I и II цепей:

$$q_{\text{II}} = \sum_1^n \lambda_i t_{\text{Bi}} + (\lambda_{\text{пр}} t_{\text{пр}})_{\text{наиб}}$$

$$q_{\text{CI}} = q_1 + q_3 + q_5 + q_7 + q_9 + q_{11} + q_{13} + q_{15} = \lambda_1 \bar{t}_{\text{B1}} + \lambda_3 \bar{t}_{\text{B3}} + \lambda_5 \bar{t}_{\text{B5}} + \lambda_7 \bar{t}_{\text{B7}} + \lambda_{11} \bar{t}_{\text{B11}} + \lambda_{13} \bar{t}_{\text{B13}} + \lambda_{15} \bar{t}_{\text{B15}} + \lambda_{11} \bar{t}_{\text{B11}}$$

выразим  $t_{\text{B}}$  в годах

$$t_{\text{B}}^* \frac{t_{\text{B}}}{8760}$$

$$q_{\text{I}} = 0.016 \frac{40}{8760} + 0.053 \frac{8,8}{8760} + 0.01 \frac{11}{8760} + 0.01 \frac{11}{8760} + 0.02 \frac{20}{8760} + 0.014 \frac{70}{8760} + 0,009 \frac{20}{8760} + 0,030 \frac{7}{8760} + 0.014 \frac{70}{8760} = 4,653 \cdot 10^{-4}$$

$$q_{\text{II}} = 4,653 \cdot 10^{-4}$$

Определим среднее время восстановления каждой цепи:

$$\bar{t}_{\text{Bc}} = \frac{q_{\text{C}}}{\lambda_{\text{C}}}$$

$$\bar{t}_{\text{B1}} = \frac{q_1}{\lambda_{\text{II}}^*} = \frac{4,653 \cdot 10^{-4} \cdot 8760}{2.759} = 1,477 \text{ ч}$$

$$\bar{t}_{\text{B1}} = \frac{q_1}{\lambda_1^*} = \frac{4,653 \cdot 10^{-4} \cdot 8760}{2.759} = 1,477 \text{ ч}$$

Определим параметр потока отказов системы, состоящей из двух параллельных элементов:

$$\lambda_C = \sum_1^n \lambda_i \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (\lambda_j \bar{t}_{\text{Bj}} + \lambda_{\text{прj}} \bar{t}_{\text{прj}})$$

$$\lambda_C = \lambda_I q_{\text{II}} + \lambda_{\text{II}} q_{\text{I}} + \lambda_1^* q_{\text{прII}} + \lambda_{\text{II}}^* q_{\text{прI}}$$

$$\lambda_C = 3,509 \cdot 4,653 \cdot 10^{-4} + 3,509 \cdot 4,653 \cdot 10^{-4} + \frac{(2,759 \cdot 0,75 \cdot 70 + 2,75 \cdot 0,75 \cdot 70)}{8760}$$

$$\lambda_C = 0,036 \text{ 1/год}$$



Средняя вероятность состояния отказа системы:

$$q_c = K_{\text{ПС}} = \prod_{i=1}^n \lambda_i \bar{t}_{\text{В}i} + \prod_{i=1}^n K_{\text{ПР}i} \lambda_{\text{ПР}i} \bar{t}_{\text{ПР}i} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \lambda_j \bar{t}_{\text{В}j}$$

где  $K_{\text{ПР}i}$  – коэффициент, учитывающий фактор уменьшения вероятности преднамеренного отключения одного элемента и аварийного отключения другого.

$$K_{\text{ПР}} = 1 - e^{-\bar{t}_{\text{ПР}i} / \bar{t}_{\text{Вэ}кв}}$$

$$K_{\text{ПР}I} = 1 - e^{-75/1,477} = 1$$

$$K_{\text{ПР}II} = 1 - e^{-75/1,477} = 1$$

$$q_c = q_I q_{II} + K_{\text{ПР}I} \lambda_{\text{ПР}I} \bar{t}_{\text{ПР}I} q_{II} + K_{\text{ПР}II} \lambda_{\text{ПР}II} \bar{t}_{\text{ПР}II} q_I = 4,653 \cdot 10^{-4} \cdot 4,653 \cdot 10^{-4} + (1 \cdot 0,75 \cdot 70 \cdot 4,653 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 0,75 \cdot 70 \cdot 4,653 \cdot 10^{-4}) / 8760 = 5,794 \cdot 10^{-6}$$

Среднее время безотказной работы системы:

$$\bar{T}_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,036} = 27,778 \text{ лет}$$

Расчетное время безотказной работы при  $\alpha=0,1$

$$\bar{T}_p = -\ln(1 - \alpha) \bar{T} = 1,459 \text{ лет}$$

Среднее время восстановления системы

$$\bar{t}_{\text{ВС}} = \frac{q_c}{\lambda_c} 8760 = \frac{5,794 \cdot 10^{-6}}{0,036} 8760 = 1,41 \text{ ч}$$

- 2) Чем отличаются комплексные показатели надежности от единичных? Какими показателями пользуются для оценки надежности одного элемента, узла нагрузки, системы целиком? Показать на примере схемы п.1. Составить граф перехода для I присоединения, найти стационарные  $K_{\text{Г.С}}$  и  $K_{\text{П.С}}$ .

Ответ: Показателем надежности называется, количественная характеристика одного или нескольких свойств, определяющих надежность объекта, их подразделяют на единичные, характеризующие одно свойство и комплексные, характеризующие несколько свойств.

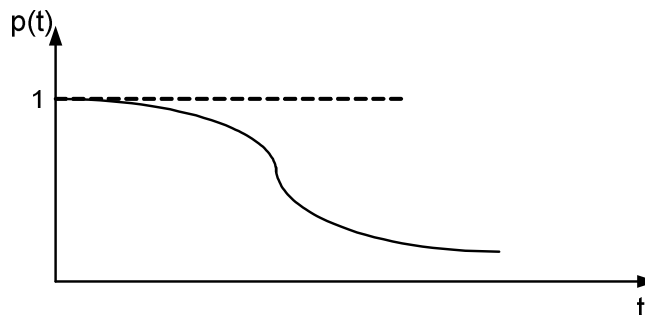
Единичные показатели в основном применяются для характеристики отдельных элементов, а комплексные – для узлов нагрузки и системы в целом.

Единичные показатели подразделяются на показатели безотказности и восстанавливаемости.

Вероятность безотказной работы,  $p(t)$  - вероятность того, что в пределах заданной наработки,  $t$ , отказа не произойдет при заданных условиях работы.

$$p(t) = P(T \geq t), \text{ - функция надежности}$$

где  $T$  – время безотказной работы

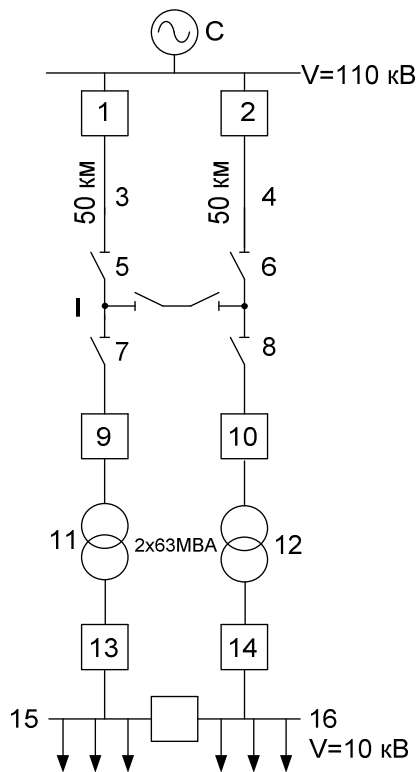


Кривая вероятности безотказной работы

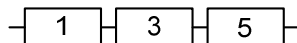
Показатели восстанавливаемости определяются только для объектов, подлежащих ремонту.

Вероятность восстановления объекта,  $q_B(t)$  - это вероятность того, что за заданное время  $t$  объект будет восстановлен или вероятность того, что время восстановления объекта будет меньше некоторого наперед заданного времени.

На примере схемы п.1 покажем оценку надежности одного элемента, узла нагрузки, системы целиком.



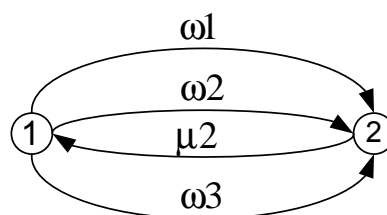
Составляем схему замещения



Возможные состояния:

- 1 1р3р5р
- 2 { 1о3р5р
- { 1р3о5р
- { 1р3р5о
- { 1о3о5о

Составляем граф сети



Система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -\omega_2 p_1(t) + \mu_2 p_2(t)$$

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = \omega_2 p_2(t) - \mu_2 p_1(t)$$

$$p_1 = \frac{\mu_2}{(\omega_2 + \mu_2)}$$

$$p_2 = \frac{\omega_2}{(\omega_2 + \mu_2)}$$

Коэффициенты готовности и вынужденного простоя:

$$K_{ГС} = p_1$$

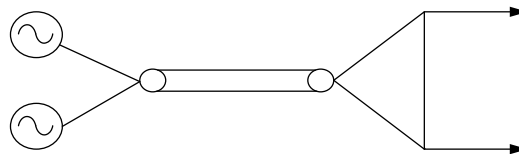
$$K_{ПС} = p_2 = 1 - p_1$$

$$p_1 = \frac{2,1}{(0,053 + 2,1)} = 0,975 \quad p_2 = \frac{0,053}{(0,053 + 2,1)} = 0,025$$

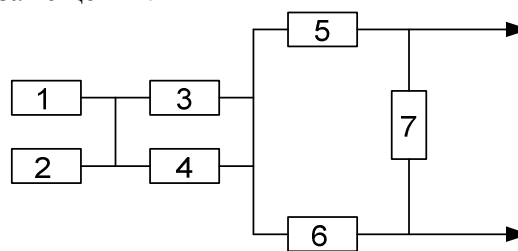
$$K_{ГС} = 0,975$$

$$K_{ПС} = 1 - p_2 = 1 - 0,025 = 0,975$$

3) Оценить надежность схемы



Составляем схему замещения:

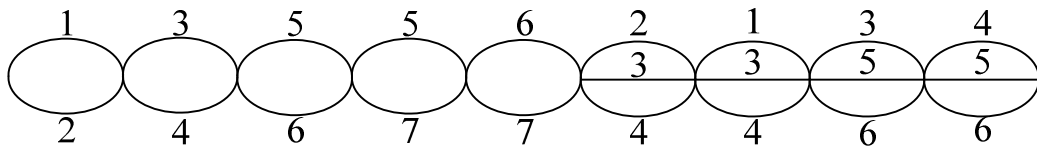


Оцениваем надежность схемы методом минимальных сечений:

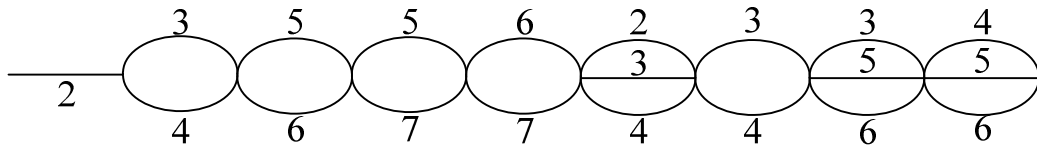
- 1) 1,2
- 2) 3,4
- 3) 5,6
- 4) 5,7
- 5) 6,7
- 6) 2,3,4
- 7) 1,3,4
- 8) 3,5,6
- 9) 4,5,6

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	0	0	0
7	1	0	1	1	0	0	0
8	1	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	0

Строим сечения

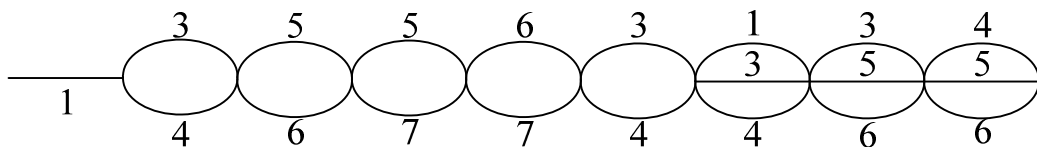


1) Отказ 1 элемента



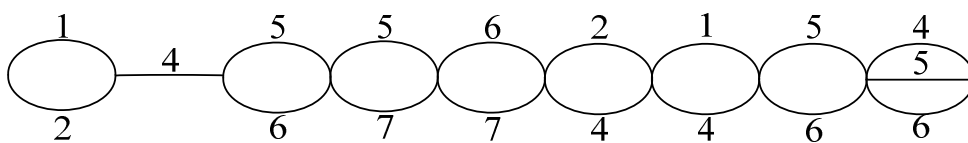
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	0	0	0
7	0	0	1	1	0	0	0
8	0	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	0

2) Отказ 2 элемента



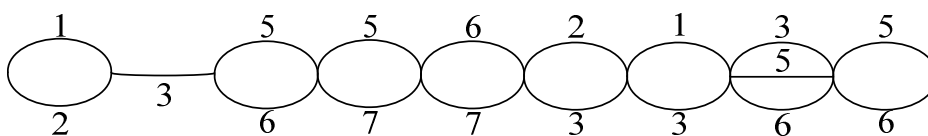
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	0	0	0
7	1	0	1	1	0	0	0
8	0	0	0	1	1	1	0
9	0	0	0	1	1	1	0

3) Отказ 3 элемента



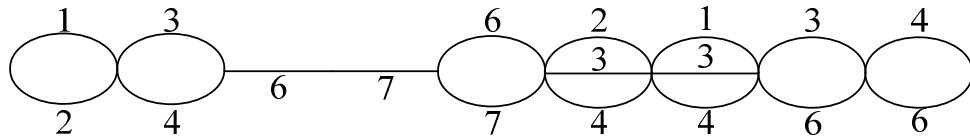
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1
6	0	1	0	1	0	0	0
7	1	0	0	1	0	0	0
8	1	0	0	1	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	0

4) Отказ 4 элемента



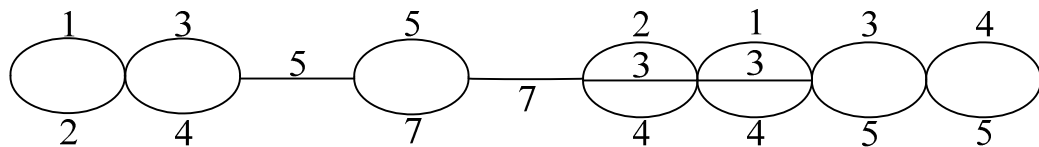
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1
6	0	1	1	0	0	0	0
7	1	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	0
9	0	0	0	0	1	1	0

5) Отказ 5 элемента



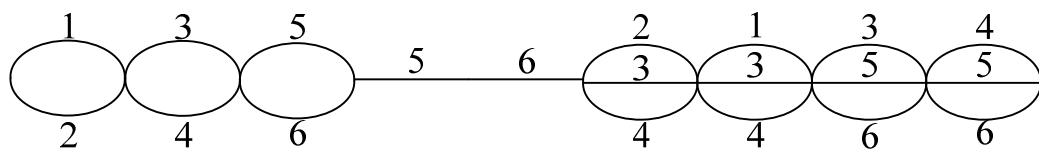
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	0	0	0
7	1	0	1	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	1	0

6) Отказ 6 элемента



	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	0	1
6	0	1	1	1	0	0	0
7	1	0	1	1	0	0	0
8	0	0	0	1	1	0	0

7) Отказ 7 элемента



Определяем вероятность отказа системы

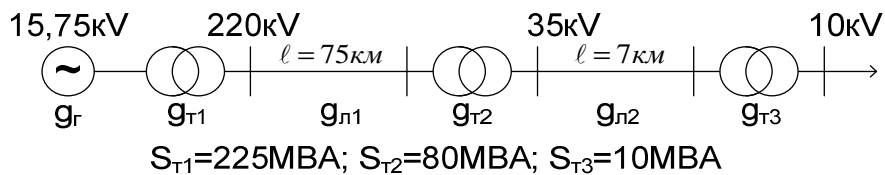
$$\begin{aligned}
q_C = & q_1q_2 + q_3q_4 + q_5q_6 + q_5q_7 + q_6q_7 + q_2q_3q_4 + q_1q_3q_4 + q_3q_5q_6 + q_4q_5q_6 + \\
& + K_{np1}q_1(q_2 + q_3q_4 + q_5q_6 + q_5q_7 + q_6q_7 + q_2q_3q_4 + q_3q_4 + q_3q_5q_6 + q_4q_5q_6) + \\
& + K_{np2}q_{np2}(q_1 + q_3q_4 + q_5q_6 + q_5q_7 + q_6q_7 + q_3q_4 + q_1q_3q_4 + q_3q_5q_6 + q_4q_5q_6) + \\
& + K_{np3}q_{np3}(q_1q_2 + q_4 + q_5q_6 + q_5q_7 + q_6q_7 + q_2q_4 + q_1q_4 + q_5q_6 + q_4q_5q_6) + K_{np4} \cdot \\
& \cdot q_{np4}(q_1q_2 + q_3 + q_5q_6 + q_5q_7 + q_6q_7 + q_2q_3 + q_1q_3 + q_3q_5q_6 + q_5q_6) + K_{np5}q_{np5} \cdot \\
& \cdot (q_1q_2 + q_3q_4 + q_6 + q_7 + q_6q_7 + q_2q_3q_4 + q_1q_3q_4 + q_3q_6 + q_4q_6) + K_{np6}q_{np6}(q_1q_2 + \\
& + q_3q_4 + q_5 + q_5q_7 + q_7 + q_2q_3q_4 + q_1q_3q_4 + q_3q_5 + q_4q_5) + K_{np7}q_{np7}(q_1q_2 + q_3q_4 + \\
& + q_5q_6 + q_5 + q_6 + q_2q_3q_4 + q_1q_3q_4 + q_3q_5q_6 + q_4q_5q_6)
\end{aligned}$$

#### 4.2. Комплекты домашних заданий, контрольных работ.

Комплекты домашних заданий по каждой теме содержат по 25-30 задач, которые варьируются случайным образом при выдаче студентам. Полный комплект заданий хранится на кафедре энергетике. Ниже приводятся несколько примеров индивидуальных домашних заданий.

##### №1-1

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме.



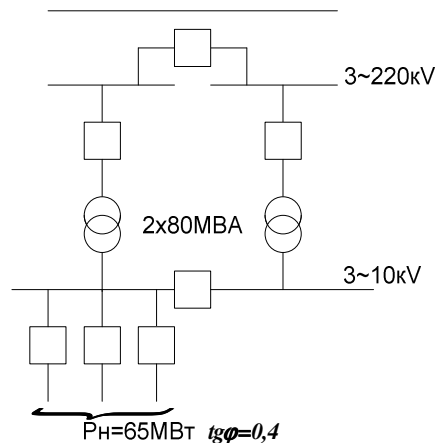
2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности в схеме.

1	20	→ 100 МВт
2	15	
3	30	
4	15	
5	20	

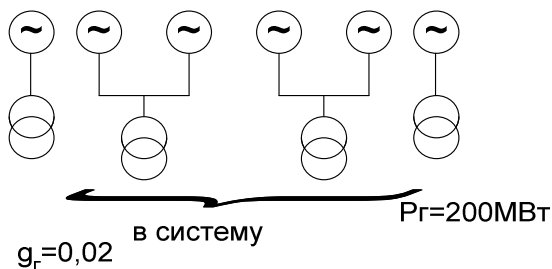
$$g_1=g_5=0,018; g_2=g_4=0,009; g_3=0,015$$

##### №1-2

1. Определить вероятность безотказной работы и отказов в схеме без учёта секционных выключений.

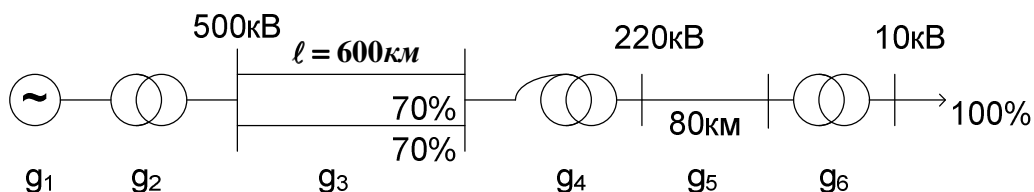


2. Определить вероятности и снижение располагаемой мощности станции при отказе 1,2,3,4 генераторов.



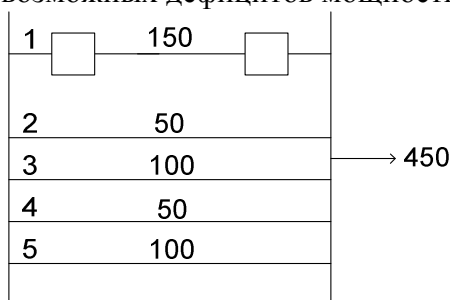
№1-3

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме.



$g_1=0,017$ ;  $g_2=0,008$ ;  $g_3=0,025$ ;  $g_4=0,009$ ;  $g_5=0,008$ ;  $g_6=0,005$

2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности.

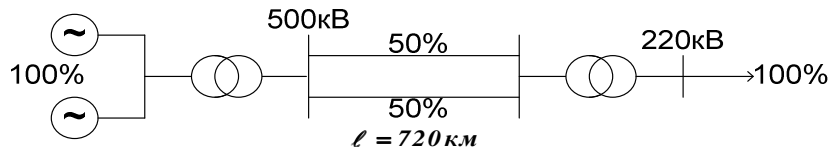


По справочнику найти недостающие показатели надёжности по линии один, длина которой 130 км, напряжение 220 кВ. А) Выключатели воздушные; Б) выключатели масляные.

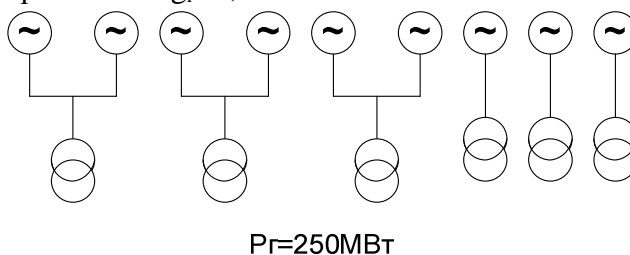
Чему будет равна вероятность дефицита при изменении режима работы электропередачи и снижения нагрузки на 20% при отключении линии 1 (пропускная способность остальных линий не меняется).

№1-4

1. Определить вероятность отказа и безотказной работы в схеме.



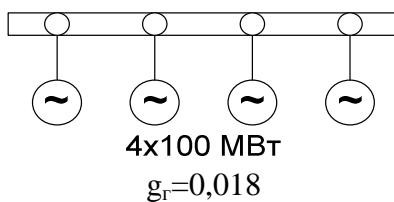
2. Определить вероятность возможных ограничений мощности и вероятность безотказной работы при передаче мощности в систему от станции число рабочих генераторов 5, резервных – 7.  $g_{Г}=0,022$





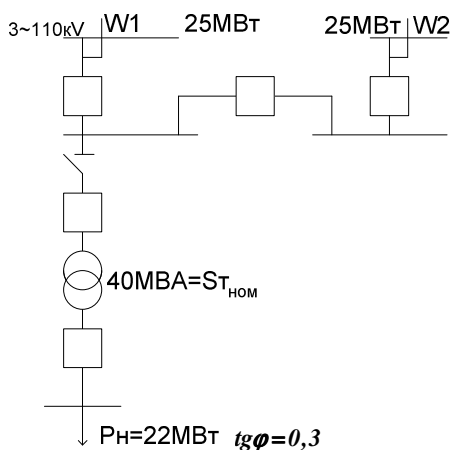
№1-5

1. Определить вероятности возможных дефицитов мощности в схеме при условии, что число рабочих генераторов 4, резервных 2.



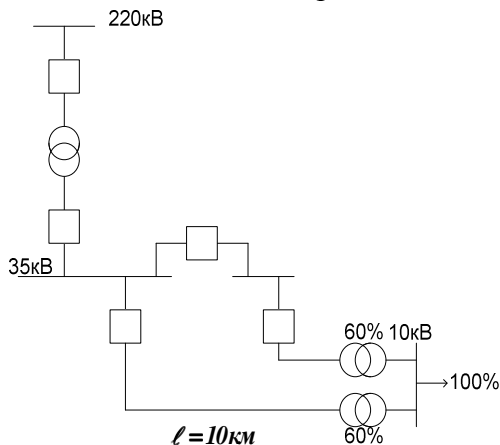
Чему равна вероятность безотказной работы?

2. Определить вероятность отказа и безотказной работы в схеме без учёта секционного выключателя.

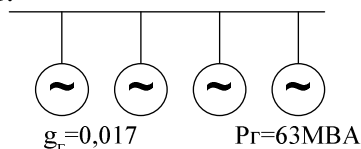


№1-6

1. Определить вероятность отказа и безотказной работы в схеме.

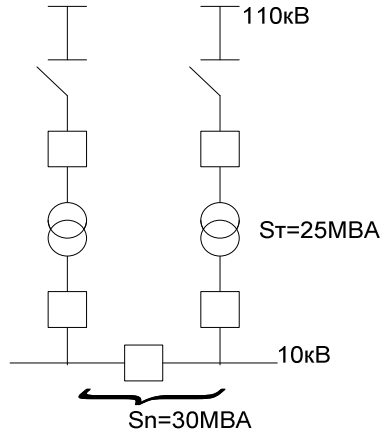


2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности в схеме при числе рабочих генераторов 3, резервных – 1.



№1-7

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме.



2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности в схеме.

1	40
2	20
3	10
4	20
5	40
6	20
7	40

190 МВт

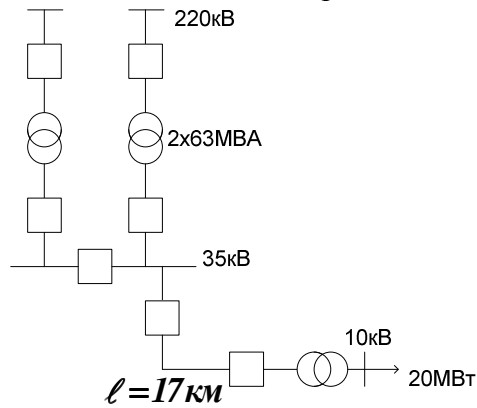
$$g_1 = g_5 = g_7 = 0,007$$

$$g_2 = g_4 = g_6 = 0,01$$

$$g_3 = 0,019$$

№1-8

1. Определить вероятность отказов и безотказной работы для схемы.



2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности.

1	25
2	15
3	25
4	15
5	50
6	15

145MBA

$$g_1 = g_3 = 0,015; g_2 = g_4 = g_6 = 0,019; g_5 = 0,019$$

№1-9

1. Определить вероятности возможных дефицитов мощности и безотказной работы в схеме.

1	15
2	30
3	15
4	30
5	15
6	30
7	15
8	30

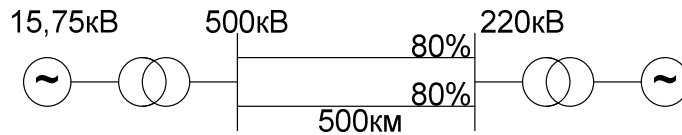
180МВт

$$g_1=g_3=g_5=g_7=0,016$$

$$g_2=g_4=g_6=g_8=0,02$$

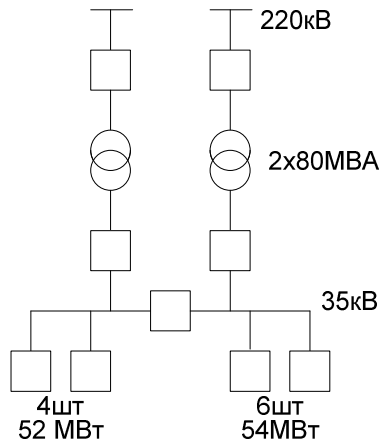
Что будет с вероятностью дефицитов мощности при снижении требуемой мощности на 50%?

2. Определить вероятность безотказной работы и отказов в схеме.



№1-10

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме.



Что нужно сделать, чтобы повысить надёжность?

2. Определить вероятности возможных дефицитов в схеме.

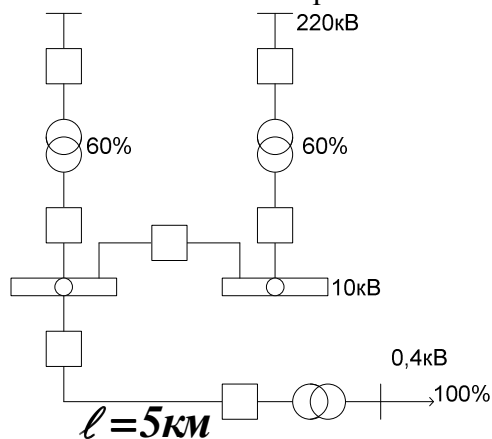
220кВ		$\ell = 120км$
1	70	
2	30	
3	50	
4	30	
5	50	
6	70	

300МВт

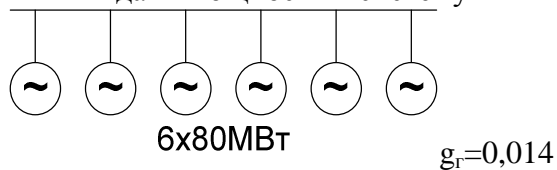
$$g_2=g_4=0,009; g_3=g_5=0,009; g_6=0,01$$

№1-11

1. Определить вероятность отказа и безотказной работы в схеме.



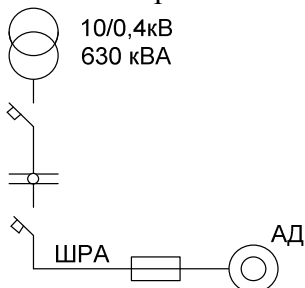
2. Определить ограничения в выдаче мощности в систему и их вероятности.



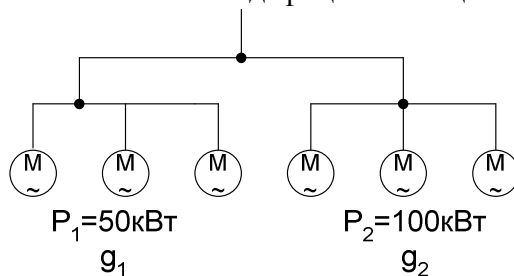
В резерве – 2 генератора. Генераторы работают на 2, на 1 повышающий трансформатор

№1-12

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме.

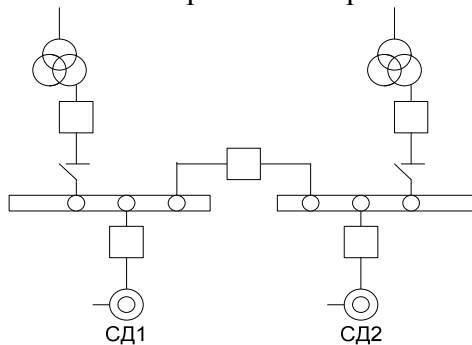


2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности в схеме.

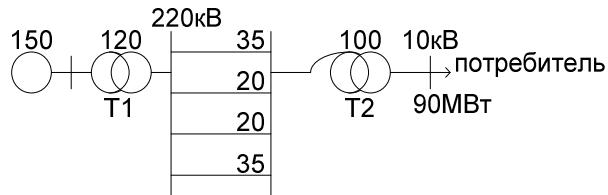


№1-13

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме.



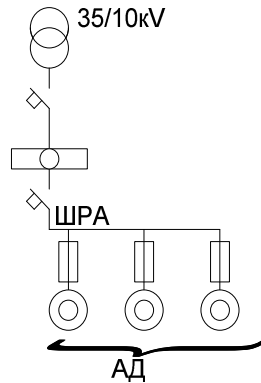
2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности



Что изменится в схеме, если выключить два трансформатора параллельно при их пропускной способности 100 МВт?

№1-14

1. Определить вероятность безотказной работы схемы и её полного и частичного отказов.



2. Определить вероятности возможных дефицитов в схеме.

Л1	15	120МВт →
Л2	10	
Л3	20	
Л4	40	
Л5	15	
Л6	20	

$$g_1 = g_5 = 0,004$$

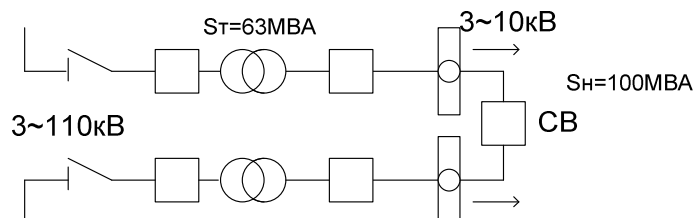
$$g_2 = 0,0012$$

$$g_3 = g_6 = 0,007$$

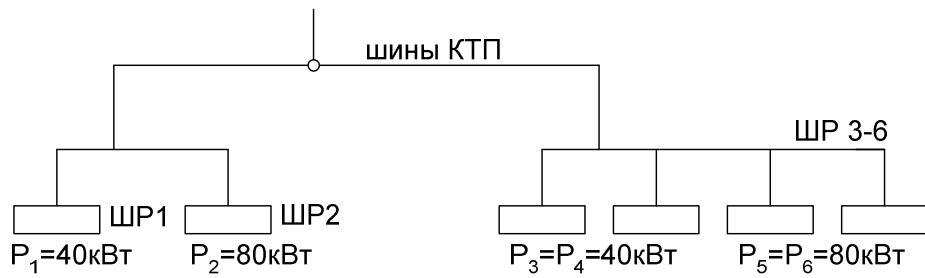
$$g_4 = 0,003$$

№1-15

1. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в схеме без учёта секционного выключателя.



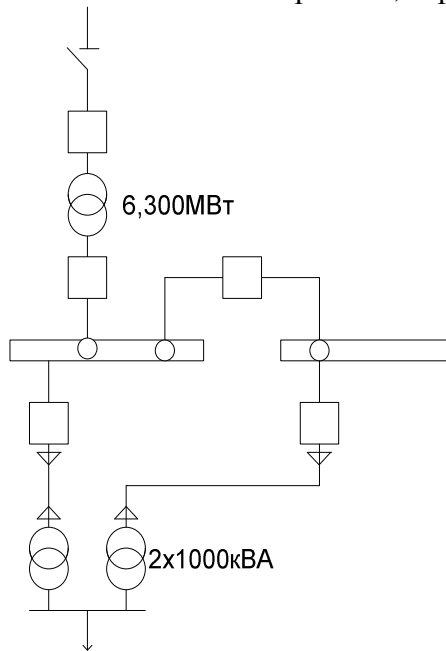
2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности



Вероятности отказов шкафов одинаковы.

### №1-16

1. Определить вероятность отказа и безотказной работы, вероятность частичного отказа.

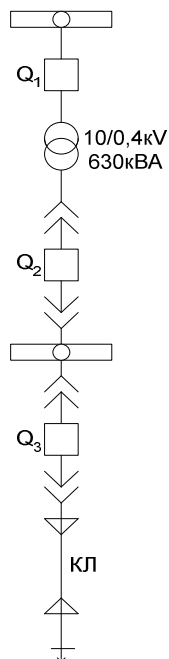


2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности в схеме.

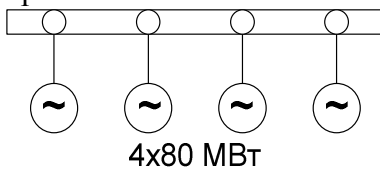
$g_1$	25	
$g_2$	40	
$g_3$	25	
$g_4$	40	→ 200МВт
$g_5$	25	$g_1=g_3=g_5$
$g_6$	40	$g_2=g_4=g_6$
$g_7$	5	

№1-17

1. Оценить надёжность схемы.

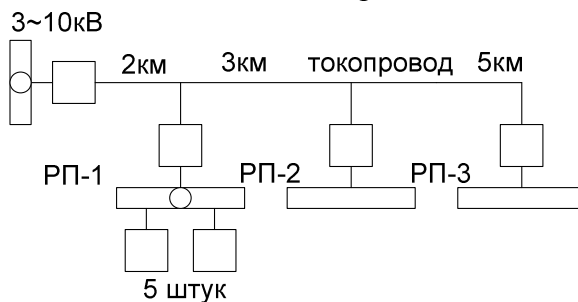


2. Определить вероятности возможных дефицитов в схеме: учесть, что один из генераторов находится в резерве.

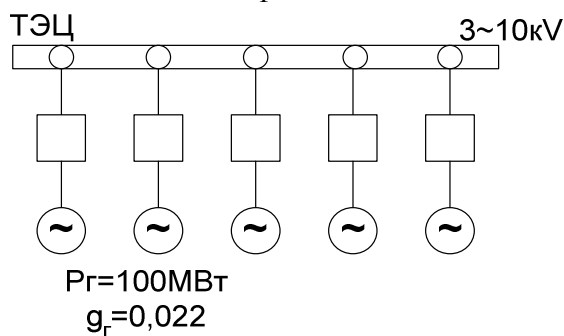


№1-18

1. Определить вероятность отказа и безотказной работы в схеме.



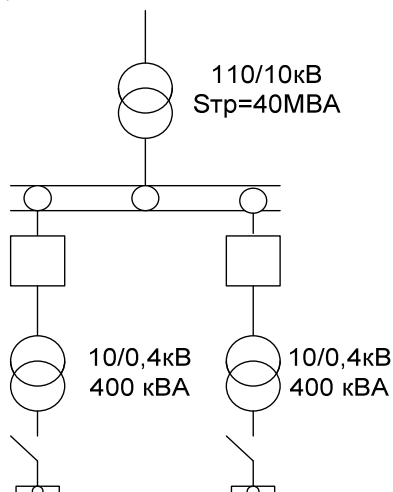
2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности.



При анализе схемы учесть, что один из генераторов ТЭС находится в холодном резерве.

№1-19

1. Оценить надёжность схемы.



2. Определить вероятности возможных дефицитов мощности.

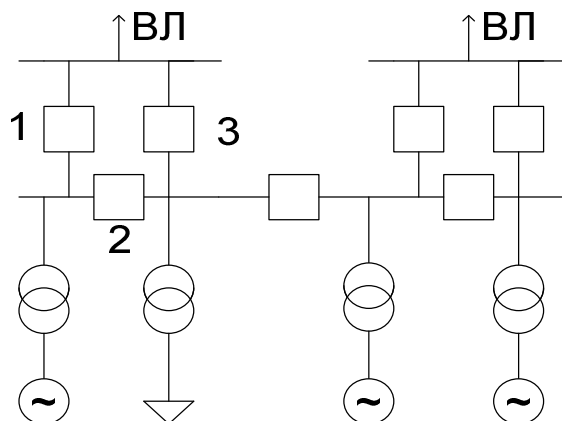
$g_1$	20МВт	→ P=50МВт
$g_2$	5	
$g_3$	20	
$g_4$	5	

Задания контрольной работы студентов заочной сокращенной формы обучения комплектуются ежегодно новые из подобных указанным выше и хранятся на кафедре энергетики.

В качестве примера ниже приведено два варианта заданий на контрольную работу.

Вариант №1

1) Оценить надёжность схемы РУ 500кВ с учетом РЗА двумя методами (аналитический и дерево отказов)



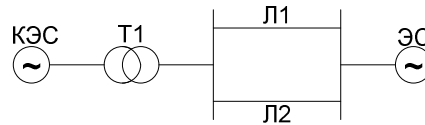
2) Составить граф перехода из состояния в состояние для треугольника 1-3.

3) Методом путей и минимальных сечений оценить надёжность схемы п.1.



### Вариант №7

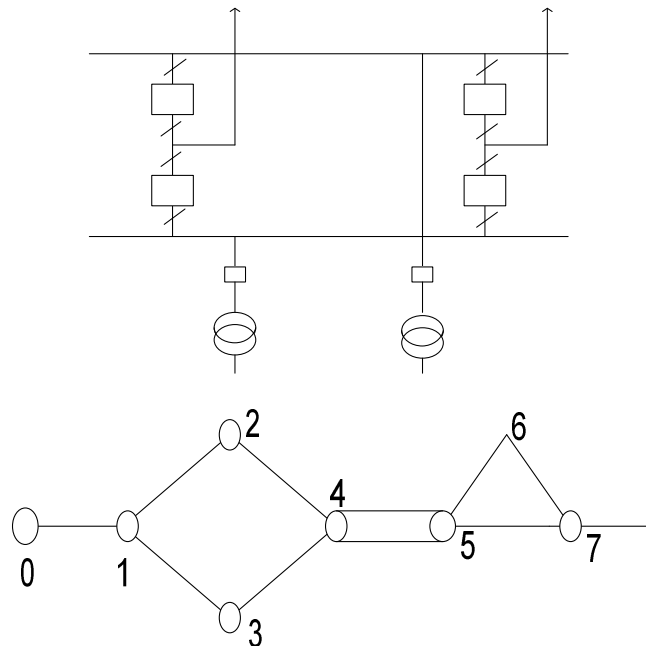
1) Составить граф переходов из состояния в состояние, записать систему дифференциальных уравнений и показать на их основе чему будут равны стационарные значения коэффициентов готовности и оперативной готовности системы:



Каждый элемент пропускает всю требуемую мощность.

2) Оценить надежность следующей схемы в нормальном и ремонтных режимах;  $S_T=100\text{MVA}$ ,  $U=220\text{kV}$ ,  $S_{\text{треб}}=130\text{MVA}$

3) Методом минимальных сечений определить вероятность отказа схемы сравнить с деревом событий



## V. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СТУДЕНТАМИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДАННОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

При изучении данной дисциплины целесообразно пользоваться следующими программными продуктами: MathCad; Visio; Exsel.

Все выше перечисленные ПВК широко используются в практической деятельности выпускников и изучаются ранее в дисциплинах «Информатика», «Пакеты прикладных программ».

## VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Состав информационных технологий, используемых при изучении дисциплины «Надежность электроснабжения»:

1. Презентации лекций, слайд-лекции.

2. Электронные варианты электрических принципиальных схем Зейской ГЭС, Бурейской ГЭС, Нижнебурейской ГЭС (проектируемая), Благовещенской ТЭЦ, Райчихинской ГРЭС, схем сетей Дальневосточного региона, принадлежащих ФСК, ДРСК, схем сетей г. Благовещенска, промышленных предприятий.

3. Схемы, рисунки, таблицы под медиакомплекс.
4. Комплект индивидуальных заданий по дисциплине.
5. Промышленные программные продукты Visio; Exsel ", пакет автоматизации математических расчетов «MathCad».
6. Электронные варианты типовых схем РУ ПС и электростанций.
7. Электронные варианты учебников и учебных пособий по дисциплине – в электронной библиотеке кафедры энергетики.
8. Нормативные документы (см. «Кодекс» и электронную библиотеку).

К информационной составляющей УМК относятся учебники, учебные пособия методические разработки. Т.е. их электронные издания (ИЭ). Информационная составляющая является электронным аналогом с:

возможностью использования наряду со статическими текстами и изображениями мультимедийных ресурсов (звука и видео);

наличием встроенных средств навигации, позволяющих пользователю переходить к основной странице издания, предыдущей, следующей странице издания, просмотреть оглавление всего издания или его раздела;

возможность оперативного внесения изменений после публикации.

Электронные издания существуют в различных представлениях. Возможно представление изданий в формате текстового процессора, например Word, публикация издания в переносимом формате, например Adobe PDF. Следующей формой публикации ЭИ является публикация во Всемирной паутине в формате HTML с использованием других технологий, например CSS для стилевого оформления, динамического HTML – для создания динамических документов, Macromedia Flash для анимации.

ЭИ допускает многовариантное представление с различной функциональностью для работы с помощью различных пользовательских агентов. Состав версий ЭИ обеспечивает работу с ним на персональном компьютере и распечатку его на бумаге. Электронное представление ЭИ позволяет хранить его на любых электронных носителях и доставлять через сеть.

Разница проведения практических занятий при очном и дистанционном видах обучения определяется организацией взаимодействия между обучаемым и преподавателем, а также степенью взаимодействия между обучаемыми. В очном образовании преподаватель может управлять ходом решения задач в реальном времени, направляя обучаемых, комментируя и объясняя типичные ошибки. Взаимодействие между обучаемыми позволяет быстрее находить решения, кроме того, обучаемые получают опыт совместной работы. В заочном образовании, обучаемый получает комплект, состоящий из задачника, задания, методических указаний, примеров решения задач, справочных материалов. Участие преподавателя сводится к проверке полученных по почте решений. Дистанционный вариант проведения практических занятий отличается от заочного возможностью оперативного общения между обучаемыми и преподавателем.

Способы общения между преподавателем и обучаемыми в заочной и сокращенной заочной формах обучения:

общение по электронной почте – этот способ является предпочтительным, позволяя его участникам читать и подготавливать сообщения в удобное для них время;

общение через web-форумы, организуемые на web-серверах учебного заведения;

общение с помощью служб мгновенных сообщений и чатов.

*Способ доставки учебного контента:* лично; по почте; электронные средства доставки (ftp, http, E-mail); комбинированные средства доставки.

Средства взаимодействия между преподавателем и обучаемыми вынесены из состава УМК, например электронную почту, форумы, чаты целесообразно совместно использовать под несколько ЭУМК.

## VII. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

### 7.1. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов

В процессе изучения дисциплины используются следующие виды контроля знаний студентов:

- входной контроль;
- текущий контроль;
- рубежный контроль;
- экзаменационный (итоговый) контроль;
- самоконтроль знаний.

#### *Виды и цели контроля*

*Входной контроль* зависит от цели обучающего курса и его специфики. Он определяет готовность студента к работе по курсу (роль допуска к обучению), выполняет диагностические функции, выявляет пробелы в знаниях, компенсируемые процессом дополнительного обучения. Обучающий курс становится адаптивным (каждый учащийся идет своим путем в зависимости от его начального уровня). Работа по тестовым заданиям настраивает студента на предметную область, вводит в терминологию, способствует актуализации знаний, становится стартовой площадкой для новой темы. Обычно входной контроль редок (вступительные экзамены, допуск к лабораторной работе), но при компьютеризации обучения его частота повышается.

*Текущий контроль* – диагностика знаний, умений и навыков (ЗУН) и коррекция обучения в процессе усвоения темы, позволяющая исправлять недостатки обучения и достигать необходимого уровня его усвоения.

*Рубежный контроль* – это проверка уровня усвоения очередного раздела курса. Студенту предлагается творческая задача, задача повышенной сложности или задача, предусматривающая перенос усвоенных знаний на другой материал. Успешное решение задачи показывает, что учащийся овладел всей системой знаний и действий, предусмотренных целями обучения по данной теме. Рубежная проверка позволяет обучаемому запрашивать необходимый справочный или информационный материал, советы, разъяснения ошибок, наводящие вопросы. Задания должны быть адекватны этапу познавательной деятельности, элементу которого соответствует серия нескольких заданий. Рубежный контроль может быть входным для изучения последующего материала и поддержки уровня знаний при перерывах в обучении, что характерно для студентов заочной и сокращенной заочной форм. Итогом рубежного контроля являются результаты контрольных точек.

*Экзаменационный (итоговый) контроль*. Если проверка исходного уровня – «входной» контроль, то заключительный контроль показывает полученные результаты «на выходе». Он представляет собой серию заданий по всему материалу, которую обучаемый должен решить самостоятельно. По результатам экзаменационного контроля учащийся получает отметку.

*Самоконтроль знаний* – наиболее простой вид. Обычно это вопросы и задачи, на которые учащийся пытается ответить самостоятельно. При затруднении он может обратиться к учебнику и найти в нем ответы. Основная цель самоконтроля – самоутверждение, достижение уверенности в усвоении учебного материала, хотя это может и не соответствовать действительности.

Таким образом, основные цели разных видов контроля следующие: самоутверждение; готовность к изучению нового материала; проверка уровня усвоения; поддержка адаптивного обучения и уровня знаний; формирование базы оценок для определения рейтинга обучаемых. Программные средства контроля знаний должны обеспечивать все стадии его проведения: от идентификации до выдачи результатов.

Контроль (диагностика) знаний, умений, навыков (ЗУН) включает в себя выполнение некоторого множества заданий, характеризующихся трудностью и сложностью. Трудность задания определяется уровнем усвоения, на диагностику которого оно направлено. Сложность характеризуется числом существенных операций в нем, в т.ч. и свернутых.

*Педагогически корректное задание для контроля знаний студентов должно быть:* содержательно валидным (построенным на содержании предшествующего обучения); функционально валидным (проверка того, для чего его используют); объективным; однозначным; специфичным (требующим конкретных ЗУН, а не общей эрудиции); способным разделить учащихся на знающих и незнающих.

*Подбор заданий в группу* основан на репрезентативности (полноте охвата дисциплины или ее раздела ограниченной выборкой); однородности (равноценности содержания и трудности наборов заданий); рандомизации (гарантии не предъявления одного и того же набор заданий).

Входной контроль выполняется в виде тестовых заданий. Формами текущего контроля являются блиц-опрос студентов на каждой лекции по пройденному материалу (5-7 минут), опрос на практических занятиях, защита индивидуальных домашних заданий, контроль за выполнением РГР, рефераты.

Рубежный контроль предусматривает выполнение контрольных работ, комплексных заданий, направленных на проверку эвристических способностей студентов, углубленного изучения материала, коллоквиум.

Итоговый контроль – это экзамен по дисциплине. Экзаменационный билет включает тестовое задание по теоретическому материалу и задачу. Предусмотрено три типа сложности задач: простой, средней и повышенной сложности. Студенту предлагается выбор задачи по сложности в зависимости от того, на какую оценку он претендует. Если студент не справляется с задачей средней или повышенной сложности, то предлагается простая задача, отсутствие решения которой приводит к неудовлетворительной оценке на экзамене.

Рекомендуется при оценке знаний студентов на экзамене учитывать его работу в семестре.

## **7.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний**

### **Входной контроль**

Для входного контроля предусмотрен комплект тестов, варианты из которого формируются с помощью генератора случайных чисел. Ниже приведен пример теста входного контроля.

#### **Тест №1**

1. Дополнить: Суммой случайных событий А и В называется такое событие С, которое ...
2. Логический союз «И» соответствует закону
  - а) умножения;
  - б) сложения;
  - в) деления.
3. Дополнить: Потребитель I категории – это потребитель ...
4. Разомкнутая сеть – это сеть, в которой
  - а) поток энергии направлен в одну сторону;
  - б) потребитель может получать энергию с двух сторон;
  - в) электроснабжение подстанций осуществляется с трех и более сторон.
5. Привести классификацию электрических сетей по конфигурации.

6. Дополнить: Формула полной вероятности – это ...
7. Дополнить: К коммутационным аппаратам относятся ...

Полный комплект тестов входного контроля находится на кафедре энергетики.

### Текущий контроль

Задания по текущему контролю делятся на тестовые и расчетные.

Тестовые задания по текущему контролю предусмотрены на каждую тему, т.е. на кафедре имеется 6 комплектов тестовых заданий, каждый из которых включает 20 вариантов.

Ниже приведен пример одного из них.

#### Тестовое задание №1

1. Выбрать приемлемые ответы: К единичным показателям надежности относятся:
  - а) вероятность безотказной работы;
  - б) коэффициент готовности системы;
  - в) функция ненадежности;
  - г) интенсивность отказов.
2. Дополнить: Кривая изменения интенсивности отказов во времени включает следующие периоды ...
3. Выбрать правильный ответ: Интенсивность отказа постоянна в процессе
  - а) приработки;
  - б) нормальной эксплуатации;
  - в) износе.
4. Выбрать правильный ответ: Вероятность восстановления – это
  - а) вероятность того, что объект не будет восстановлен за заданное время;
  - б) вероятность того, что объект будет восстановлен за заданное время;
  - в) скорость изменения времени восстановления;
  - г) скорость протекания аварийного ремонта.
5. Дополнить: Параметр потока отказов характеризует ...
6. Перечислить основные свойства простейшего потока отказов.
7. Выбрать правильный ответ: Если вероятность наступления отказов в течение рассматриваемого промежутка времени зависит от того сколько было отказов до этого промежутка времени, то рассматриваемый поток относится:
  - а) к простейшему;
  - б) к потокам с последствием;
  - в) к пуассоновским потокам.
8. Дополнить: К количественным показателям надежности относятся ...
9. Выбрать правильный ответ: В общем случае вероятность отказа и коэффициент вынужденного простоя системы
  - а) равны между собой;
  - б) не равны между собой.
10. Дополнить: Ординарность потока отказов означает ...
11. Перечислить виды потоков отказов.
12. Показать чем отличаются наработка на отказ и наработка до отказа.
13. Что больше расчетное или среднее время безотказной работы.
14. Определить вероятность безотказной работы элемента, если вероятность отказа равна 0,2
  - а) 0,6;
  - б) 0,8;
  - в) 0,5;

- г) 5;
- д) 0,2.

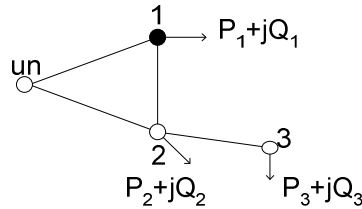
15. Найти среднее время безотказной работы при экспоненциальном законе распределения, если  $\lambda=0,4$

- а) 0,3;
- б) 0,25;
- в) 0,2;
- г) 0,5;
- д) 0,6.

Расчетные задания имеются по темам 2-6 (см. рабочую программу) и хранятся на кафедре. Примеры расчетных заданий по одной из тем даны ниже.

**Расчетное задание №1**

Составить граф перехода из состояния в состояние, записать систему дифференциальных уравнений и на их основе выражения для стационарных значений коэффициентов готовности и отказа для системы.

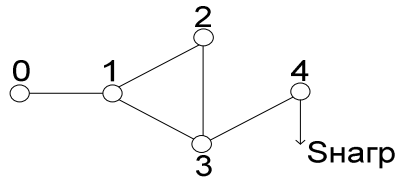


**Расчетное задание №2**

Записать систему дифференциальных уравнений на основе графа перехода из состояния в состояние для трех параллельно соединенных элементов и показать чему равны стационарные  $K_r$ ,  $K_p$ .

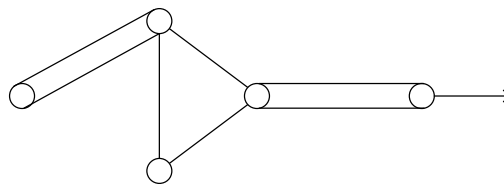
**Расчетное задание №3**

Составить граф перехода для схемы.



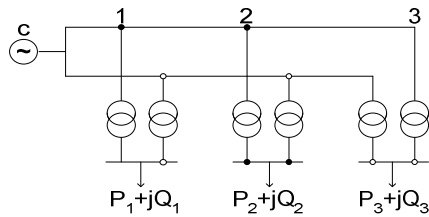
**Расчетное задание №4**

Составить граф перехода для схемы.



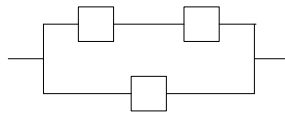
### Расчетное задание №5

Составить граф переходов из состояния в состояние, записать систему дифференциальных уравнений и на их основе выражения для коэффициентов готовности и простоя системы.



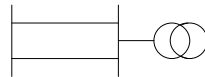
### Расчетное задание №6

Составить граф переходов, систему дифференциальных уравнений, вероятности стационарных состояний для схемы



### Расчетное задание №7

Составить граф перехода, систему дифференциальных уравнений и стационарные  $K_{г.с}$  и  $K_{п.с}$  для схемы:



## Рубежный контроль

Рубежный контроль осуществляется в сроки промежуточной аттестации студентов (контрольные точки) и предусматривает проведение двух контрольных работ:

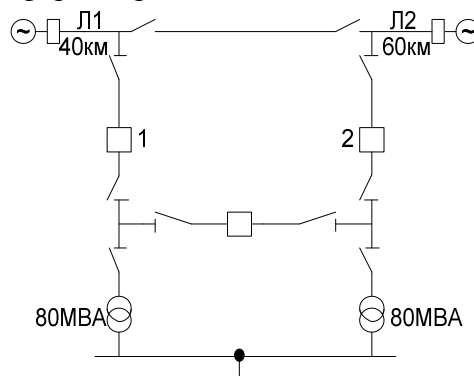
Контрольная работа №1 на тему «Модели отказов электрооборудования и электроустановок».

Контрольная работа №2 на тему «Применение инженерных методов анализа надежности».

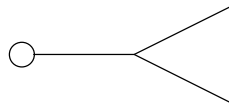
Вторая контрольная работа выполняется как расчетная по карточкам, примеры которых показаны ниже.

### Билет №2

- 1) Оценить надежность следующей схемы и рассчитать ее количественные характеристики двумя методами. Что изменится если выключатели 1, 2 будут в цепях силовых трансформаторов?

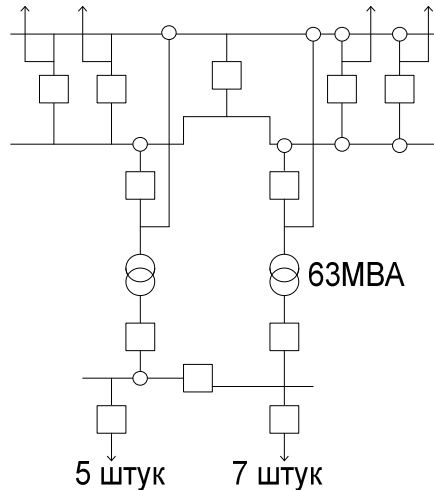


- 2) При проектировании эл. систем, какая модель надежности выбирается для анализа вариантов схем районных подстанций и почему? Как оценить ущерб от перерыва в электроснабжении в такой системе? Показать на примере подстанции п.1.
- 3) Составить граф перехода, дифференциальные уравнения,  $K_{г.с.}$ ,  $K_{п.с.}$  для схемы.

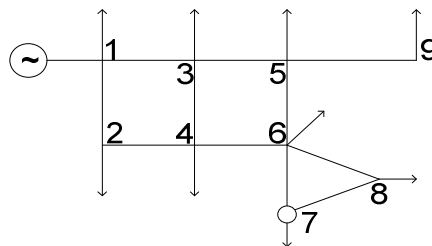


Билет №3

- 1) Рассчитать надежность схемы п/ст 110/10кВ с учетом АВР.



- 2) Оценить надежность схемы методом минимальных сечений относительно узла 7.

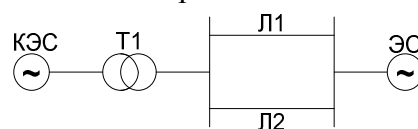


- 3) Составить граф перехода и оценить вероятности состояний для схемы:



Билет №4

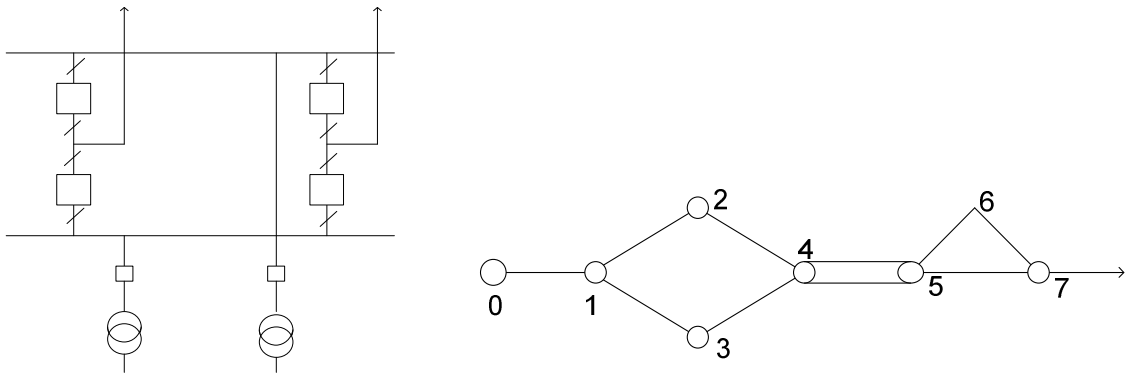
- 1) Составить граф переходов из состояния в состояние, записать систему дифференциальных уравнений и показать на их основе чему будут равны стационарные значения коэффициентов готовности и оперативной готовности системы:



Каждый элемент пропускает всю требуемую мощность.

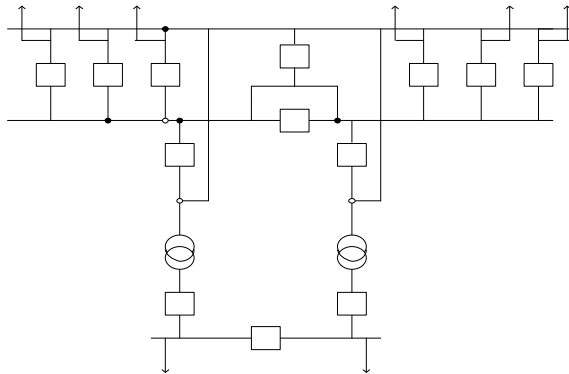
- 2) Оценить надежность следующей схемы в нормальном и ремонтных режимах;  $S_T=100\text{MVA}$ ,  $U=220\text{kV}$ ,  $S_{\text{треб}}=130\text{MVA}$
- 3) Методом минимальных сечений определить вероятность отказа схемы сравнить с деревом событий



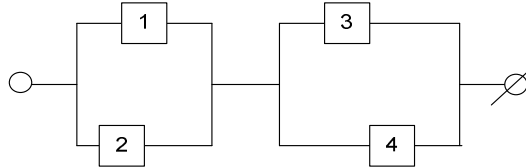


Билет №5

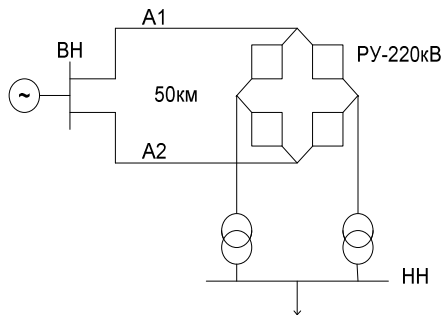
1) Оценить надежность схемы ПС 220/10кВ.



2) Составить граф перехода и найти вероятности состояний для схемы

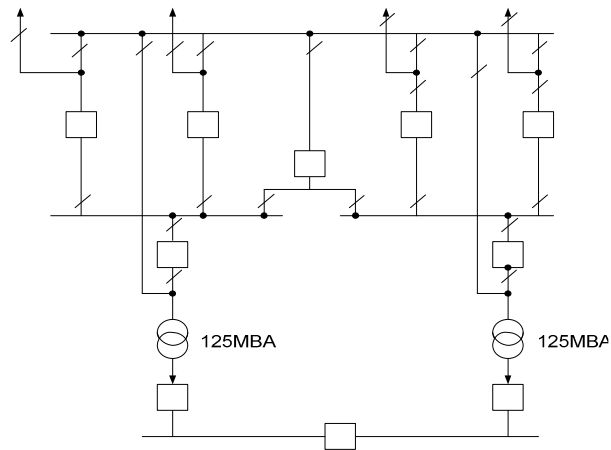


3) Методом минимальных сечений оценить надежность схемы



Билет №7

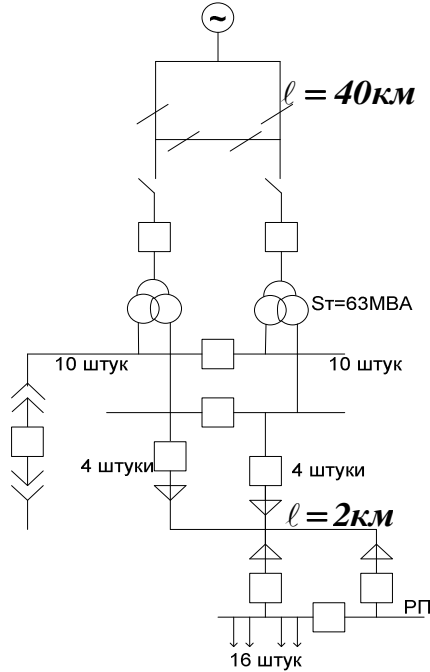
1) Оценить надежность схемы районной подстанции 110кВ и рассчитать количественно показатели надежности. Учесть соответствие схемы 13А в нормальном режиме и одном из ремонтных.



- 2) Чем отличаются комплексные показатели надежности от единичных? Какова их область применения? Рассмотреть по состоянию событий.
- 3) Как для приведенной схемы учесть секционный и межсистемные выключатели?
- 4) Составить граф перехода для 3-х параллельных элементов.

#### Билет №8

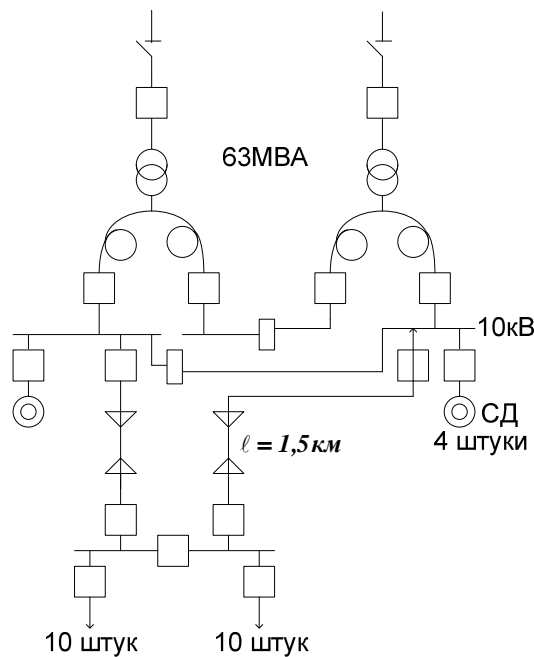
- 1) Рассчитать надежность системы электроснабжения двумя методами.



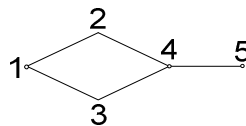
- 2) В каком случае оценивается температурный режим изоляции? Как рассчитать относительный износ изоляции? Приведите свой пример.
- 3) Составить граф перехода для одной секции шин ПС, написать диф. уравнение и  $K_{г. с.}$ ,  $K_{п. с.}$ .

#### Билет №9

- 1) Рассчитать надежность системы электроснабжения двумя методами.

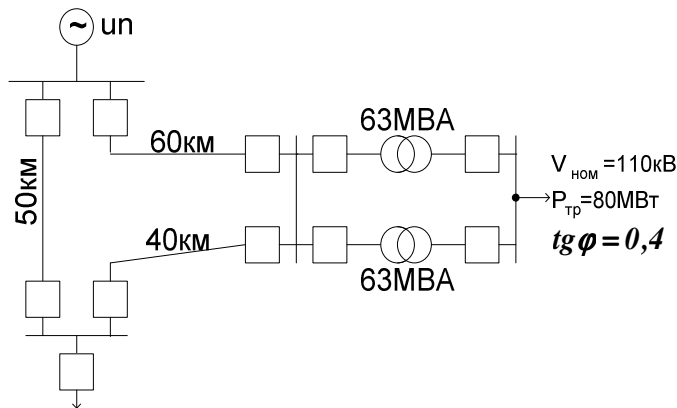


- 2) Какие показатели надежности нужно рассчитать для системы электроснабжения предприятия? Какими методами?
- 3) Составить граф перехода для схемы. Записать  $K_{г. с.}$ ,  $K_{п. с.}$

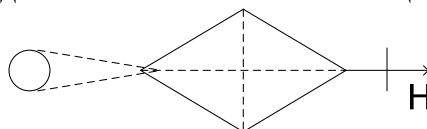


#### Билет №10

- 1) Оценить надежность следующей схемы и рассчитать количественные характеристики надежности.

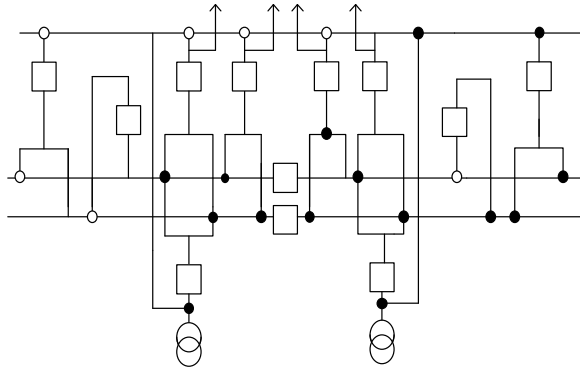


- 2) Чем отличаются модели отказов электроустановок и модели надежности электроустановок. Какова их область применения. Дать модель надежности силовых трансформаторов и модель отказа выключателя 220 кВ и 10 кВ.
- 3) Составить граф перехода для схемы, записать диф. уравнения,  $K_{г. с.}$ ,  $K_{п. с.}$ . Добавив к схеме штриховую часть методом минимальных сечений оценить ее надежность.



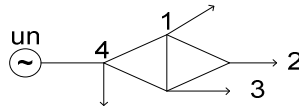
Билет №12

1) Оценить надежность схемы ПС относительно РУ СН 220кВ.



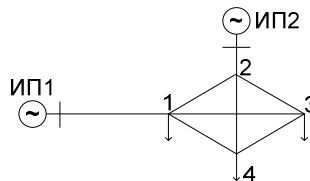
2) Покажите формирование модели отказов для группы однотипных агрегатов общим числом 7 и рабочим числом 5. Как влияет кратность резервирования на надежность.

3) Составить граф перехода относительно узла 1 и методом минимальных сечений оценить надежность схемы по графу перехода и диф. уравнениям найти вероятности состояний.



Билет №13

1) Составить граф перехода из состояния в состоянии, записать систему дифференциальных уравнений и на их основе значения коэффициентов простоя и готовности системы для стационарного режима относительно узла 4.

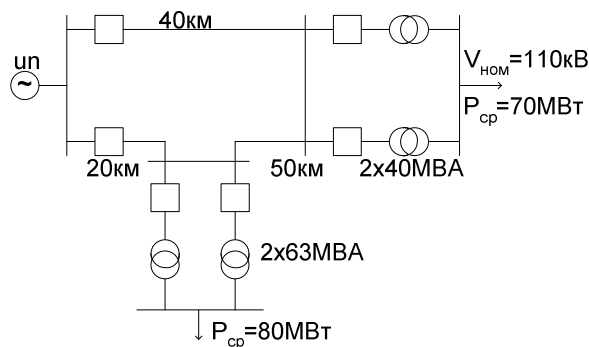


2) Оценить надежность системы относительно узла 3 методом минимальных сечений с учетом преднамеренных отключений.

3) Составить схему ПС 3, имеющей РУ-110кВ, РУ-10кВ и оценить ее надежность любым методом с учетом схем автоматики.

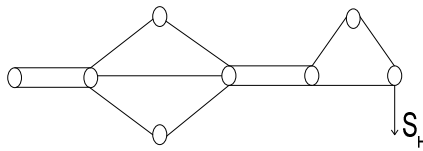
Билет №15

1) Оценить надежность и рассчитать ее количественные характеристики для следующей схемы:



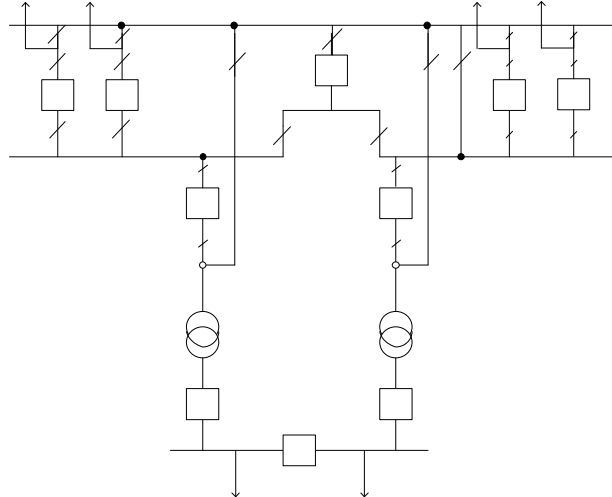
2) Как учесть наложение аварийного отказа одной части системы на преднамеренные отключения другой? Пояснить на примере п.1.

3) Оценить надежность схемы любым методом:

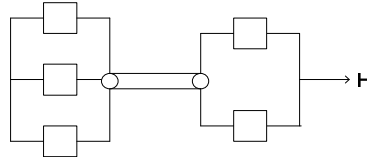


Билет №21

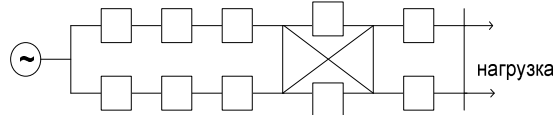
1) Оценить надежность схемы двумя методами. Учесть средства РЗ и ПВА.



2) Составить граф перехода, написать по нему систему дифференциальных уравнений, коэффициент простоя системы и  $K_{o.g.}$

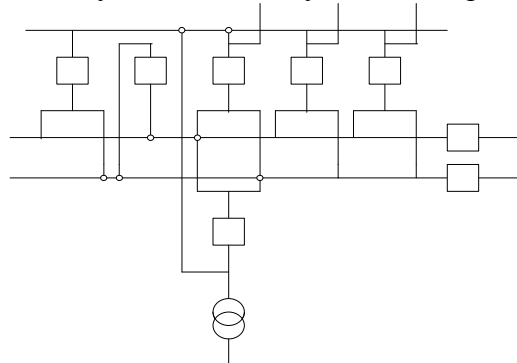


3) Методом минимальных сечений определить надежность схемы сети.

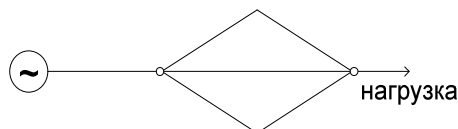


Билет №23

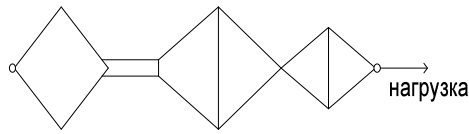
1) Оценить надежность схемы двумя методами, учесть все средства автоматики в схеме.



2) Составить граф перехода для схемы, написать стационарные коэффициенты надежности.

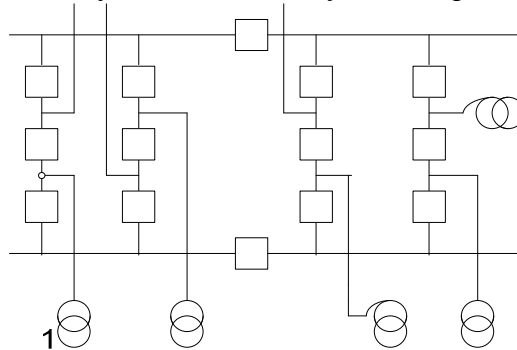


3) Методом минимальных сечений оценить надежность схемы:

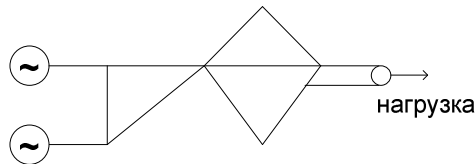


Билет №24

1) Оценить надежность схемы двумя методами, с учетом средств автоматики.

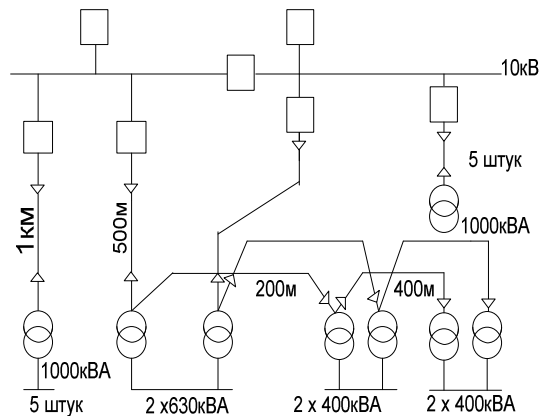


- 2) Составить граф перехода и вероятности стационарных состояний для присоединения 1.
- 3) Методом минимальных сечений оценить надежность схемы:

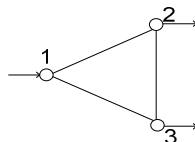


Билет №25

- 1) Рассчитать надежность схемы внутреннего электроснабжения
  - а) аналитически
  - б) методом минимальных сечений



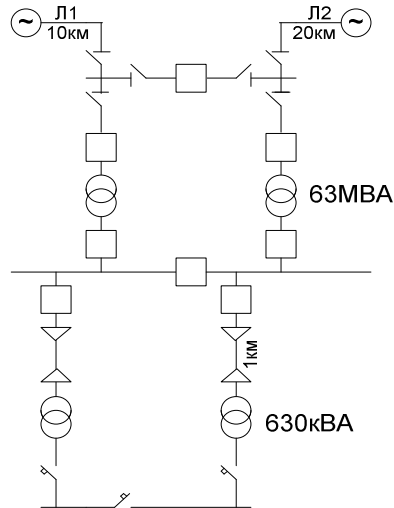
2) Записать граф перехода от состояния к состоянию, систему дифференциальных уравнений для трех взаиморезервируемых элементов:



3) Какой моделью учитываются выключатели на стороне 10кВ и почему?

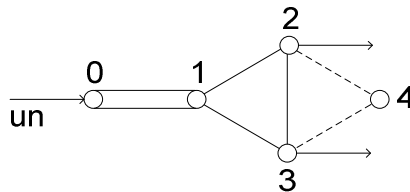
Билет №26

1) Рассчитать надежность схемы электроснабжения.



2) Оценить температурный режим изоляции СТ 63МВА, если п/аварийном режиме  $K_3 = 1,45$ , в нормальном режиме  $K_3 = 0,75$ . Длительность послеаварийного режима 8 часов: с 12ч до 20ч.

3) Составить граф перехода для схемы и найти по системе дифференциальных уравнений  $K_{г.с.}$  и  $K_{п.с.}$ . Добавить к схеме штриховую часть, оценить надежность относительно узла 4 методом минимальных сечений.



Билет №27

1) Рассчитать надежность схемы электроснабжения.

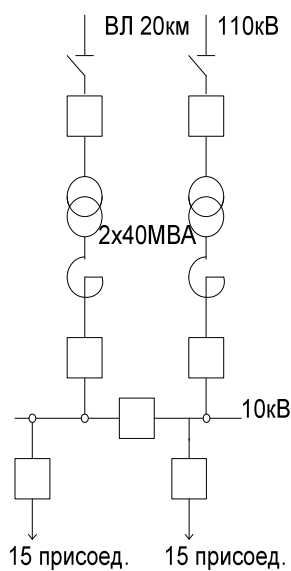


Рис.1

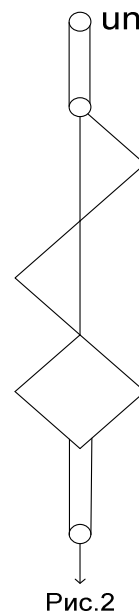


Рис.2

а) раздельная схема 10кВ

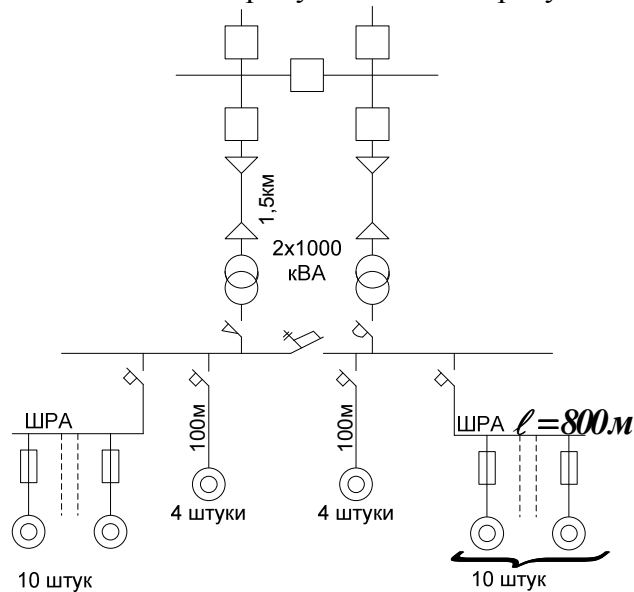
б) магистральная схема 10кВ (разработать самим).

2) Чем отличается модель внезапных отказов от модели постепенных отказов? Где они применяются? Написать модели, показать граф перехода для ПС рис. 1.

3) Методом минимальных сечений оценить надежность следующей схемы (рис.2).

Билет №28

1) Рассчитать надежность схемы электроснабжения аналитическим методом и методом минимальных сечений. Все элементы пропускают 100% требуемой мощности.



2) Составить граф перехода из состояния в состояние для 4 последовательно соединенных элемента СЭС и записать на их основе дифференциальные уравнения и вероятности состояний.

3) Чем отличается резервирование замещением от постоянного резервирования. Какой вид резервирования приведен в схеме? Как его учесть в модели надежности?

Билет №29

1) Рассчитать надежность в следующей части схемы:

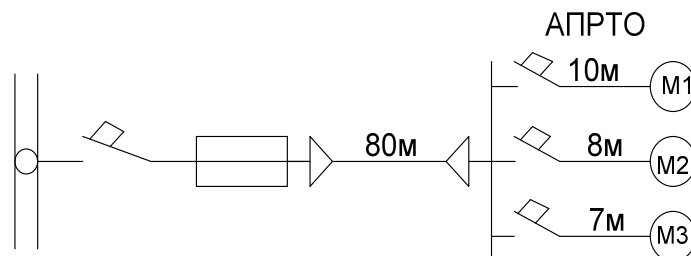
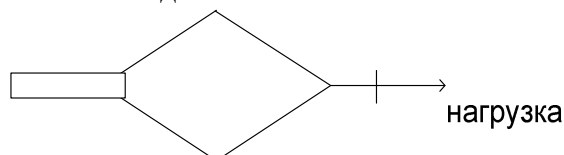


Рис.1

2) Составить граф перехода состояний, систему дифференциальных уравнений и записать выражения для стационарных значений коэффициента готовности и коэффициента простоя для схемы, приведенной на рис.1.

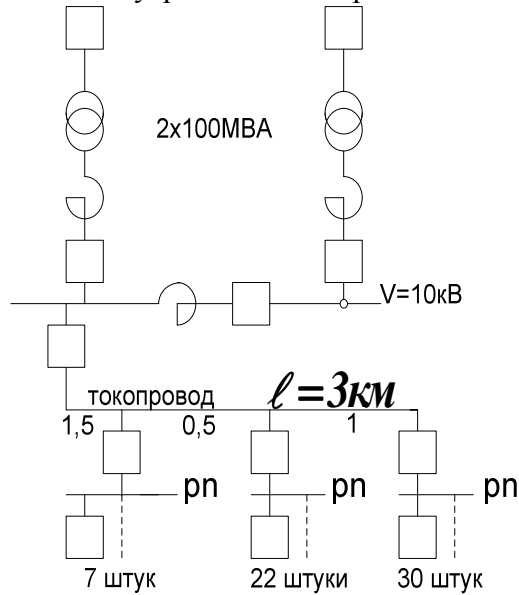
3) Оценить надежность схемы методом минимальных сечений.





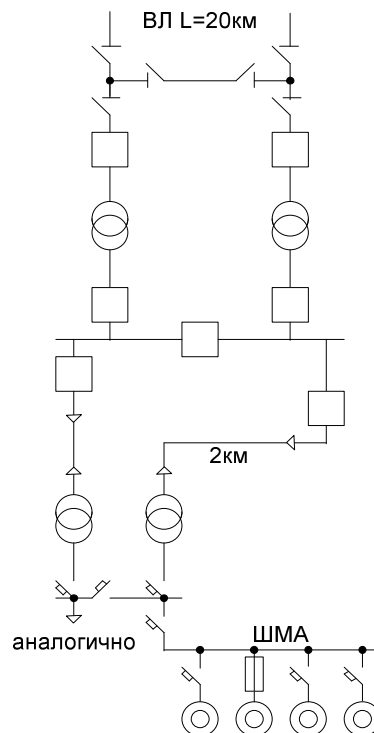
Билет №31

1) Рассчитать надежность схемы внутреннего электроснабжения

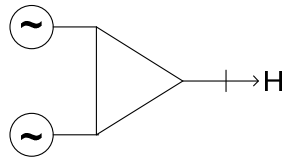


- аналитически
  - методом минимальных сечений
- Как рассчитывается резерв методом удельных резервов? О каком резерве идет речь?
  - Составить граф перехода для двух параллельно соединенных цепочек, состоящих из выключателя, трансформатора, реактора и выключателя.
  - Как влияют преднамеренные отключения на надежность схемы и когда их учитывать?

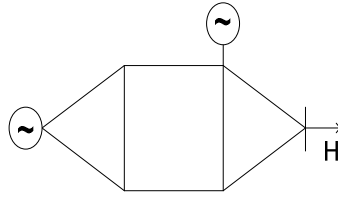
Билет №32



- Рассчитать надежность системы электроснабжения, при условии частичного резервирования цепей силовых станций 110/10кВ. Каждая станция пропускает 60% требуемой мощности.
- Составить граф перехода для схемы и оценить по нему надежность схемы.

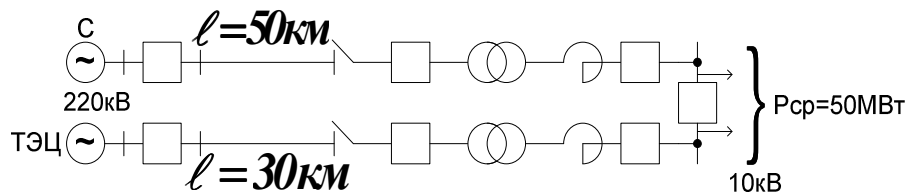


3) Определить надежность схемы.



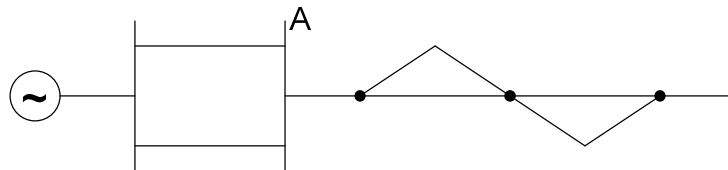
Билет №35

1) Рассчитать надежность следующей части схемы электроснабжения, питающей потребителей I категории.



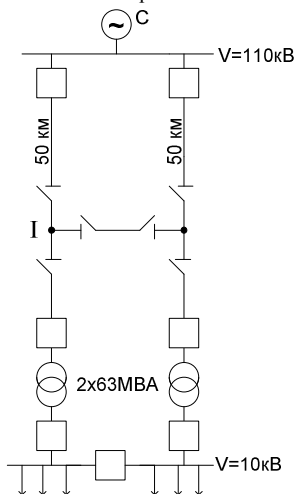
2) Как формируется модель постепенных отказов? Для каких случаев ее можно применить? Показать на примере схемы.

3) Составить граф перехода, систему дифференциальных уравнений  $K_{г.с.}$  и  $K_{п.с.}$  относительно узла А и оценить надежность схемы.



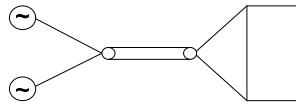
Билет №36

1) Рассчитать надежность системы внешнего электроснабжения предприятия с электроприемниками I, II категории, если  $P_{cp} = 80$  МВт.



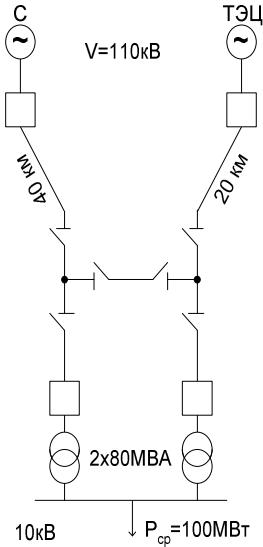
2) Чем отличаются комплексные показатели надежности от единичных? Какими показателями пользуются для оценки надежности одного элемента, узла нагрузки, системы в целом? Показать на примере схемы п.1. Составить граф перехода для I присоединения, найти стационарные  $K_{г.с.}$  и  $K_{п.с.}$

3) Оценить надежность схемы



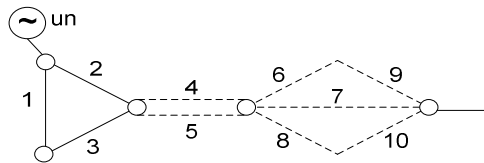
### Билет №37

1) Рассчитать надежность системы внешнего электроснабжения предприятия, при условии, что каждая цепь пропускает 100%-ную мощность, 50%-ную мощность.



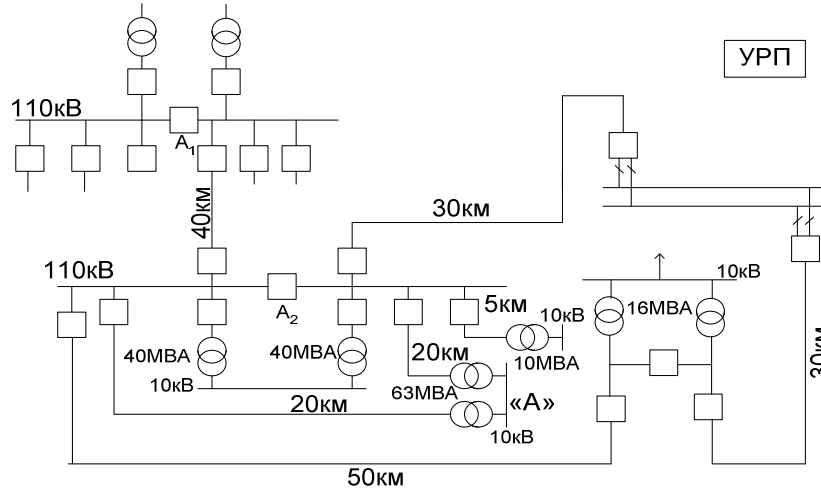
2) Какой моделью учитывается секционный выключатель? Почему? Покажите на конкретном примере, добавив в схему РУНН.

3) Составить граф перехода, найти стационарные коэффициенты надежности для схемы. Добавив в данную схему штриховую часть, найти вероятность отказа.



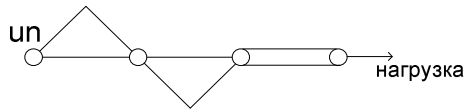
### Билет №38

1) Оценить надежность схемы распределительной сети 110кВ и рассчитать ее количественные характеристики двумя методами и составить граф перехода, систему дифференциальных уравнений,  $K_{г.с.}$  и  $K_{п.с.}$  для ПС «А».



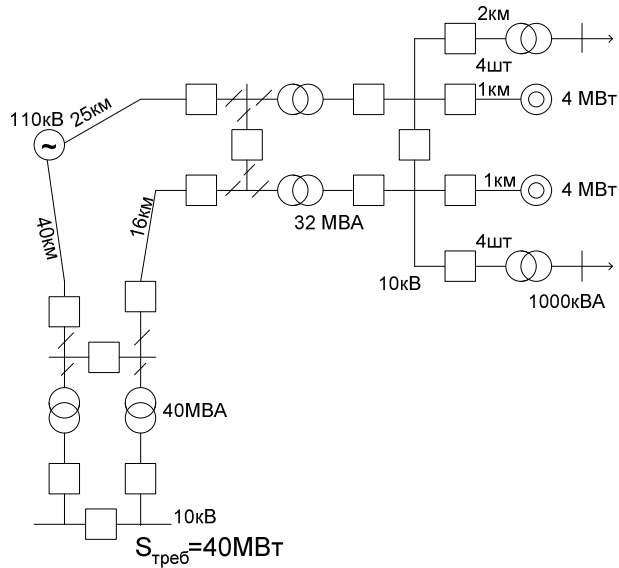
2) Где применяется модель постепенных отказов? Объясните ее и запишите для характерных элементов системы.

3) Методом минимальных сечений определить отказ схемы относительно узла нагрузки

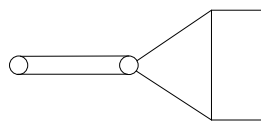


Билет №39

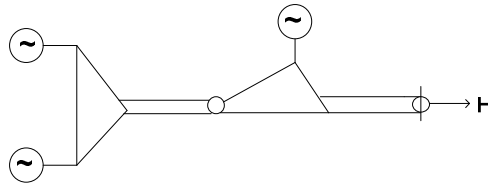
1) Определить надежность системы электроснабжения



2) Составить граф перехода схемы

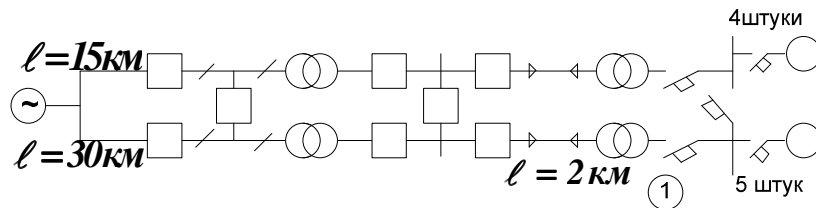


3) Методом минимальных сечений оценить надежность схемы.



Билет №40

1) Определить надежность схемы электроснабжения. Каждый трансформатор и линия пропускают 100% требуемой мощности.



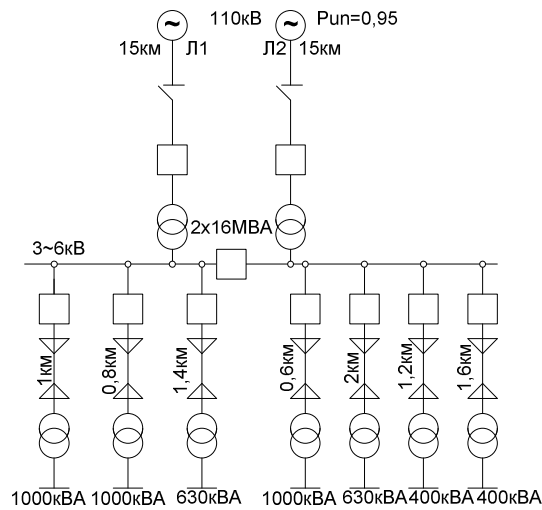
2) Составить граф перехода для присоединения 1.

3) Методом минимальных сечений оценить надежность схемы.



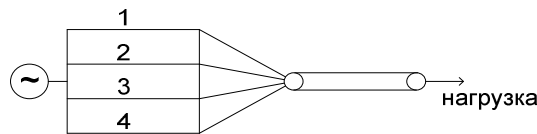
### Билет №42

1) Рассчитать надежность системы электроснабжения для части схемы, показанный на рис. 1.



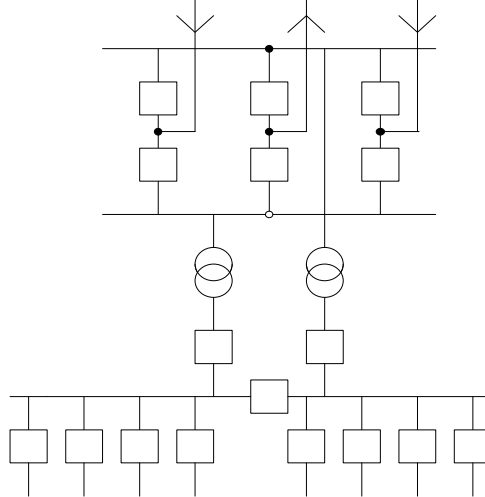
2) Чем отличаются показатель готовности и показатель оперативной готовности? Как их найти? Кокой из них важен для ОДС? Найти для схемы рис.1.

3) Найти граф перехода схемы, стационарные  $K_{г.с.}$  и  $K_{п.с.}$ . Добавив в схему непронумерованную часть схемы оценить ее надежность.

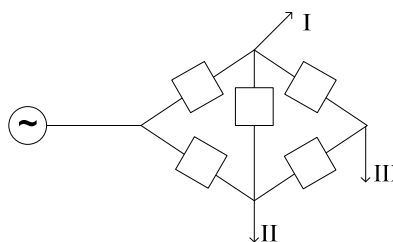


### Билет №46

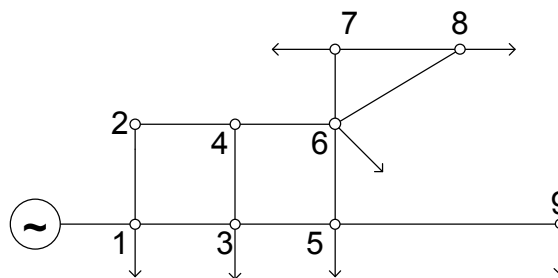
1) Рассчитать надежность следующей схемы узловой ПС на напряжении 220/10кВ.



2) Составить граф перехода, систему дифференциальных уравнений и определить вероятности состояний для схемы относительно узлов I и II.



3) Методом минимальных сечений оценить надежность схемы относительно узла 9.



### 7.3. Экзаменационный контроль

#### Вопросы к экзамену

1. Характеристики и задачи оценки надежности.
2. Работоспособность и отказ.
3. Показатели надежности: единичные и комплексные.
4. Факторы, нарушающие надежность системы.
5. Внезапные и постепенные отказы.
6. Причины отказов элементов систем электроэнергетики
7. Модель внезапного отказа.
8. Модель постепенного отказа.
9. Анализ надежности системы из последовательно соединенных элементов по модели отказов электроустановок.
10. Анализ надежности системы из резервируемых элементов по модели отказов электроустановок.
11. Резервирование замещением.
12. Постоянное резервирование.
13. Резервирование релейно-контакторных схем.
14. Модели выключателей, применяемые при расчете надежности в электроэнергетике.
15. Расчет показателей надежности систем релейной защиты и автоматики.
16. Учет средств релейной защиты и автоматики при расчетах надежности.
17. Модель надежности системы из последовательно соединенных элементов.
18. Модель надежности схемы из параллельно соединенных элементов.
19. Анализ надежности системы из последовательно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений.
20. Анализ надежности системы из параллельно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений.
21. Аналитический метод расчета надежности систем электроснабжения.
22. Метод путей и минимальных сечений сложных схем.
23. Топологические методы расчета надежности.
24. Логико-вероятностный метод расчета надежности систем электроснабжения.
25. Таблично-аналитический метод расчета надежности.
26. Техничко-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения.
27. Определение ущерба от перерывов в электроснабжении потребителей.
28. Анализ надежности типовых схем РУ подстанций.
29. Анализ надежности типовых схем РУ станций.
30. Особенности определения надежности в ремонтных режимах.
31. Марковские случайные процессы в теории надежности.
32. Модель состояний Маркова, применение графов в качестве моделей.
33. Ненагруженный резерв.

34. Выбор резерва генерирующей мощности.
35. Экономико-математические модели для оптимизации надежности.
36. Средства и методы повышения надежности систем электроэнергетики.
37. Надежность функционирования оперативных (диспетчерских) энергетических систем в электрических сетях.
38. Задачи надежности в условиях эксплуатации субъектов энергетики.

Задания для экзамена по дисциплине сформированы в виде инженерных задач, включающих в себя расчет показателей надежности компонентов промышленных электрических станций, распределительных устройств подстанций, подстанций в целом, систем электроснабжения предприятий и городов для различных режимов работы.

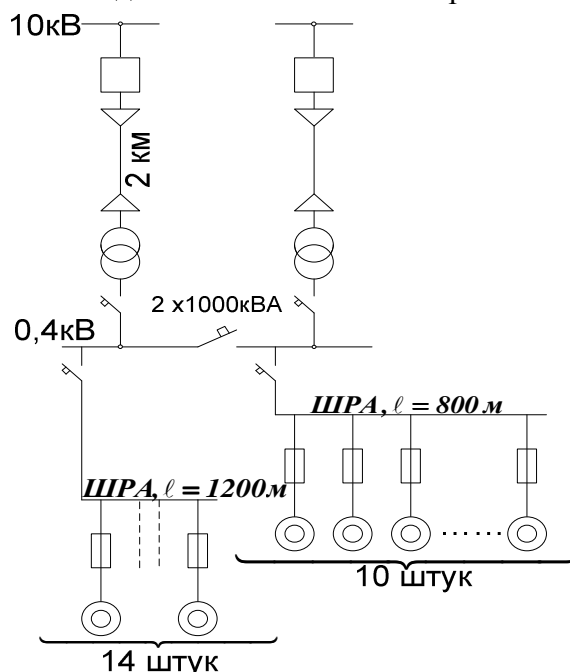
### **Критерии оценки**

К экзамену допускаются студенты, выполнившие весь объем по индивидуальной работе. Критерии оценки определены в нормативных и методических материалах АмГУ.

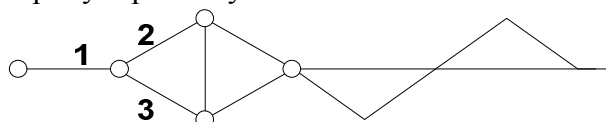
### Пример билета на экзамен

#### Билет № 26

1. Понятие «элемент» и «система» с точки зрения надежности.
2. Причины отказов энергоблоков.
3. Вероятность отказа изоляции с учетом «порога чувствительности».
4. Марковские случайные процессы.
5. Составление направленных графов при применении метода минимальных сечений.
6. Задача. Рассчитать надежность системы электроснабжения.



Какие показатели надежности необходимо знать для анализа схемы электроснабжения и как их рассчитать? По какому показателю определяется вероятность безотказной работы? Составить граф перехода,  $K_{п. с.}$ ,  $K_{г. с.}$  по системе диф. уравнений для схемы и оценить надежность, добавив пронумерованную часть схемы.



Полный комплект экзаменационных билетов хранится на кафедре.

## VIII. КАРТА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДИСЦИПЛИНЫ КАДРАМИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА

Лекции	Практические занятия	Контроль качества знаний студентов	Экзамен
Д.т.н., проф. Наумов И.В.	Ст. преп. Литвинова О.Н.	Д.т.н., проф. Наумов И.В., ст. преп. Литвинова О.Н.	Д.т.н., проф. Наумов И.В.

## IX. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

а) основная литература:

1. Савина Н.В. Надежность систем электроэнергетики [электронный ресурс]: учеб. пособие/ Н.В. Савина – Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2011. – 268 с., 1898 Кб. Режим доступа: <http://rucont.ru>
2. Савина Н.В. Теория надежности в электроэнергетике : учеб. пособие/ Н.В. Савина; АмГУ, Эн.ф.. – Благовещенск: изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. – 214 с.
3. Острейковский В.А. Теория надежности : учеб. : рек. УМО/ В. А. Острейковский. - 2-е изд., испр. . -М.: Высш. шк., 2008. -464 с.

б) дополнительная литература:

1. Китушин В. Г. Надежность энергетических систем : учеб. пособие/ В. Г. Китушин Ч. 1 : Теоретические основы. – Новосибирск: изд-во НГТУ – 2003. -255 с.
2. Кобылин В.П. Повышение эксплуатационной надежности электросетевого хозяйства на Севере : [моногр.]/ В. П. Кобылин ; отв. ред. Н. И. Воропай. - Новосибирск: Наука, 2006. -223 с.
3. Надежность либерализованных систем энергетики : [моногр.]/ В. А. Баринов [и др.] ; отв. ред. Н. И. Воропай, отв. ред. А. Д. Тевяшев. -Новосибирск: Наука, 2004. -334 с.
4. Надежность систем энергетики и их оборудования [Текст] : Справочник: В 4х т. / Ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2 : Надежность электроэнергетических систем : справочное издание, – М.: Энергоатомиздат - 2000. - 566 с.
5. Надежность электроснабжения : учеб.-метод. комплекс для спец. 140211/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина. -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -175 с.
6. Половко А.М. Основы теории надежности : учеб. пособие: рек. УМО/ А. М. Половко, С. В. Гуров. -2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -702 с.
7. Половко А.М. Основы теории надежности : практикум: рек. УМО/ А. М. Половко, С. В. Гуров. -СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -558 с.
8. Трубицын В.И. Надежность электростанций/ В.И. Трубицын – М.: Энергоатомиздат, 1997.– 240 с.
9. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем : учеб. пособие для вузов: доп. Мин. обр. РФ/ И.А. Ушаков. -М.: Дрофа, 2008. -240 с.
10. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем : Учеб. пособие: Рек Сиб. регион. отд-нием УМО по обр. в обл. энергетики и электротехники/ А.И. Шалин. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2003. -384 с.



в) периодические издания (журналы):

1. Электричество;
2. Известия РАН. Энергетика;
3. Электрические станции;
4. Энергетик;
5. Вестник МЭИ;
6. Промышленная энергетика;
7. Энергетика. Сводный том;
8. Вестник ИГЭУ;
9. Известия вузов. Электромеханика.
10. Энергохозяйство за рубежом;
11. IEEE Transaction on Power Systems;
12. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.