

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой энергетики
_____ Н.В.Савина
« ____ » _____ 2007 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Электроэнергетика. Передача и распределение электроэнергии»

для специальностей:

- 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»
- 140204 – «Электрические станции»
- 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»
- 140211 – «Электроснабжение»

Составитель: Н.В. Савина

Благовещенск

2007 г.

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

Н.В. Савина

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Электроэнергетика. Передача и распределение электроэнергии» для студентов очной, заочной и сокращенной заочной форм обучения специальностей 140204 – «Электрические станции»; 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»; 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»; 140211 – «Электроснабжение». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007, 236 с.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи профессорско-преподавательскому составу и студентам очной, заочной и сокращенной заочной форм обучения по дисциплине «Электроэнергетика. Передача и распределение электроэнергии» специальностей 140204 – «Электрические станции»; 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»; 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»; 140211 – «Электроснабжение» в формировании общепрофессиональных (базовых) знаний в области типов и конфигурации эл.сетей, расчета установившихся режимов в электрических сетях, конструктивного исполнения электрических сетей, балансов активной и реактивной мощности в системе.

© Амурский государственный университет, 2007

© Н.В. Савина

СОДЕРЖАНИЕ

1. Типовая программа дисциплины	4
2. Рабочая программа дисциплины	11
2.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе	12
2.1.1. Цель преподавания дисциплины	12
2.1.2. Задачи изучения дисциплины	12
2.1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо при изучении данной дисциплины	14
2.2. Содержание дисциплины	14
2.2.1. Федеральный компонент	14
2.2.2. Наименование тем, их содержание и объем в часах	15
2.2.3. Практические занятия	23
2.2.4. Самостоятельная работа студентов	26
2.2.5. Формы контроля знаний студентов	27
2.2.6. Вопросы к экзаменам и зачетам	31
2.3. Учебно-методические материалы по дисциплине	36
2.3.1. Литература	36
2.3.2. Периодические издания (профессиональные журналы)	39
2.3.3. Информационное обеспечение дисциплины	39
2.3.4. Перечень наглядных и других пособий	39
2.3.5. Программы для ПЭВМ	39
2.4. Учебно-методическая карта дисциплины	40
3. Краткий конспект лекций	45
3.1. Методические указания по проведению лекций	45
3.2. Краткий конспект лекций	46
4. Практические занятия	99
4.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий	99
4.2. Методические указания по проведению практических занятий	100
5. Самостоятельная работа студентов	164
5.1. График самостоятельной работы студентов	164
5.2. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ	166
5.3. Комплекты домашних заданий, контрольных работ	166
6. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины	203
7. Методические указания по применению современных информационных технологий	204
8. Контроль качества образования	205
8.1. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов	205
8.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний	207
8.3. Экзаменационный контроль	232
9. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава	234
10. Список использованных источников	235

1. Типовая программа дисциплины

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель Департамента образовательных
программ и стандартов профессионального
образования

_____ Л. С. Гребнев

«__» _____ 2001г.

ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Рекомендуется Минобразованием России для направления
подготовки бакалавров 551700 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

1. Цели и задачи дисциплины.

Целью изучения дисциплины является подготовка инженеров в области производства, передачи и распределения электрической энергии, автоматизации энергосистем, изоляции и защиты электрооборудования от перенапряжений.

Задачей изучения дисциплины является ознакомление студентов с основами производства электрической энергии на электрических станциях, электрическими схемами, основными закономерностями построения электроэнергетических систем, линиями электропередачи, основами электроснабжения, автоматизации и релейной защиты энергосистем, атмосферными и внутренними перенапряжениями и защитой изоляции электрооборудования.

2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

-знать основы производства, передачи, распределения электроэнергии, электроснабжения, релейной защиты и автоматизации энергосистем, виды перенапряжений и защиты изоляции электрооборудования от атмосферных и внутренних перенапряжений;

-уметь рассчитать основные характеристики электрических станций, подстанций, линий электропередачи, электрические нагрузки системы электроснабжения, основные параметры срабатывания устройств релейной защиты и автоматики, основные характеристики изоляции электрооборудования;

-иметь навыки построения электрических схем и выбора оборудования электрических станций и подстанций, схем замещения линий электропередачи, трансформаторов и автотрансформаторов, схем релейной защиты и автоматических устройств; иметь навыки расчета параметров режима электрических сетей, изоляции электроустановок и перенапряжений.

3. Объем дисциплины и виды учебной работы.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры	
Общая трудоемкость дисциплины	306	7	8
Аудиторные занятия	153	7	8
Лекции	102	7	8
Практические занятия (ПЗ)	10	7	
Лабораторные работы (ЛР)	41	7	8
Самостоятельная работа	153	7	8
Расчетно-графические работы	60	7	8
Подготовка к ЛР	93	7	8
Вид итогового контроля		Зачет Экзамен	Зачет Экзамен

4. Содержание дисциплины.

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий.

№ пп	Разделы дисциплины	Лекции	ЛР	ПЗ
1.	Производство электроэнергии, современные и перспективные источники электроэнергии, электрооборудование электростанций.	*	*	
2.	Распределительные устройства, их схемы.	*	*	
3.	Системы измерения, контроля, управления; электростанция как элемент энергосистемы.	*	*	
4.	Передача и распределение электроэнергии, линии электропередачи, понижающие и преобразовательные подстанции.	*	*	
5.	Электрические нагрузки узлов электрических сетей, расчет режимов линий электропередачи и электрических сетей.	*	*	
6.	Балансы активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.	*		*
7.	Электроснабжение, виды систем электроснабжения, типы электроприемников, режимы их работы.	*		*
8.	Методы расчета электрических нагрузок, методы достижения заданного уровня надежности систем электроснабжения.	*		*
9.	Показатели качества электроэнергии. Схемы электрических соединений в системах электроснабжения.	*		*
10.	Релейная защита и автоматизация. Типы автоматических устройств и их функции.	*	*	
11.	Релейная защита генераторов, трансформаторов, блоков генератор-трансформатор, сборных шин.	*	*	
12.	Автоматическое управление в электроэнергетических системах.	*	*	
13.	Изоляция и перенапряжения; виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения.	*	*	
14.	Молниезащита воздушных линий и распределительных устройств.	*	*	
15.	Защита изоляции электрооборудования от внутренних перенапряжений.	*		*

4.2. Содержание разделов дисциплины.

4.2.1. Производство электроэнергии, современные и перспективные источники электроэнергии, электрооборудование электростанций.

Типы электростанций и особенности их технологического режима. Электрические схемы электростанций, компоновка электростанций. Электрооборудование электростанций. Основные характеристики генераторов, трансформаторов, электродвигателей, электрических аппаратов и проводников. Выбор электрооборудования. Собственные нужды электростанций.

4.2.2. Распределительные устройства (РУ), их схемы.

Схемы РУ, область их применения, закрытые и открытые РУ. Конструктивное выполнение РУ. Заземляющие устройства. Расчет заземляющих устройств.

4.2.3. Системы измерения, контроля, управления. Электростанция как элемент энергосистемы.

Режимы работы электростанций в энергосистеме. Оптимальное распределение нагрузки между агрегатами электростанций. Резерв мощности в энергосистеме. Планирование и организация ремонтов оборудования. Автоматизация производства электроэнергии.

4.2.4. передача и распределение электроэнергии. Линии электропередачи, понижающие и преобразовательные подстанции.

Основные технические, экономические и экологические проблемы передачи электроэнергии. Линии электропередачи (ЛЭП) переменного и постоянного тока, электрические сети, понижающие и преобразовательные подстанции. Основные типы конфигураций сетей. Методы выбора конструкций и параметров оборудования ЛЭП и подстанций.

4.2.5. Электрические нагрузки узлов электрических сетей, расчет режимов ЛЭП и электрических сетей.

Статические характеристики и методы задания электрических нагрузок. Схемы замещения ЛЭП, трансформаторов, автотрансформаторов, определение их параметров. Основные уравнения, описывающие режимы ЛЭП. Расчеты режимов электрических сетей. Узловые уравнения состояния. Методы расчетов режимов сложных сетей.

4.2.6. Балансы активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.

Определение потерь электроэнергии. Определение потерь электроэнергии. Связь режимных параметров, определяющих качество электроэнергии с балансом активной и реактивной мощностей в энергосистеме и последствия нарушения этих балансов. Основные методы и способы регулирования напряжения и частоты в электроэнергетических системах.

4.2.7. Электроснабжение, виды систем электроснабжения, типы электроприемников, режимы их работы.

Системы электроснабжения (СЭС) различных объектов и их характерные особенности, СЭС как подсистема электроэнергетических систем. Характеристики электроприемников, их режимы работы. Общие методы синтеза СЭС. Иерархия сетей различных номинальных напряжений в СЭС.

4.2.8. Методы расчета электрических нагрузок, методы достижения заданного уровня надежности систем электроснабжения.

Формирование процессов электропотребления. Нагрузки элементов СЭС. Основные вероятностно-статистические модели для описания электропотребления в СЭС. Принципы формирования расчетных значений электрических нагрузок элементов СЭС. Практические приемы и методы определения характеристик и расчетных значений электрических нагрузок в СЭС различного назначения.

4.2.9. Показатели качества электроэнергии. Схемы электрических соединений в системах электроснабжения.

Влияние показателей качества напряжения на работу электроприемников и оборудования СЭС. Нормирование показателей качества напряжения, интегральные

критерии качества. Методы и средства обеспечения нормированных показателей качества напряжения. Надежность СЭС, современные методы расчета надежности, методы и средства обеспечения нормированного уровня надежности электроснабжения потребителей в СЭС. Схемы электрических соединений в СЭС. Области применения различных схем электрических соединений в СЭС.

4.2.10. Релейная защита и автоматизация, типы автоматических устройств и их функции.

Назначение устройств релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем. Соотношения электрических величин при коротких замыканиях. Устройства релейной защиты с относительной селективностью, их параметры срабатывания и принципиальные схемы применительно к линиям электропередачи. Устройства релейной защиты с абсолютной селективностью.

4.2.11. Релейная защита генераторов, трансформаторов, блоков генератор-трансформатор, сборных шин.

Повреждения и ненормальные режимы работы генераторов и трансформаторов. Основные и резервные защиты генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор. Релейная защита сборных шин электрических станций и подстанций.

4.2.12. Автоматическое управление в электроэнергетических системах.

Автоматическое повторное включение; автоматическое включение резервного источника питания: автоматическая частотная разгрузка; автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу; автоматика предотвращения нарушения устойчивости, автоматика ликвидации асинхронного режима; назначение и виды устройств телемеханики. Автоматическое регулирование параметров режима энергосистем. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных генераторов; автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности; автоматическое регулирование частоты и активной мощности; принципы построения и типы устройств автоматического регулирования.

4.2.13. Изоляция и перенапряжения. Виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения.

Виды диэлектриков, используемых в качестве изоляции. Газообразные, жидкие, твердые диэлектрики; строение диэлектриков, физические свойства и характеристики. Электрический разряд в воздухе, виды электрического разряда в газах. Источники перенапряжений.

Внешняя и внутренняя изоляция. Основные виды внутренней изоляции. Общие свойства внутренней изоляции. Электрическая прочность внутренней изоляции. Длительная и кратковременная электрическая прочность.

Общая характеристика внешней изоляции. Назначение и типы изоляторов. Электрическая прочность воздушных промежутков в однородном и неоднородном электрическом поле. Разряд в длинном промежутке. Регулирование электрических полей во внешней изоляции электроустановки. Изоляционные расстояния на опорах и в пролетах воздушных линий.

4.2.14. Молниезащита воздушных линий и распределительных устройств.

Развитие молнии. Электрические характеристики молнии. Принцип действия молниеотводов. Конструкция молниеотвода. Защитные аппараты и устройства. Общие принципы молниезащиты воздушных линий.

Электрическая прочность воздушных промежутков на подстанциях. Изоляционные расстояния в распределительных устройствах. Изоляция трансформаторов, масляных и

воздушных выключателей, вводов высокого напряжения, электрических машин. Испытания изоляции. Эксплуатация изоляции. Элегазовая изоляция. Изоляционные характеристики элегаза. Самовосстанавливающаяся изоляция. Применение элегаза в высоковольтном оборудовании. Преимущества и недостатки элегазового оборудования.

Молния как источник грозových перенапряжений. Защита подстанций от прямых ударов молнии. Параметры импульсов грозových перенапряжений, набегающих на подстанцию. Принципы защиты от внешних перенапряжений.

4.2.15. Защита изоляции электрооборудования от внутренних перенапряжений.

Источники и виды внутренних перенапряжений. Общая характеристика коммутационных перенапряжений. Перенапряжения переходного процесса при коммутациях. Ограничение коммутационных перенапряжений. Установившиеся перенапряжения в электропередачах.

Экологические аспекты электроустановок высокого напряжения.

5. Лабораторный практикум.

№ пп	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1	1	Конструкции и характеристики электрооборудования электростанций.
2	2	Схемы распределительных устройств.
3	3	Система контроля режима работы электростанции.
4	4	Конструкции воздушных и кабельных линий электропередачи.
5	5	Режимы линий электропередачи.
6	5	Режимы сети с двумя источниками питания.
7	10	Токовая ступенчатая защита линии.
8	11	Дифференциальная токовая защита трансформатора.
9	12	Автоматическое повторное включение линии.
10	12	Автоматическое регулирование возбуждения генератора.
11	13	Электрические разряды в воздухе.
12	13	Электрические разряды по поверхности твердого тела.
13	14	Защита подстанций от набегающих волн.

6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

6.1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература

1. Электрическая часть станций и подстанций. А.А. Васильев, И.П. Крючков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.
2. Электрические системы. Т.2. Электрические сети. Под ред. В.А. Веникова. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1984.
3. Козлов В.А. Электроснабжение городов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
5. Автоматизация электроэнергетических систем/ О.А. Алексеев, В.Л. Козис, В.В. Кривенков и др.; Под ред. В.П. Морозкина и Д.Энгелаге. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 448 с.
6. Электрофизические основы техники высоких напряжений/ И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др.: Под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

2. Рабочая программа дисциплины

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»
(ГОУВПО «АмГУ»)

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УНР

Е.С. Астапова

" ____ " _____ 2006 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «Электроэнергетика»

для специальности:

140204 – «Электрические станции»

140205 – «Электроэнергетические системы и сети»

140211 – «Электроснабжение»

140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Курс 3,4	Очное обучение			Заочное обучение			Сокращенное обучение	
	5	6	7	7	8	9	4	7
Семестр								
Лекции (час)	72	36	48	22	10	16	26	12
Практические занятия	36	18		12	4	-	6	4
Лабораторные работы	-	-	16	-	-	6		
Самостоятельная работа	44	36	30	118	76	72	139	74
Экзамен	*		*	*	*	*	*	
Зачет				*	*		*	*
ВСЕГО часов	152	90	94	152	90	94	171	90

Составители:

Савина Н.В., зав. каф., проф., доц.

Ротачева А.Г., доц.- раздел «Производство электроэнергии».

Судаков Г.В., к.э.н., доц.- раздел «Электроснабжение»

Факультет Энергетический

Кафедра Энергетики

2006 г.

Рабочая программа составлена на основании *Государственного образовательного стандарта ВПО по направлению подготовки дипломированного специалиста 650900 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА и типовых программ по специальностям 140204, 140205, 140211, 140203.*

2.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Государственный образовательный стандарт подготовки дипломированного специалиста по направлению «Электроэнергетика» включает изучение дисциплины «Электроэнергетика» (ОПД.Ф.08). Данная дисциплина является базовой при подготовке инженеров по специальностям: «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

2.1.1. Цель преподавания дисциплины.

Предметом изучения дисциплины «Электроэнергетика» является электроэнергетическая система. Данная дисциплина является первой в общем цикле дисциплин, по изучению основ производства, передачи и распределения, потребления электроэнергии и условий надежной эксплуатации. Она включает следующие разделы:

- Производство электроэнергии;
- Передача и распределение электроэнергии;
- Электроснабжение;
- Релейная защита и автоматизация;
- Изоляция и перенапряжения.

Целью дисциплины является изучение принципов построения электроэнергетических систем, производства электроэнергии, видов и типов электростанций, схем электрических станций и подстанций, конструктивных особенностей линий электропередачи, методов расчета режимов, условий выполнения балансов мощности, особенностей систем электроснабжения различных объектов, общих сведений о релейной защите и автоматизации, изоляции и перенапряжений.

Основой для изучения дисциплины являются следующие: Физика, Высшая математика, ТОЭ, Электроматериаловедение. В свою очередь она является базовой для освоения предметов «Электроэнергетические системы и сети», «Электропитающие системы и сети», «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения», «Электрическая часть электростанций и подстанций», «Системы электроснабжения», «Изоляция и перенапряжения», «Эксплуатация электроэнергетических систем» и т.д., т.е. практически всех специальных дисциплин Федерального компонента стандарта.

2.1.2. Задачи изучения дисциплины.

Задачей изучения дисциплины является подготовка дипломированных специалистов по направлению «Электроэнергетика» к проектированию и эксплуатации электроэнергетических систем, электрических станций, систем электроснабжения, выработка компетентного подхода к решению задач, возникающих в области электроэнергетики, на основе системного анализа.

В результате изучения дисциплины в соответствии с квалификационной характеристикой выпускников, студенты должны **знать**:

- современные и перспективные источники электроэнергии;
- типы электростанций и особенности их технологического режима;
- электрические схемы станций и подстанций;

электрооборудование электростанций;
основы заземления электрических сетей;
резерв мощности;
общие сведения об электроэнергетических системах;
линии электропередачи переменного и постоянного тока;
конструкцию линий электропередачи;
конфигурацию электрических сетей;
схемы замещения линий и трансформаторов;
методы расчета установившихся режимов;
балансы активной мощности и ее связь с частотой;
балансы реактивной мощности и ее связь с напряжением;
особенности систем электроснабжения предприятий, городов, объектов сельского пользования;
теоретические основы проектирования систем электроснабжения;
технические параметры систем электроснабжения;
методы расчета электрических нагрузок;
конструкцию, конфигурацию и исполнение электрических систем электроснабжения;
условия выбора параметров систем электроснабжения, схемы электроснабжения, режимы нейтрали;
виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения электрических станций и подстанций, воздушных и кабельных линий электропередачи;
условия работы изоляции при длительном воздействии рабочего напряжения.

Уметь:

выбирать источники электроэнергии, применять типовые схемы распределительных устройств;
использовать принципы технологического процесса производства электроэнергии на различных типах электроустановок, включая нетрадиционные источники энергии;
разрабатывать и анализировать электрические схемы станций и подстанций;
выбирать оборудование собственных нужд электростанций и их схемы;
классифицировать электрические сети;
составлять схемы замещения и определять их параметры для разомкнутых разветвленных и простых замкнутых сетей различной конфигурации;
рассчитывать нормальные и послеаварийные режимы сетей различных конфигураций нескольких уровней номинального напряжения;
выбирать номера ответвлений РПН и ПБВ силовых трансформаторов и автотрансформаторов;
составлять и обеспечивать балансы активной и реактивной мощностей;
анализировать рабочие режимы энергосистемы;
классифицировать электроприемники;
рассчитывать электрические нагрузки;
выбирать параметры основного оборудования в системах электроснабжения;
выбирать режимы нейтрали;
осуществлять компенсацию емкостных токов замыкания на землю;
выбирать типы электроустановок;
самостоятельно разрабатывать эффективные проектные решения в области электроэнергетики;
применять ресурсосберегающие технологии;
анализировать условия работы изоляции электроустановок и линий электропередач различных классов напряжения;
анализировать и определять характеристики физических процессов, протекающих во внешней и внутренней изоляции под воздействием высоких напряжений, оценивать их влияние на надежность электропередачи и электроустановок;

выбирать изоляцию;

эксплуатировать внешнюю и внутреннюю изоляцию линий электропередачи и электроустановок при любых условиях работы энергосистемы;

закреплять полученные теоретические навыки при выполнении курсовых и дипломных проектов.

иметь навыки построения изображений технических изделий, оформления чертежей и электрических схем и составления спецификаций; составления электрических схем основных типов электроустановок и расчетов их базовых энергетических показателей; выбора простейших схем электрических соединений электрических станций, проектирования изоляции электроустановок, систем электроснабжения, разработки и реализации оптимальных технических решений в области электроэнергетики.

2.1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо при изучении данной дисциплины.

Дисциплина базируется на усвоении студентами следующих курсов:

Математика: алгебра, решение систем алгебраических уравнений, дифференциальные и интегральные исчисления, графы, теория функций комплексного переменного, вероятность и статистика.

Физика: электричество и магнетизм, явления сверхпроводимости, полупроводники, принципы неопределенности.

Теоретические основы электротехники: уравнения электромагнитного поля, законы электрических цепей; трехфазные цепи; теория электромагнитного поля, поверхностный эффект и эффект близости; электромагнитное экранирование.

Электромеханика: типы электрических машин, трансформаторы, автотрансформаторы, их режимы работы, конструкции.

Материаловедение: диэлектрики и их пробы, электроизоляционные материалы, проводники.

2.2. Содержание дисциплины

2.2.1. Федеральный компонент

ОПД.Ф.08 электроэнергетика – 306 ч.

Производство электроэнергии

современные и перспективные источники электроэнергии; электрические схемы, электрооборудование электростанций, собственные нужды и их схемы; распределительные устройства, их схемы; заземление электрических сетей; системы измерения, контроля, сигнализации и управления напряжением и частотой; резерв мощности; автоматизация процесса производства электроэнергии на электростанциях; ремонт оборудования;

Передача и распределение электроэнергии

общие сведения об электроэнергетических системах; линии электропередачи переменного и постоянного тока; понижающие и преобразовательные подстанции; характеристики оборудования линий и подстанций; типы конфигураций электрических сетей; электрические нагрузки узлов электрических сетей; схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов; расчет режимов линий электропередачи и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах; балансы активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии; регулирование напряжения и частоты в электроэнергетической системе;

Электроснабжение

особенности систем электроснабжения городов, промышленных предприятий, объектов сельского хозяйства и транспортных систем; типы электроприемников, режимы их работы; методы расчета электрических нагрузок; методы достижения заданного уровня надежности оборудования, систем электроснабжения; условия выбора параметров основного оборудования в системах электроснабжения различного назначения; режимы нейтрали; типы энергоустановок, экономика электроснабжения; накопители энергии; ресурсосберегающие технологии. Нормативные показатели качества электроэнергии; технические, социально-экономические и экологические требования, предъявляемые к системам электроснабжения;

Релейная защита и автоматизация

типы автоматических устройств релейной защиты и их функций; повреждения и ненормальные режимы; защита синхронных генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор, защита сборных шин станций и подстанций; автоматическое включение резервного питания; автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу; автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности, частоты и активной мощности; противоаварийная автоматика, автоматический контроль и телемеханика в энергосистемах.

Изоляция

виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения; изоляция воздушных линий электропередачи; изоляция электрооборудования станций и подстанций, закрытых и открытых распределительных устройств; элегазовая изоляция.

Примечания:

Для более глубокого изучения раздел «Релейная защита и автоматика» полностью вынесен в изучение дисциплин «Релейная защита и автоматика» для специальностей 140204, 140205, «Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения» для специальности 140211 и «Релейная защита электроэнергетических систем» для специальности 140206.

Подраздел «Перенапряжения» полностью вынесен в изучение дисциплины «Изоляция и перенапряжения», а в разделе «Изоляция» данной дисциплины даются базовые (основные) сведения без их углубленной проработки.

2.2.2. Наименование тем, их содержание и объем в часах

Производство электроэнергии – 18 часов

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения об электрических станциях. (2 часа).

Тема 2. Производство электрической энергии (6 часов).

Виды, назначения, воздействия на окружающую среду ГЭК, ГАЭС, ТЭС. Возобновляемые источники энергии, виды, назначения, условия использования. Графики нагрузки энергосистемы: заполнения суточного графика нагрузки. Электроприемники и их категории.

Тема 3. Электрические системы электрических станций и их оборудования (10 часов).

Электрические схемы эл.станций; электрооборудование эл.станций; собственные нужды эл.станций и их схемы; распределительные устройства и их схемы; заземление эл.сетей; система измерения, контроля, сигнализации и управления; автоматизация процесса производства электроэнергии на электростанциях; схемы РУ, область их применения, закрытые и открытые РУ; конструктивное выполнение РУ; заземляющие устройства; расчет заземляющих устройств.

Передача и распределение электроэнергии – 54 часа

Тема 1. Общие сведения об энергетических системах. (6 час.)

Современное состояние энергетики и тенденции ее развития. Топливо-энергетический комплекс. Перспективы развития электроэнергетики на Дальнем Востоке. Определение электроэнергетической системы, электрической станции, электрической сети, подстанции, линии электропередачи. Классификация электрических сетей. Линии электропередачи переменного и постоянного тока. Понижающие и преобразовательные подстанции. Характеристики оборудования линий и подстанций. Типы конфигураций электрических сетей.

Тема 2. Конструкция линий электрических сетей. (8 час.)

Конструктивные элементы воздушных линий электропередачи (ЛЭП).

Провода ВЛ и их тросы. Опоры: их классификация и конструкция, область применения, линейная арматура; изоляторы.

Конструктивные элементы кабельных линий электропередачи. Классификация кабельных линий, принципы формирования марки кабеля, маркировка кабелей, конструктивное исполнение кабелей различного уровня номинального напряжения, их область применения. Кабельная арматура. Прокладка кабелей.

Тема 3. Схемы замещения линий, трансформаторов, автотрансформаторов. (6 час.)

Схемы замещения линий с сосредоточенными параметрами. Определение параметров схемы замещения ВЛ, КЛ. Схемы замещения двух- обмоточных, трехобмоточных, трансформаторов, трансформаторов с расщепленными обмотками, автотрансформаторов и расчет их параметров.

Тема 4. Модели электрических нагрузок узлов электрических сетей при расчетах режимов. (4 час.)

Статические и динамические характеристики нагрузок, понятие и физическая сущность, Статические характеристики осветительной нагрузки двигателей. Понятие комплексной нагрузки узла. Статические характеристики комплексной нагрузки по напряжению и частоте. Регулируемый эффект нагрузки. Способы задания нагрузки при расчетах режимов.

Тема 5. Схемы электрических сетей. (4 час.)

Разомкнутые сети. Замкнутые сети: кольцевые сети и сети с двухсторонним питанием. Схемы соединения эл. сети. Способы присоединения подстанций к эл. сети. Схемы эл. соединений подстанций.

Тема 6. Расчет режимов разомкнутых эл. сетей (6 час.)

Приведенная и расчетная нагрузка узла. Потери мощности в двух- обмоточном, трехобмоточном трансформаторах, в автотрансформаторе. Падение и потеря напряжения. Расчет режим эл. сети по данным «конца» и по данным «начала» при заданном токе нагрузки или мощности нагрузки. Построение векторных диаграмм при расчете режимов.

Тема 7. Расчет режимов в замкнутых эл. сетях (6 час.)

Определение потоков мощности на головных участках в простых замкнутых сетях. Точка потокораздела. Расчет режимов кольцевых сетей. Расчет сети с двумя точками потокораздела. Расчет режимов сети с двух сторонним питанием.

Тема 8. Расчет режимов в эл. сетях нескольких номинальных напряжений (4 часа)

Определение напряжения на стороне низшего напряжения трансформатора. Расчет режимов сети с различными номинальными напряжениями. Порядок расчета режима сети любой конфигурации. Регулирование напряжения с помощью ответвлений РПН трансформаторов и линейных регуляторов.

Тема 9. Особенности расчета режимов (4 час.)

Расщепление сети. Расчет режима в однородных сетях. Особенности расчета сетей с равномерно распределенной нагрузкой. Определение наибольшей потери напряжения.

Тема 10. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме. (6 час.)

Баланс активной мощности и связь ее с частотой. Резерв мощности. Регулирование частоты вращения турбины. Статическая и динамическая характеристики турбины. Регулирование частоты в системе. Баланс реактивной мощности и его связь с напряжением потребления реактивной мощности. Генерация реактивной мощности. Регулирование напряжения в ЭЭС.

Электроснабжение – 36 часов

Тема 1. Основные сведения о системах электроснабжения (2 часа)

Основные термины и определения: электрическая станция, энергетическая система, подстанция (ПС), распределительное устройство (РУ), распределительный пункт (РП), трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ (ТП), центр питания (ЦП), глубокий ввод, опорная подстанция, питающая линия, распределительная линия, потребитель электрической энергии, приемником электрической энергии (ЭП).

Электрические сети: напряжение, род тока, назначение, конструктивное исполнение. Параметры электроэнергетических систем: нормальный, переходный и послеаварийный режимы. Типы электроприемников, режимы их работы. Категорийность городских, сельских и промышленных потребителей: первая и нулевая, вторая и третья категории. Структура потребителей: промышленные и приравненные к ним, производственные сельскохозяйственные, бытовые, общественно-коммунальные. Управление электроэнергетическими системами: параметры энергосистемы, требования, предъявляемые к ее работе. Организационные взаимоотношения между энергосистемой и потребителями: юридически-правовые, технико-экономические, оперативно-диспетчерские.

Тема 2. Характеристики графиков нагрузки элементов систем электроснабжения (2 часа).

Понятие электрической нагрузки и графика электрической нагрузки. Режимы работы электроприемников: длительный, кратковременный и повторно-кратковременный. Типы длительных режимов работы электроприемников: периодические, циклические, нециклические, нерегулярные. Продолжительность включения, цикличность работы электроприемника. Паспортная и номинальная мощности электроприемников.

Индивидуальные и групповые графики нагрузок. Типовой график электрической нагрузки. Упорядоченная диаграмма. Описание электрической нагрузки случайным процессом, параметры графика: математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение коэффициент корреляции. Показатели графиков нагрузки (активной, реактивной и токовой): коэффициент использования, коэффициент включения, коэффициент загрузки, коэффициент формы, коэффициент заполнения, коэффициент энергоиспользования, коэффициент одновременности максимумов нагрузки. Понятие максимума нагрузки (получасовой суточный пик).

Тема 3. Системы электроснабжения городов, сельскохозяйственных и промышленных потребителей, принципы их формирования и задачи проектирования (2 часа).

Источники питания городской нагрузки. Экономически целесообразные классы напряжений городской нагрузки. Структурная схема электропитания города: подстанции глубокого ввода (ПГВ), узловая распределительная подстанция (УРП); питающие и распределительные электрические сети средних номинальных напряжений 10(6)—20 кВ, распределительные пункты (РП) данных напряжений и трансформаторные подстанции (ТП) 10(6)—20/0,38 кВ; внешние и внутренние сети напряжением до 1 кВ жилых, общественных и производственных зданий; электроприемники (ЭП) всех технологических типов потребителей, расположенных на территориях городов, принципы построения двух-трех уровневых схем электроснабжения.

Особенности исполнения систем электроснабжения промышленных предприятий. Внешнее электроснабжение промышленной нагрузки: главные понизительные подстанции

(ГПП) и ПГВ промышленных предприятий 35 кВ, распределительные подстанции (РП) 6-10-20 кВ, воздушные и кабельные линии 35 кВ и выше. Внутреннее электроснабжение промышленной нагрузки: трансформаторные подстанции (ТП) 6-10-20/0,4 кВ, токопроводы на напряжение выше 1 кВ, кабельные сети на напряжение 6-10-20 кВ, и цеховые кабельные сети до 1 кВ, распределительные и магистральные шинопроводы.

Особенности исполнения систем электроснабжения сельских потребителей: рассредоточенная низковольтная нагрузка, невысокие токи короткого замыкания, сезонные и суточные колебания нагрузки, низкая доля потребителей с высокими требованиями к надежности электроснабжения, преимущественное исполнение сетей ВЛ и линиями с самонесущими изолированными проводами. Основная система распределения электроэнергии в сельском хозяйстве - трехступенчатая 110/35/10/0,4 кВ с двухступенчатыми подсистемами 110/10/0,4 кВ и 35/10/0,4 кВ.

Тема 4. Схемы городских электрических сетей (2 часа).

Требования к выполнению и выбору схем электрических сетей: экономическая целесообразность, обоснованная надежность, качество напряжения, восприимчивость к развитию потребителей и сетей и т.п. Схемы электроснабжения от собственной электростанции 20-35 кВ, и от электрической системы на напряжение 3-20 кВ и 35-220 кВ.

Схемы электроснабжения на напряжение 6-10 кВ: радиальная, магистральная (одиночная, двойная, с резервированием по низкому напряжению, с применением токопроводов), смешанная (магистральная с двухсторонним питанием, петлевая 6-10 кВ и петлевая 6-10 кВ с резервированием на стороне НН). Повышение надежности электроснабжения петлевой сети путем установки АВР на секционный выключатель.

Схемы городских электрических сетей до 1 кВ: радиальная, магистральная и петлевая схемы. Особенность исполнения схемы питания жилого дома, жилого дома высотой более 16 этажей (радиальная петлевая схема), секционированного жилого дома и крупных коммунальных объектов (радиальная схема с тремя питающими кабелями). Вводное распределительное устройство (ВРУ).

Тема 5. Схемы сельских электрических сетей и сетей промышленных предприятий (2 часа).

Схемы цеховых электрических сетей до 1 кВ: магистральные, получающие питание от главной магистрали или от комплектной трансформаторной подстанции (КТП); радиальные схемы для питания электроприемников на номинальный ток более 400 А; смешанные схемы с резервированием, сочетающие свойства радиальных и магистральных сетей.

Особенности исполнения сельских электрических сетей 10 кВ: воздушные или линии с самонесущими изолированными проводами - взаиморезервирующие магистрали с ответвлениями, радиальные воздушные линии. Особенности исполнения сельских электрических сетей до 1 кВ: радиальная и магистральная схемы с использованием ВЛ и самонесущих изолированных проводов.

Тема 6. Конструкция и способы прокладки кабельных линий. Токопроводы, шинопроводы, электропроводки, троллеи. Самонесущий изолированный провод. (2 часа).

Назначение кабеля. Изоляция жил кабеля. Маркировка кабеля. Способы прокладки вне помещений: в траншеях, каналах, туннелях, блоках, эстакадах. Способы прокладки внутри сооружений и производственных помещений: на настенных конструкциях, лотках, в коробах, укрепленных на стенах. Назначение токопровода. Диапазон мощностей и длин, при которых выгодно применение токопроводов. Исполнение токопроводов: открытые, защищенные и закрытые. Типы токопроводов: жесткие и гибкие.

Назначение комплектного шинопровода. Кратность длин секций шинопроводов числу 770 мм. Магистральные (ШРМ) и распределительные шинопроводы (ШРА). Шинопроводы различающиеся по типу нагрузки: осветительные и силовые. Крановые и троллейные шинопроводы. Ряд номинальных токов и напряжения шинопроводов. Исполнение шинопроводов. Троллейные шинопроводы (ШТМ), комплектные троллейные шинопроводы (ШТА). Осветительные шинопроводы (ШОС).

Электропроводка назначение и область применения. Маркировка электропроводок. Электропроводка внутри зданий: открытая и скрытая. Наружная электропроводка.

Назначение самонесущего изолированного провода (СИП). Изоляция СИП: термопластичный или сшитый полиэтилен. Маркировка СИП. Преимущества СИП по сравнению с ВЛ: высокая надежность, хорошая защищенность от повреждений, низкая стоимость, и пр.

Тема 7. Конструктивное исполнение трансформаторных и распределительных подстанций (2 часа).

Принципы компоновки трансформаторных подстанций выше 1 кВ: безопасное обслуживание оборудования установки; удобное наблюдение за указателями положения выключателей и разъединителей, уровнем масла в трансформаторах и аппаратах; необходимую степень локализации повреждений при нарушении нормальных условий работы установки; безопасный осмотр, смену и ремонт аппаратов; необходимую механическую стойкость опорных конструкций электрооборудования; транспортировку оборудования; максимальную экономию площади подстанции.

Комплектные распределительные устройства напряжением выше 1 кВ. По конструктивному исполнению РУ: закрытые (ЗРУ) - с размещением электрооборудования в зданиях; наружными - открытыми (ОРУ) - с установкой электрооборудования на открытом воздухе. Комплектное распределительное устройство выкатное (КРУ и стационарное (КСО). Комплектное распределительное устройство наружной установки (КРУН). Комплектная трансформаторная подстанция (КТП - для внутренней и КТПН - для наружной установки). По месту нахождения на территории объекта различают подстанции: отдельно стоящие на расстоянии от зданий; пристроенные; встроенные; внутрицеховые. Комплектные распределительные устройства напряжением до 1 кВ: распределительные щиты; пункты и шкафы силовые; щиты станций управления.

Тема 8. Расчетные электрические нагрузки промышленных предприятий (4 часа).

Описание процесса нагрева элемента при протекании электрического тока. Понятие расчетной электрической нагрузки. Время нагрева проводника - 3 т. Упрощенные методы расчета электрических нагрузок. Расчет однофазных электрических нагрузок. Приведение однофазной активной и реактивной нагрузки к трехфазной. Метод расчета электрических нагрузки промышленного предприятия по коэффициенту расчетной активной мощности. Эффективное число электроприемников. Средняя максимальная мощность за наиболее загруженную смену. Коэффициент расчетной активной нагрузки K_p , Полная расчетная мощность силовой нагрузки. Расчетная нагрузка электрического освещения.

Тема 9. Расчетные электрические нагрузки электрических городских и сельских сетей (2 часа).

Расчет электрических нагрузок жилых зданий: удельная расчетная нагрузка квартир, коттеджей городского типа, расчетная нагрузка лифтовых и санитарно-технических устройств; расчетная нагрузка жилых домов. Определение расчетной нагрузки общественных зданий. Расчетные нагрузки распределительных городских сетей до 1 кВ. Коэффициенты совмещения максимумов нагрузки: трансформаторов; городских сетей и промышленных предприятий. Расчетные электрические нагрузки городских сетей на шинах 6-20 кВ. Расчетные электрические нагрузки сельских потребителей до 1 кВ: коммунально-бытовых и производственных потребителей Коэффициенты одновременности в сетях 6-20 кВ. Расчетные электрические нагрузки сельских сетей на шинах 6-20 кВ. Коэффициенты сезонности и роста нагрузки. Коэффициенты мощности ТП 10/0,4 кВ.

Тема 10. Определение центра электрических нагрузок. Выбор места расположения ГПП или ПГВ. Выбор трансформаторов подстанций системы внешнего электроснабжения (2 часа).

Генеральный план предприятия. Картограмма нагрузок. Центр электрических нагрузок. Зона рассеяния электрических нагрузок: эллипс рассеяния. Тензорный метод расчета центра электрических нагрузок и зоны рассеяния. Вероятностно-статистический

метод определения зоны рассеяния. Определения зон увеличения приведенных годовых затрат при смещении подстанции из зоны рассеяния. Исполнение трансформаторов: масляные, совтоловые и сухие трансформаторы. Маркировка. Основные параметры: мощность и напряжение. Допустимые систематические и аварийные перегрузки трансформаторов. Коэффициент загрузки и систематической перегрузки трансформатора. Выбор трансформаторов ГПП (ПГВ). Технико-экономическое обоснование выбора трансформаторов ГПП (ПГВ).

Тема 11. Выбор числа и мощности цеховых подстанций. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения (4 часа).

Число трансформаторов при практически полной компенсации в сети с напряжением до 1 кВ и при отсутствии компенсации в сети до 1 кВ. Определение мощности конденсаторов до и выше 1 кВ. Выбор числа цеховых трансформаторов по приведенным затратам в трансформаторы и установки компенсации и по потерям активной мощности. Баланс реактивных мощностей. Потребители реактивной мощности. Источники реактивной мощности: синхронные двигатели 6-10 кВ, силовые конденсаторы. Основные положения по размещению компенсирующих устройств в системах электроснабжения. Регулирование мощности компенсирующих устройств, базовая и регулируемая ступени конденсаторных батарей. Компенсация реактивных параметров передачи.

Тема 12. Выбор проводников выше 1 кв. выбор электрооборудования на напряжение до 1 кВ (2 часа).

Выбор проводников напряжением выше 1 кВ. Выбор воздушных линий по токовым интервалам и проверка по послеаварийной перегрузке. Выбор сечения и марки кабеля. Допустимая длительная нагрузка кабеля напряжением 6-35 кВ. Поправочные коэффициенты на число параллельных кабелей, вид прокладки и температуру окружающей среды. Проверка сечения по термической стойкости к токам короткого замыкания. Проверка кабеля по допустимому потере напряжения при длинен выше 1 км. Расчет токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ. Выбор сечений проводов и кабелей до 1 кВ с учетом выбора защиты: по условию нагрева длительным током, по соответствию выбранному аппарату защиты. Выбор шинпроводов: по номинальному напряжению и максимальному рабочему току. Выбор автоматических выключателей: по номинальному напряжению, номинальному току, пиковому ток и рабочему максимальному току, проверка по току срабатывания на ток однофазного короткого замыкания. Ток срабатывания электромагнитного и теплового расцепителя. Выбор предохранителей: по номинальному напряжению, рабочему максимальному и номинальному току, пусковому току двигателя.

Тема 13. Режимы работы нейтрали в системах электроснабжения. Качество электроэнергии (2 часа).

Глухозаземленная, изолированная и компенсированная нейтраль. Режим работы нейтрали в установках напряжением выше 1 кВ и в установках напряжением до 1 кВ.

Тема 14. Экономика электроснабжения. (2 часа).

Цель технико-экономических расчетов. Требования, предъявляемые к технико-экономическим расчетам: сопоставимость цен, выборка наиболее значимых показателей, влияющих на конечный результат расчетов. Соответствие вариантов схем электроснабжения нормативным актам и отраслевым документам. Укрупненные показатели стоимости оборудования и сооружений. Расчет капиталовложений. Эксплуатационные издержки. Амортизационные отчисления. Жизненный цикл проекта. Простые и дисконтированные методы оценки экономической эффективности. Простая норма прибыли. Простой срок окупаемости. Чистый дисконтированный доход. Дисконтированный срок окупаемости. Приведенные затраты.

Тема 15. Нормативные показатели качества электроэнергии (2 часа).

Назначение заземления. Заземляющее устройство. Заземлитель: естественный и искусственный. Контур заземления. Сопротивление заземления. Сопротивление грунта.

Сопrotивление растеканию вертикального электрода. Термическая стойкость заземляющих проводников.

Показатели качества электроэнергии: установившееся отклонение напряжения; размах изменения напряжения; доза фликера (мерцания – субъективное восприятие человеком колебаний); коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения; коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжений; коэффициент не симметрии напряжения по обратной последовательности; коэффициент не симметрии напряжения по нулевой последовательности; отклонение частоты; длительность провала напряжения; импульсное напряжение; коэффициент временного перенапряжения.

Тема 16. Релейная защита и автоматизация (2 часа).

Назначение релейной защиты и автоматики. Основные требования, предъявляемые к релейной защите и автоматике в системах электроснабжения: селективность, чувствительность, быстродействие. Основные виды защит: токовые, защиты напряжения, направленные токовые защиты, дистанционные защиты, дифференциальные и высокочастотные защиты. Параметры релейной защиты: ток срабатывания защит и реле, коэффициент схемы, коэффициент возврата, коэффициент надежности, коэффициент чувствительности. Автоматические и телемеханические системы контроля и управления. Защита плавкими предохранителями и автоматическими выключателями. Карта селективности.

Тема 17. Конструктивное исполнение трансформаторных и распределительных подстанций (2 часа).

Принципы компоновки трансформаторных подстанций выше 1 кВ: безопасное обслуживание оборудования установки; удобное наблюдение за указателями положения выключателей и разъединителей, уровнем масла в трансформаторах и аппаратах; необходимую степень локализации повреждений при нарушении нормальных условий работы установки; безопасный осмотр, смену и ремонт аппаратов; необходимую механическую стойкость опорных конструкций электрооборудования; транспортировку оборудования; максимальную экономию площади подстанции. Комплектные распределительные устройства напряжением выше 1кВ. По конструктивному исполнению РУ: закрытые (ЗРУ) - с размещением электрооборудования в зданиях; наружными - открытыми (ОРУ) - с установкой электрооборудования на открытом воздухе. Комплектное распределительное устройство выкатное (КРУ и стационарное (КСО). Комплектное распределительное устройство наружной установки (КРУН). Комплектная трансформаторная подстанция (КТП - для внутренней и КТПН - для наружной установки). По месту нахождения на территории объекта различают подстанции: отдельно стоящие на расстоянии от зданий; пристроенные; встроенные; внутрицеховые. Комплектные распределительные устройства напряжением до 1 кВ: распределительные щиты; пункты и шкафы силовые; щиты станций управления.

Изоляция – 48 часов

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения. (4 часа).

Предмет и задачи дисциплины. Виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения и воздушных линий электропередачи, условия ее работы. Требования к изоляции и классификация электрической изоляции. Напряжения, действующие на изоляцию. Общие сведения о перенапряжениях, возникающих в электроустановках, в электрических системах, их характеристики. Проблемы изоляции в современной электроэнергетике.

Тема 2. Общая характеристика внешней изоляции (4 часа).

Особенности внешней изоляции. Атмосферный воздух как диэлектрик. Классификация воздушных изоляционных промежутков. Назначение и типы изоляторов. Конструкция изоляторов. Виды, типовые элементы и условия испытаний внешней изоляции.

Тема 3. Разряды в воздушных промежутках (6 часа)

Разряд в однородном поле. Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем. Закон Пашена. Слабонеоднородные и резконеоднородные поля. Развитие разряда и начальные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем. Эффект полярности электродов. Разряды в длинных воздушных промежутках. Время разряда и его структура. Вольт-секундные характеристики изоляции и их значение.

Тема 4. Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов (6 часа)

Поверхностный разряд в резконеоднородном поле при преобладании:

а) тангенциальной составляющей напряженности; б) нормальной составляющей напряженности. Разряд вдоль поверхности в однородном поле. Влияние конструктивных особенностей изоляторов на напряжение перекрытия. Развитие разряда и напряжения перекрытия изоляторов при неблагоприятных атмосферных воздействиях, их учет при определении разрядных и испытательных напряжений. Коронный разряд, импульсная корона. Регулирование электрических полей во внешней изоляции за счет экранов, барьеров и принудительного распределения напряжения в изоляционных конструкциях.

Тема 5. Общие свойства внутренней изоляции (4 часа)

Внутренняя изоляция электроустановок, ее общие характеристики, основные виды и принципы использования. Зависимость электрической прочности изоляции от длительности воздействия напряжения. Кратковременная и длительная электрическая прочность изоляции. Закономерности старения изоляции, характеристики частичных разрядов. Самовосстанавливающаяся и несамовосстанавливающаяся изоляция. Краткая характеристика пробоев жидких и твердых диэлектриков.

Тема 6. Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности (10 часов)

Комбинирование диэлектрических материалов во внутренней изоляции. Маслобарьерная изоляция. Роль барьеров в повышении электрической прочности изоляции. Твердая изоляция. Бумажно-масляная изоляция. Вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция. Газовая изоляция. Регулирование электрических полей во внутренней изоляции с помощью барьеров, градирование изоляции, Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий. Допустимые напряжения на внутренней изоляции.

Тема 7. Изоляция устройств высокого напряжения (10 часов)

Изоляция кабельных линий высокого напряжения. Общие принципы выполнения и конструкции кабельной изоляции. Кабели с вязкой пропиткой. Маслонаполненные кабели. Газонаполненные и газоизолированные кабели, кабели с элегазовой изоляцией. Кабели с пластмассовой изоляцией. Кабельные муфты. Испытания изоляции кабелей. Изоляция силовых трансформаторов. Классификация и особенности изоляции. Конструкция изоляции трансформаторов. Изоляция электрооборудования распределительных устройств. Изоляция трансформаторов тока, ее конструкция, испытания. Изоляция выключателей (масляных, воздушных, элегазовых, вакуумных), ее испытания. Изоляция герметизированных распределительных устройств (на основе элегаза). Конструкция ячеек ГРУ, КРУЭ, их монтаж и эксплуатация. Изоляция вводов высокого напряжения, конструктивные особенности и профилактические испытания. Изоляция силовых конденсаторов, ее конструкция, испытания. Изоляция электрических машин высокого напряжения, ее конструкция и испытания. Волновые процессы в обмотках электрических машин.

Тема 8. Изоляция воздушных линий электропередачи. (4 часа).

Разрядные напряжения воздушных промежутков, характерных для линий электропередачи. Выбор линейной изоляции. Статистический метод выбора изоляции для нестандартных ВЛ. Методика выбора длины воздушного промежутка. Выбор промежутка провоз-земля или провод-транспорт. Экологическое влияние ВЛ и РУ подстанций и станций.

2.2.3. Практические занятия

Раздел «Производство электроэнергии» (18 часов – 5 семестр).

Цель проведения практических занятий – научить студентов выбирать и анализировать схемы станций и подстанций.

№	Наименование темы	К-во часов
1.	Технологическая и структурная схема ТЭЦ	2
2.	Технологическая и структурная схема КЭС ГЭС и АЭС	2
3.	Выбор силовых трансформаторов (автотрансформаторов) электростанций и подстанций	4
4	Схемы распределительных устройств 35-750 кВ	6
5.	Схемы собственных нужд электростанций и подстанций	4

Раздел «Передача и распределение электроэнергии» (18 часов – 5 семестр)

Цель проведения практических занятий – научить студентов рассчитывать режимы в эл. сетях. Практические занятия проводятся по учебному пособию /3/, где приведена краткая теория по теме, примеры решения задач с привлечением пакета программ «Mathcad» и задачи для самостоятельного решения.

№	Наименование темы	К-во часов
1.	Расчет параметров электрических схем замещения ЛЭП	2
2.	Расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов	2
3.	Составление схем замещения эл. сети. Определение приведенной и расчетной нагрузки узла.	2
4.	Расчет режимов в разомкнутых сетях	2
5.	Расчет режимов в кольцевых сетях	2
6.	Расчет режимов в сетях с двухсторонним питанием	2
7.	Выбор ответвлений РПН трансформаторов, автотрансформаторов, линейных регуляторов	2
8.	Расчет режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями	2
9.	Обзор задач по всем темам за семестр	2

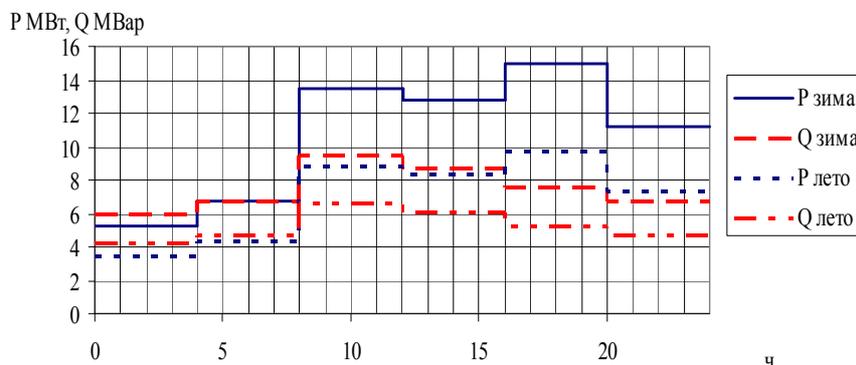
Раздел «Электроснабжение» (18 часов – 6 семестр).

Тема 1. Графики электрических нагрузок

Показатели графиков нагрузки (активной, реактивно и токовой): коэффициент использования, коэффициент включения, коэффициент загрузки, коэффициент формы, коэффициент заполнения, коэффициент энергоиспользования, коэффициент одновременности максимумов нагрузки. Понятие максимума нагрузки (получасовой суточный пик).

Контрольное задание. Требуется по предложенному преподавателем графику нагрузки определить: коэффициент использования, коэффициент включения, коэффициент загрузки, коэффициент формы, коэффициент заполнения, коэффициент энергоиспользования.

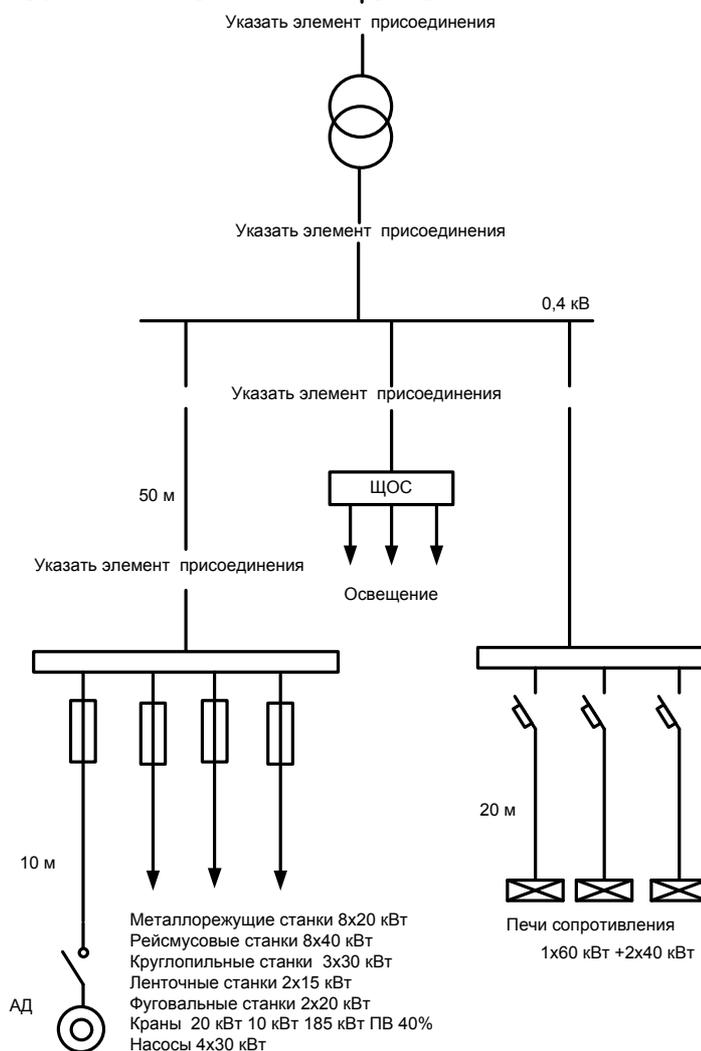
Суточные графики, ПС потребитель: Город



Тема 2. Расчет однофазных электрических нагрузок.

1. Распределение нагрузки по фазам.
2. Расчет средней активной и реактивной мощности наиболее нагруженной фазы.
3. Коэффициенты приведения.
4. Расчетные нагрузки трехфазной электрической сети полученные путем приведения однофазной нагрузки к трехфазной.

Контрольное задание. Для однофазных электроприемников требуется по предложенному преподавателем нижеследующему рисунку определить расчетную электрическую нагрузку группы однофазных электроприемников.



Тема 3. Расчетная электрическая нагрузка цеха.

1. Выбор коэффициентов использования
2. Ранжирование электроприемников по характерным категориям
3. Расчет средней электрической нагрузки за наиболее загруженную смену.
4. Определение коэффициентов расчетной активной и реактивной нагрузки.
5. Расчет осветительной нагрузки
6. Итоговый расчет нагрузки цеха

Контрольное задание. По рисунку задания 2 определить расчетные нагрузки цеха с учетом осветительной нагрузки и однофазной. Тип ламп по выбору преподавателя.

Тема 4. Выбор шинпроводов и кабелей в цехе.

1. Расчет рабочего максимального тока.
2. Выбор условий прокладки кабеля.
3. Выбор кабеля по условию нагрева

Контрольное задание. По рисунку задания 2 выбрать шинпроводы и кабели, питающие силовую нагрузку.

Тема 5. Выбор цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности.

1. Выбор числа трансформаторов при практически полной компенсации в сети с напряжением до 1 кВ и при отсутствии компенсации в сети до 1 кВ.
2. Определение мощности конденсаторов до и выше 1 кВ.
3. Выбор числа цеховых трансформаторов по приведенным затратам в трансформаторы и установки компенсации и по потерям активной мощности

Контрольное задание. По данным задания 3 выбрать трансформаторы цеховой ТП с учетом компенсации

Тема 6. Расчет расчетной нагрузки района города. Определение центра электрических нагрузок и эллипса рассеяния.

1. Расчет расчетной электрической нагрузки приведенной к вводу жилого дома.
2. Определение расчетной электрической нагрузки жилых домов микрорайона.
3. Учет в расчетной нагрузке коэффициента совмещения максимумов.
4. Выбор центра электрических нагрузок
5. Расчет эллипса рассеяния вероятностно-статистическим методом.

Контрольное задание. По заданию преподавателя определит расчетную нагрузку 5 этажного 90 квартирного дома, рассчитать расчетную нагрузку микрорайона площадью 500000 м². Выбрать место расположения ГПП и построить эллипс рассеяния нагрузки (20% отклонения от центра расположения ГПП), центры расположения домов по выбору преподавателя.

Тема 7. Выбор трансформаторов ГПП (ПГВ).

1. Выбор ГПП по систематической перегрузке.
2. Выбор ГПП по аварийной перегрузке.

Контрольное задание. Выбрать по расчетной нагрузке, приведенной в задании 7, трансформаторы ГПП. Изобразить схему подстанции. Выбрать напряжение питающей ГПП линии.

Тема 8. Расчет токов трехфазного и однофазного КЗ

1. Построение схемы замещения
2. Сопротивление элементов схемы замещения в установках до 1 кВ.
3. Учет активного и индуктивного сопротивления при расчете тока КЗ в сетях до 1 кВ
4. Расчет трехфазного КЗ и однофазного КЗ.

Контрольное задание. По исходным данным задания 1 рассчитать токи однофазного и трехфазного КЗ на шинах ТП и на аппаратах защиты печей сопротивления.

Тема 9. Выбор аппаратов защиты.

1. Выбор автоматических выключателей.
2. Условия выбора предохранителей.
3. Построение карты селективности

Контрольное задание. Требуется по расчету, проведенному в задании 9, выбрать аппараты защиты сети 0,4 кВ. Проверить селективность срабатывания защиты.

**Лабораторные занятия, их наименование и объем в часах.
Тематика лабораторных работ (16 часов – 7 семестр).**

Целью проведения лабораторных работ является изучение вопросов, связанных с работой изоляции высоковольтных электроустановок и освоения на практике правил безопасности проведения работ на высоковольтных линиях электропередачи, в распределительных устройствах станций и подстанций.

№ п/п	Наименование лабораторных работ	к-во час.
1	Изучение конструкции, условий применения аппарата АИИ-70 и правил безопасности в зале ТВН	2
2	Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном и постоянном магнитном поле	2
3	Исследование электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков	2
4	Исследование вольт-секундных характеристик изоляционных конструкций. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.	2
5	Изучение конструкций изоляторов	2
6	Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов	2
7	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	2
8	Определение электрической прочности жидких диэлектриков	2

2.2.4. Самостоятельная работа студентов.

При изучении дисциплины реализуются следующие формы организации самостоятельной работы студентов:

- аудиторная СРС под руководством и контролем преподавателя с применением методов активного обучения: на лекциях, практических и лабораторных занятиях, контрольные работы и рефераты;

- внеаудиторная СРС под руководством и контролем преподавателя: консультации по разделам дисциплины: защита индивидуальных домашних заданий; деловые игры, оценка качества освоения разделов дисциплины, внесенных внеаудиторную СРС без преподавателя;

- подготовка к аудиторным занятиям;

- проработка устного материала, выполнение индивидуальных заданий, написание рефератов, подготовка к деловой игре.

Объем и формы контроля самостоятельной работы отличаются для студентов дневной и заочной форм обучения и приведены в соответственно в табл. 1 - 6 по разделам дисциплины.

Студент допускается к зачету или экзамену при условии выполнения всех видов самостоятельной работы, предусмотренных на практических и лабораторных занятиях.

2.2.5. Формы контроля знаний студентов.

Входит контроль – опрос, тестирование, промежуточный контроль

Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний.

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- контрольные работы;
- выполнение индивидуальных домашних заданий с последующей их защитой;
- коллоквиумы: «Конструктивное исполнение воздушных и кабельных линий», «Методы расчета режимов», «Конструкции и характеристики внешней изоляции», «Изоляция высоковольтных электроустановок»;
- опрос студентов на практических занятиях;
- опрос во время допуска к проведению лабораторных занятий, защита лабораторных работ;
- тестирование.

К рабочей программе прилагается в качестве образца один вариант тестовых заданий для промежуточного контроля и контроля остаточных знаний студентов.

Итоговый контроль – зачеты, экзамены.

Проверка остаточных знаний

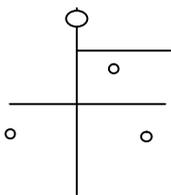
Вариант № 1

1. Дополнить:

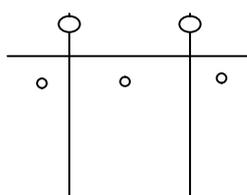
Энергетическая система состоит из: _____

2. Выбрать расположение проводов на опоре бочкой:

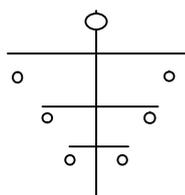
1.



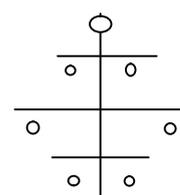
2.



3.



4.



3. Дополнить: Основными конструктивными элементами ВЛ

являются: _____

4. Выбрать марки кабеля с алюминиевыми жилами, с бумажной изоляцией:

1. ААБ

4. АВББШв

7. АПвП

2. ААШв

5. АРВГ

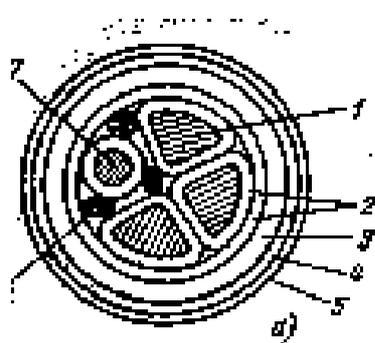
8. МНАШв

3. МВД

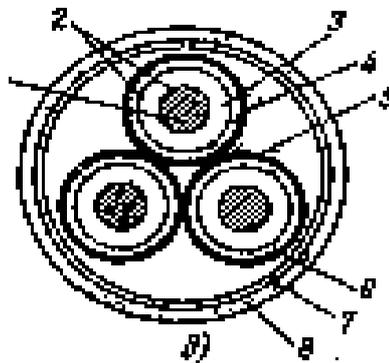
6. СБ2лГУ-В

9. МНС

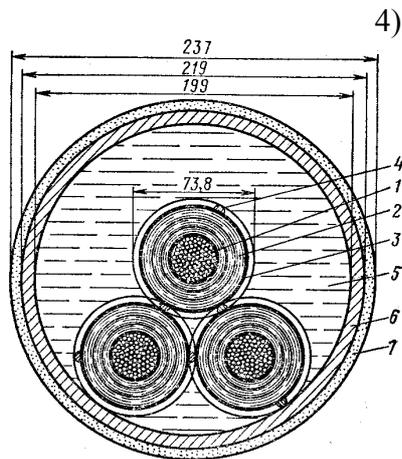
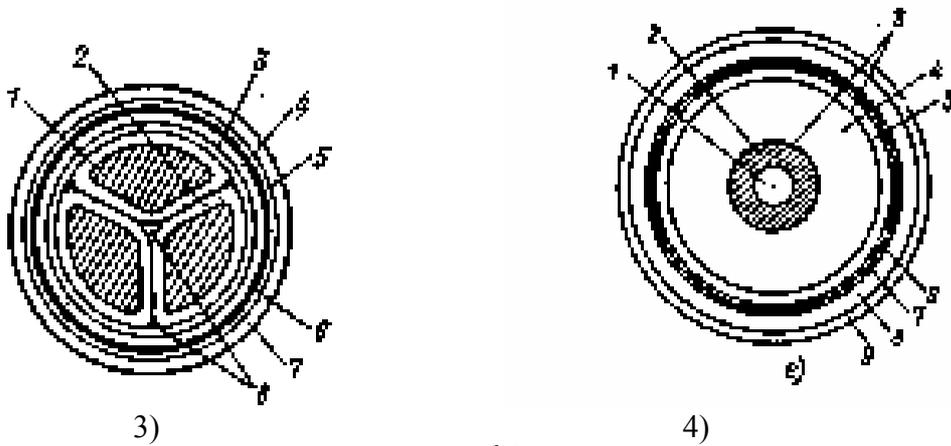
5. Выбрать из приведенных на рис. четырехжильный кабель напряжением до 1кв:



1)



2)



5)

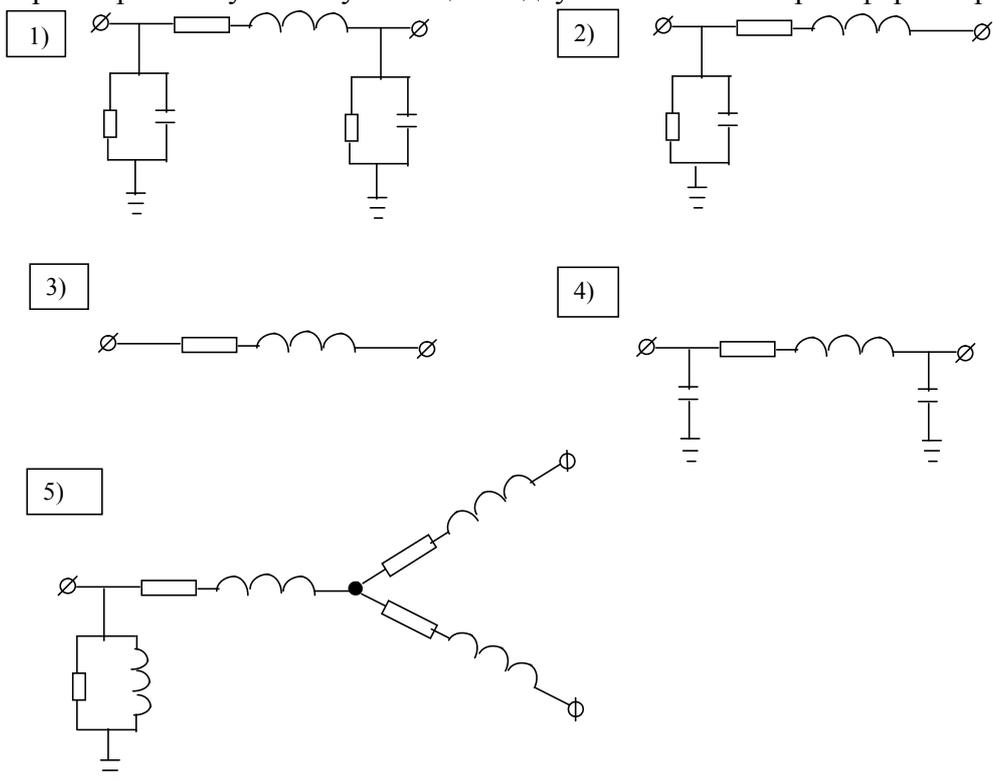
6. Нормальному установившемуся режиму соответствует следующая часть статической характеристики $q_H(u)$.

1. правая

2. левая

3. точка минимума

7. Выбрать правильную схему замещения двухобмоточного трансформатора:



8. При расчетах режимов электрических сетей и систем нагрузка задается постоянным током в:

1. низковольтных распределительных сетях;
2. распределительных сетях высокого напряжения;
3. питающих сетях;
4. системообразующих сетях.

9. Потеря напряжения - это:

1. геометрическая разность между комплексами напряжения начала и конца линии;
2. алгебраическая разность между модулями напряжения начала и конца линии;
3. поперечная составляющая падения напряжения.

10. Выбрать правильное выражение для определения падения напряжения линии при расчете по данным конца:

$$1) \quad U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_1} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_1}$$

$$2) \quad U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2}$$

$$3) \quad U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^K X_{12} + Q_{12}^K R_{12}}{U_2} - j \frac{P_{12}^K R_{12} - Q_{12}^K X_{12}}{U_2}$$

11. Определить правильную последовательность расчета режима по данным конца:

- определить падение напряжения на последнем участке сети
- определить потери мощности в последнем участке сети
- рассчитать зарядную мощность трех фаз в конце последнего участка сети
- определить мощность в начале последнего участка сети
- определить расчетную нагрузку последнего узла
- определить потери мощности в последнем участке сети
- определить напряжение предпоследнего узла

12. Выбрать правильную формулу для расчета потерь мощности по данным конца:

$$1) \quad \Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^k)^2 + (Q_{12}^k)^2}{U_2^2} (R_{12} + jX_{12}) \qquad 2) \quad \Delta S_{12} = \frac{P_{12}^k R_{12} + Q_{12}^k X_{12}}{U_2} (P_{12} + jQ_{12})$$

$$3) \quad \Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^k)^2 + (Q_{12}^k)^2}{U_1^2} (R_{12} + jX_{12})$$

13. Расчетная нагрузка подстанции - это:

- 1) мощность нагрузки на низкой стороне трансформатора
- 2) мощность нагрузки на высокой стороне трансформатора
- 3) мощность нагрузки с учетом потерь мощности в трансформаторе и зарядной мощности линий

2.2.6. Вопросы к экзаменам и зачетам.

Раздел «Производство электроэнергии» - зачет, 5 семестр

Вопросы к зачету:

1. ТЭС, виды, назначение воздействия на окружающую среду.
2. ГЭС, сравнительная характеристика видов.
3. ГАЭС, назначение, принцип действия.
4. Возобновляемые источники энергии: виды, условия использования.
5. График нагрузки энергосистемы: заполнения по виду станций.
6. Особенности ТЭС, АЭС и ГЭС, учитываемые при заполнении суточного графика нагрузки.
7. Электроснабжение потребителей I, II, III, категории.
8. Особенности технологической схемы ТЭЦ относительно КЭС.
9. Виды технологических схем АЭС.
10. Особенности схемы ГЭС по мощности.
11. Схемы распределительных устройств 10-750 кВ.
12. Схемы подстанций и их виды.
13. Собственные нужды станций и подстанций.
14. Собственные нужды ГЭС.
15. Собственные нужды ТЭЦ.
16. Собственные нужды КЭС.
17. Собственные нужды подстанций.
18. Заземление электрических станций и подстанций.
19. Коммутационные аппараты: виды обозначения на схеме, назначение.
20. Заземляющие устройства: назначение, применение.

Раздел «Передача и распределение электроэнергии» - экзамен, 5 семестр.

Вопросы к экзамену:

1. Понятия: энергетическая система, электроэнергетическая система, электрическая станция, электрическая сеть.
2. Классификация электрических сетей.
3. Стандартный ряд номинальных напряжений и наибольшие рабочие значения напряжений.
4. Преимущества объединённых энергосистем.
5. Дальние линии электропередачи переменного тока.
6. Дальние линии электропередачи постоянного тока.
7. Питающие сети, пример.
8. Системообразующие сети, пример.
9. Распределительные сети, пример.
10. Местные электрические сети, пример.
11. Конструктивные элементы ВЛЭП.
12. Конструктивное исполнение проводов, марки проводов.
13. Назначение проводов, тросов, изоляторов, опор, линейной арматуры.
14. Высота опоры, длина пролёта, стрела провеса.
15. Количество изоляторов в гирляндах на ВЛЭП различных номинальных напряжений.
16. Ориентировочные значения длин пролётов ВЛЭП различных номинальных напряжений.
17. Требования к материалу, из которого изготавливаются провода.
18. Области применения проводов различных марок. Марки проводов.
19. Марки грозозащитных тросов и области их применения.
20. Какие бывают опоры? Их назначение.

21. Транспозиция проводов, и с какой целью она применяется.
22. Расположение проводов на опоре.
23. Конструктивное исполнение деревянных опор, область их применения.
24. Конструктивное исполнение железобетонных опор, область их применения.
25. Конструктивное исполнение металлических опор, область их применения.
26. Унификация конструкций металлических и железобетонных опор. Шифры опор.
27. Классификация линейных изоляторов, их конструктивное исполнение.
28. Виды линейной арматуры, её назначение.
29. Классификация кабелей.
30. Конструктивное исполнение кабелей, назначение каждого элемента.
31. Кабели напряжением до 1 кВ.
32. Кабели напряжением 3 – 10 кВ.
33. Кабели напряжением 20, 35 кВ.
34. Маслонаполненные кабели напряжением 110 – 220 кВ.
35. Маслонаполненные кабели высокого давления.
36. Газоизолированные линии и газонаполненные кабели.
37. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.
38. Маркировка кабелей, примеры.
39. Принцип формирования марок кабелей, примеры.
40. Кабельная арматура, её назначение.
41. Прокладка кабелей.
42. Статические и динамические характеристики нагрузок, понятия и физическая сущность.
43. Статические характеристики осветительной нагрузки.
44. Статические характеристики асинхронных и синхронных двигателей.
45. Обобщённые статические нагрузки по напряжению и частоте комплексной нагрузки.
46. Регулирующий эффект нагрузки.
47. Задание нагрузки при расчётах режимов.
48. Представление генераторов при расчётах установившихся режимов.
49. Схемы замещения ВЛЭП и их параметры.
50. Схемы замещения кабельных линий, их параметры.
51. Каталожные данные трансформаторов, основные понятия и определения.
52. Схема соединения обмоток автотрансформатора. Распределение токов при работе автотрансформатора в понижающем режиме.
53. Типовая и номинальная мощности автотрансформаторов.
54. Схема замещения двухобмоточного трансформатора и её параметры.
55. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой и её параметры.
56. Схема замещения трёхобмоточного трансформатора, её параметры.
57. Схема замещения автотрансформатора, её параметры.
58. Определение потерь мощности в двухобмоточном трансформаторе.
59. Определение потерь мощности в трёхобмоточном трансформаторе и автотрансформаторе.
60. Приведенная и расчётная нагрузка узла.
61. Схемы электрических сетей.
62. Падение и потеря напряжения.
63. Расчёт режима ЛЭП при заданном токе нагрузки по данным «конца».
64. Расчёт режима ЛЭП при заданном токе нагрузки по данным «начала».
65. Построение векторных диаграмм токов и напряжений при расчёте режима ЛЭП.
66. Расчёт режимов разомкнутых сетей по данным «конца».
67. Расчёт режимов разомкнутых сетей по данным «начала».
68. Построение векторных диаграмм токов и напряжений при расчёте режимов разомкнутых сетей.

69. Определение потоков мощности на головных участках в простых замкнутых сетях и в сетях с двухсторонним питанием.
70. Расчёт кольцевых сетей.
71. Понятие «точка потокораздела». Как рассчитать кольцевую сеть с двумя точками потокораздела?
72. Расщепление сети. В каких сетях возможно применение такого приёма.
73. Особенности расчёта режимов в однородных электрических сетях.
74. Расчёт режимов сетей с двухсторонним питанием.
75. Определение наибольшей потери напряжения.
76. Особенности расчёта сетей с равномерно распределённой нагрузкой.
77. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции с двухобмоточными трансформаторами.
78. Определение напряжения на сторонах среднего и низшего напряжений подстанции с трёхобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами.
79. Расчёт сетей с различными номинальными напряжениями.
80. Регулирование напряжения с помощью РПИ трансформаторов и линейных регуляторов.
81. Выбор ответвлений РПН в двухобмоточных трансформаторах
82. Выбор ответвлений РПН в трехобмоточных трансформаторах
83. Выбор ответвлений РПН в автотрансформаторах.
84. Способы присоединения подстанций к электрической сети
85. Схемы электрических соединений подстанций.
86. Баланс активной мощности и его связь с частотой.
87. Резерв мощности.
88. Регулирование частоты вращения турбины
89. Регулирование частоты в системе.
90. Баланс реактивной мощности и его связь с напряжением.
91. Потребление реактивной мощности
92. Выработка реактивной мощности на электростанциях.

Раздел «Электроснабжение» - зачет, 6 семестр

Вопросы к зачету

1. Выделите характерные группы электроприемников, укажите причины их разбоя.
2. Какие режимы работы электроприемников являются основными?
3. Охарактеризуйте типы длительных режимов электроприемников.
4. Какими параметрами характеризуется повторно кратковременный режим, приведите примеры электроприемников работающих в этом режиме?
5. Приведите основные методы расчета электрических нагрузок. Какие достоинства имеет метод коэффициента расчетной активной мощности.
6. Какие выражения расчетных коэффициентов применяются при описании и определении электрических нагрузок.
7. Поясните различия в физическом смысле расчетной величины электрической нагрузки по нагреву и нагрузки по проектным и договорным условиям.
8. Что из себя представляют электроприемник, потребитель, система электроснабжения?
9. Поясните что такое, подстанция, ТП, КТП, РУ, РП, ЦРП, ОРУ, ЗРУ, КРУГПП, ПГВ?
10. Поясните необходимость категорирования электроприемников по надежности СЭС
11. Перечислите исходные данные для выбора схемы электроснабжения.
12. Укажите применяемые в системах электроснабжения напряжения, обоснуйте их выбор.
13. Какие преимущества и недостатки имеет петлевая схема электроснабжения, где она применяется? Укажите как можно повысить ее надежность.
14. Поясните физический смысл теоретического центра электрических нагрузок.
15. Перечислите исходные данные необходимые для выбора ГПП и РП.

16. Каковы особенности выбора схем и оборудования ГПП.
17. Объясните, почему в городских сетях получили распространение ПГВ и кабельные линии.
18. Поясните особенности выбора и дайте характеристику методикам выбора силовых трансформаторов в системах электроснабжения.
19. Объясните, почему в системах электроснабжения применяют трехуровневые и двухуровневые сети напряжений. Какой уровень напряжения рекомендуется в сельских сетях.
20. Опишите, как осуществляется выбора типа и сечения кабельных линий напряжением до 1 кВ.
21. Опишите, как осуществляется выбора типа и сечения кабельных линий напряжением до 1 кВ.
22. Изложите основные сведения по воздушным линиям в системах электроснабжения.
23. Опишите, как осуществляется расчет расчетных электрических нагрузок городских потребителей.
24. Опишите, как осуществляется расчет расчетных электрических нагрузок сельских потребителей.
25. Каковы особенности и ограничения на прокладку кабеля в траншее?
26. Посчитайте увеличение сечения при прокладке кабелей в блоках, поясните физический смысл изменения нагрузки.
27. Почему прокладка кабелей в туннелях и каналах стала основной для предприятий с большой и насыщенной кабельной канализацией?
28. Чем вызвано появления способа прокладки кабелей в эстакадах?
29. Объясните, почему в место воздушных линий на напряжение 10-0,4 кВ в настоящее время рекомендуют применение самонесущих изолированных проводов?
30. Объясните область применения токопроводов и дайте характеристику их конструктивному исполнению.
31. Проиллюстрируйте разнообразие и область применения электропроводок.
32. Укажите особенности применения радиального, магистрального и смешанного питания потребителей и электроприемников.
33. Укажите особенности расчета токов КЗ на напряжение до 1кВ.
34. Нужна ли проверка аппаратов, применяемых в системах электроснабжения, на термическую стойкость? Если да, то в каких аппаратах?
35. По каким параметрам осуществляется выбор шинопроводов и кабелей до 1 кВ?
36. Для чего нужны контактор и магнитный пускатель.
37. Что из себя представляют автоматические выключатели и как осуществляется их выбор?
38. Для чего нужны предохранители, в каких сетях они используются? Дайте типовым времятоковым характеристикам.
39. Дайте описание основным показателям качества электроэнергии системы электроснабжения.
40. Какой физический смысл реактивной мощности, и каковы ее источники в системах электроснабжения?
41. Сравните технические характеристики синхронных машин и батарей конденсаторов как источников реактивной мощности.
42. Обоснуйте экономическую необходимость компенсации реактивной мощности.
43. Перечислите виды применяемых заземлений.
44. Перечислите особенности заземляющих устройств в установках до и выше 1 кВ.
45. Опишите в чем отличие статических методов оценки экономической эффективности от динамических.
46. Опишите режимы работы нейтрали в системах электроснабжения.
47. Как проводится расчет потерь мощности и напряжения в элементах электрических сетей.
48. Опишите принципы компоновки трансформаторных подстанций выше 1 кВ.

Раздел «Изоляция» - экзамен, 7 семестр

Вопросы к экзамену.

- 1 Электрофизические процессы в газах.
- 2 Движение заряженных частиц в газе.
- 3 Основные свойства термической плазмы.
- 4 Разновидности разрядов в газах.
- 5 Канальная форма разряда.
- 6 коронный разряд.
- 7 Импульсная корона.
- 8 Ионизация и рекомбинация частиц в газах.
- 9 Лавина электронов и условие самостоятельности разряда.
- 10 Электропроводимость диэлектриков.
- 11 Поляризация диэлектриков. Диэлектрические потери.
- 12 Атмосферный воздух как диэлектрик.
- 13 Назначение изоляторов, их цели и конструкция.
- 14 Испытание внешней изоляции.
- 15 Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем.
- 16 Развитие разряда, начальные и пробивные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем.
- 17 Вольт-секундная характеристика воздушных промежутков. Время разряда.
- 18 Разряд в длинных воздушных промежутках.
- 19 Влияние конструкции изоляторов на напряжение перекрытия.
- 20 Развитие разряда и напряжение перекрытия изоляторов при неблагоприятных погодных условиях.
- 21 Учет атмосферных условий при определении разрядных и испытательных напряжений.
- 22 Регулирование эл. полей во внешней изоляции электроустановок.
- 23 Внутренняя изоляция: понятие и общие свойства.
- 24 Зависимость эл. прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения.
- 25 Самовосстанавливающаяся и не самовосстанавливающаяся изоляция. Влияние на неё механических тепловых и др. воздействий.
- 26 Пробой жидких диэлектриков.
- 27 Пробой твёрдых диэлектриков. Разряд по поверхности твердого диэлектрика.
- 28 Маслобарьерная изоляция.
- 29 Твердая изоляция.
- 30 Бумажно-масляная изоляция.
- 31 Газовая и вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция
- 32 Градирование изоляции.
- 33 Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий.
- 34 Допустимые напряжения на внутренней изоляции, факторы, влияющие на кратковременную эл. прочность внутренней изоляции.
- 35 Изоляция ВЛ на опорах.
- 36 Изоляционные расстояния в пролетах ВЛ.
- 37 Выбор линейной изоляции.
- 38 Изоляционные конструкции ОРУ.
- 39 Изоляционные промежутки в ОРУ.
- 40 Выбор наружной изоляции РУ подстанции.
- 41 Изоляционные конструкции с газовой изоляцией.
- 42 Экологическое влияние ВЛ и РУ.
- 43 Основные конструкции кабелей высокого напряжения.

- 44 Кабельные муфты. Испытание изоляции кабелей.
- 45 Классификация и особенности изоляции силовых трансформаторов. Конструкция изоляции трансформаторов.
- 46 Испытания изоляции трансформаторов.
- 47 Изоляция ТТ.
- 48 Изоляция масляных и воздушных выключателей.
- 49 Изоляция вакуумных выключателей.
- 50 Изоляция элегазовых выключателей.
- 51 Изоляция герметизированных РУ, КРУЭ.
- 52 Изоляция вводов ВН.
- 53 Изоляция силовых конденсаторов.
- 54 Изоляция электрических машин высокого напряжения.

Критерии оценки

К экзамену допускаются студенты, выполнившие весь объем по индивидуальной работе. Критерии оценки определены в нормативных и методических материалах АмГУ.

2.3. Учебно-методические материалы по дисциплине.

2.3.1. Литература

Раздел «Производство электроэнергии»

Основная литература.

1. Стерман Л.С., Лавигин В.М. Тепловые и атомные электрические станции.- М: МЭИ, 2000.
2. Рожкова Л.Д., Корнеева Л.К. Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций.- М.: Академия, 2004.
3. Балаков Ю.Н. , Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Проектирование схем электроустановок: Учебное пособие для вузов.- М.: Изд-во МЭИ, 2004.- 288 с.

Дополнительная литература

1. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций.-М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций.- М.: Энергия, 1980.
4. Под ред. С.В.Усова Электрическая часть электростанций. -М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Гук Ю.Б., Кантан В.В., Петрова С.С. Проектирование электрической станций и подстанции. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

Раздел «Передача и распределение электроэнергии».

Основная литература.

1. Электрические системы. Электрические сети: Учебник для энергетических специальностей вузов/ под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998- 511 с.
2. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002- 248 с.
3. Основы современной энергетики: Учебник для вузов. В двух частях / под общей ред. Е.В. Аметистова. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. Часть 2. Современная электроэнергетика. / Под ред. А.П.Бурмана и В.А.Строева. – 462 с.
4. Савина Н.В., Мясоедов Ю.В., Дудченко Л.Н., Электрические сети в примерах и расчетах: учебное пособие. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 1999- 238 с.

5. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / под ред. В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1999 – 35 с.

Дополнительная литература

6. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Высшая школа, 1989, 592 с.
7. Зуев Э.Н. Основы техники подземной передачи электроэнергии. М.: «Энергоатомиздат» Москва, 1999 – 256с.
8. Попов Л.В. Кабельные линии 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
9. Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Электрические системы и сети. Проектирование. - Минск: Высш. шк., 1988. - 308 с.
10. Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. - М.: Энергоатомиздат, 1989, 680 с.
11. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэзн. спец. вузов / Под ред. В.М. Блок. М.: Высш. шк., 1990. - 383 с.
12. Правила устройств электроустановок. /Министерство топлива и энергетики РФ. - 7 изд., 2006. - 648 с.
13. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро/ - М.: Энергоатомиздат, 1985, 352 с.
14. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.3. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ: А.И. Попов (гл. ред.) и др. - М.: Изд-во МЭИ, 2002, 964 с.
15. Гордон С.В. Сооружение линий электропередачи. - М.: Энергоиздат, 1984, 432 с.
16. Справочник по проектированию подстанций 35 - 500 кВ/ под ред. С.С. Рокотяна, Я.С. Самойлова/ - М.: Энергоиздат, 1982, 352 с.
17. Блок В.М. Электрические сети и системы. М.: Высш. шк., 1986. - 430 с.
18. Справочник по проектированию систем электроснабжения/ под ред. Ю.Г. Барыбина, и др. - М.: Энергоатомиздат, 1991 -576 с.
19. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1983
20. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / под ред. В.А. Веникова./ - М.: Энергоатомиздат, 1983, 504 с.
21. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию./Под ред. А.А. Федорова, М.:Энергоиздат,1986. в2-х томах.
22. Справочник по проектированию электросетей и электрооборудования/ под ред. Ю.Г. Барыбина - М.: Энергоатомиздат, 1991 – 464 с.
23. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: учеб. пособие – М.: форум: Инфра. – М. 2006.- 480 с.

Раздел «Электроснабжение».

Основная литература.

1. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: изд-во: «Мастерство» 2002
2. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: учеб. пособие – М.: форум: Инфра. – М. 2006.- 480 с.

Дополнительная литература.

1. Правила устройства электроустановок. 7 редакция.
2. Инструкция по проектированию городских электрических сетей. РД 34.20.185-94. 1995.
3. Указания по определению электрических нагрузок в промышленных установках. 1991
4. Руководящие материалы по проектированию с/х. 1999.
5. Методика расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях. Минпромэнерго. 2005.
6. Электротехнический справочник. Том 3 / под ред. А.И. Попова М.: Изд-во МЭИ. 2002

7. Кудрин Б.И, Электроснабжение промышленных предприятий учебник для вузов. М. Энергоатомиздат. 1995
8. Справочник по проектированию электроснабжения. Электроустановки промышленных предприятий / Под ред. Ю.Г. Барыбина. 1991.
9. А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий.
10. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / Под ред. Круповича. М.: Энергия, 1981.
11. Козлов В.А. Электроснабжение городов. 1988.
12. Справочник: Комплектные электротехнические устройства. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Раздел «Изоляция».

Основная литература

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М.Иманов и др.; под ред. Г.С.Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003.– 608 с.
2. Калявин В.П. , Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок. / Йошкар-Ола: Изд-во Мар. гос. ун-та- 2000. - 348 с.
3. Высоковольтные электротехнологии / под ред. И.П.Верещагина - М.: Изд-во МЭИ, 2000.- 204с.
4. Основы современной энергетики: Уч-ник для вузов ч. 2 Современная электроэнергетика / под ред. А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М. Изд-во МЭИ, 2004. – 462 с.
5. Электрические аппараты высокого напряжения/ под ред. Г.Н. Александрова. Изд-во СПб ГТУ, 2000. -503 с.
6. Высоковольтные электротехнологии / под ред. И.П. Верещагина. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 204 с.

Дополнительная литература.

1. Физико-математические основы техники и электрофизики высоких напряжений. Учебное пособие для вузов. / Под ред. К.П. Кадомской. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
2. Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г. Разряд в воздухе вдоль загрязнений и увлажнение поверхности изолятора. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 31 с.
3. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 367 с.
4. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
5. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 126 с.
6. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 367 с.
7. Техника высоких напряжений. / Под ред. Д.В. Разевича. – М.: Энергия, 1976. – 426 с.
8. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. – Минск, В.школа, 1982. – 367 с.
9. Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения. / М.Б. Бейер, В.Бек, К. Меллер, В. Цэнгль. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
10. Александров Г.Н., Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 308 с.
11. Яманов С.А., Яманова Л.В. Стойкость и надежность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
12. Лабораторные работы по ТВН / Аронов М.А. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352 с.

13. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения. / Под ред. И.А. Баумштейна, М.В.Хомякова. – М.: Энергия, 1981. – 568 с.
14. Электрические изоляторы. / Под ред. Н.С. Костюкова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
15. Электротехнический справочник ЗТ ТЗ. Производство и распределение электрической энергии. / Под ред. проф. МЭИ.: А.И. Попов (гл. ред.). – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.
16. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
17. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1988. – 126 с.
18. Хаушильд В., Мош В., Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений / пер. с нем.. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 312 с.
19. Лабораторный практикум по ТВН. Изоляция и перенапряжения / под ред. Н.В.Савиной. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – (электронное пособие).

2.3.2. Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАН
10. Энергетика

2.3.3. Информационное обеспечение дисциплины

1. Центральное Диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/>
2. Служба релейной защиты и автоматики ЦДУ ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/rza/>
3. Объединённое Диспетчерское Управление энергосистемами Востока (ОДУ Востока) <http://www.oduv.ru/>
4. ОАО "АМУРЭНЕРГО" <http://www.ae.amur.ru/>
5. ОАО "ДАЛЬЭНЕРГО" <http://www.dalenergo.org/>
6. ОАО "ЗЕЙСКАЯ ГЭС" <http://www.rao-ees.ru/zges/>
7. ФОРЭМ <http://www.cdrforem.ru/>

2.3.4. Перечень наглядных и других пособий.

1. Макеты опор ВЛ.
2. Слайды к медиапроектору по теме «Основные сведения об энергетических системах», «Конструкция ВЛ и КЛ» - 18 штук. «Балансы активной и реактивной мощности» - 3 шт.
3. Электрическая схема Амурской энергосистемы, ОЭС Востока.
4. Тренажер электроэнергетической системы.

2.3.5. Программы для ПЭВМ

1. MathCAD
2. Промышленные программно-вычислительные комплексы: "SDO-6", "RASTR".
3. ПВК «VISIO».

2.4. Учебно-методическая карта дисциплины

Учебно-методическая карта дисциплины по разделу «Производство электроэнергии»

Таблица 1

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые нагляд. и метод. пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			практич. (семина.)	лаборат.		содерж.	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1			Фильмы по курсу			
2	2	2	1		Уч. пособие по курсу. Эл. вар.	Подробное ознакомление по видам эл. станций.	4	опрос
3	2	3,4			Уч. пособие по курсу. Эл. вар.			
4	2	5	2		Уч. пособие по курсу. Эл. вар.	Выбор всех элементов эл. оборудования по структурным схемам ТЭС	6	опрос
5	3	6			Уч. пособие по курсу. Эл. вар.			
6	3	7	3		Уч. пособие по курсу. Эл. вар.	Изучение изображения эл. оборудования по ГОСТу.	2	опрос
7	3	8			Уч. пособие по курсу. Эл. вар.			
8	3	9	3		Уч. пособие по курсу. Эл. вар.	Подробное изучение эл. схем ОРУ на эл. ст.	6	опрос
9	3	10			Уч. пособие по курсу. Эл. вар.			
10	3	11	4		Схемы в эл. вар.			опрос
11	3	12						
12	3	13	4		Схемы в эл. вар.			опрос
13	3	14						
14	3	15	4		Схемы в эл. вар.			опрос
15	3	16						
16	3	17	5		Схемы в эл. вар.			опрос
17	3	18						
18	3	19,20	5		Схемы в эл. вар.			опрос

Учебно-методическая карта дисциплины по разделу «Передача и распределение электроэнергии».

Учебно-методическая карта дисциплины представлена отдельно для студентов очной и заочной форм обучения соответственно в табл. 2 и 3

Таблица 2.

Учебно-методическая карта дисциплины для очной формы обучения

№ недели	№ темы	Наименование вопросов изучаемых на лекции	Занятия (номера)		Используемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			Практич. (семина.)			Содержание	Час	
1	2	3	4	5	6	7	8	
	1	Содержание вопросов изучаемых на лекции приведены в подразделе 2.2.			Схема Амурской энергосистемы. Однолинейные схемы эл. сетей и подстанций	История развития топливно-энергетического комплекса России. Перечень объединенных энергетических систем. Состав ОЭС «Восток».	2	Блиц-опрос на лекции
	2			Макеты опор ВЛ. Слайды для медиапроектора «Конструкция проводов ВЛ» «Конструкция различных типов и шифров опор», «Линейная арматура», «Изоляторы», «Кабели, кабельная арматура»	Конструктивное исполнение многопроволочных проводов различных марок (соотношение между сечением и числом и диаметром проволок, соотношение между стальной и алюминиевой частью провода для нормальных, облегченных и усиленных проводов) Область применения различных марок и сечений проводов. Среднегеометрические расстояния между фазами в зависимости от номинального напряжения. Число изоляторов в гирлянде, длины пролетов при различных номинальных напряжениях. Маркировка кабелей	4	Блиц-опрос на лекции Контрольная работа Тестирование Коллоквиум	
	3		Практические занятия № 1,2 (5 семестр)	Савина Н.В., Мясоедов Ю.В., Дудченко Л.Н. Электрические сети в примерах и расчетах: Учебное пособие, изд. АмГУ 1999, 238 с.	Решение задач по темам практических занятий ПЗ № 8, 1, 2	4	Защиты индивидуальных домашних заданий, тестирования	
	4			Наглядные пособия: Однолинейные схемы эл сетей Однолинейные схемы подстанций и эл станций	Изучение схем разомкнутых, замкнутых, сложноразомкнутых сетей. Выделение их из общей схемы энергосистемы. Выделение из общей схемы энергосистемы системообразующих сетей, питающих и распределительных сетей. Изучение схем различных типов подстанций (Работа по наглядным пособиям и на ПЭВМ).	4	Блиц-опрос на лекции Тестирование	

1	2	3	4	5	6	7	8
	5		№ 3,4 (5 сем.)	Слайды для медиапроектора со схемами и алгоритмами расчета режимов в разомкнутых сетях. Пакет программ «Math Cad 7.0»	Решение задач по темам ПЗ № 3,4 с привлечением пакета программ «Math Cad 7.0»	6	Защиты индивидуальных домашних заданий, Блиц-опрос на лекциях, Курсовой проект
	6		№ 5,6 (5 сем.)	Слайды для медиапроектора со схемами и алгоритмами расчета режимов в замкнутых сетях. Пакет программ «Math Cad 7.0»	Решение задач по темам ПЗ № 5,6 с привлечением пакета программ «Math Cad 7.0»	7	Защиты индивидуальных домашних заданий, Блиц-опрос на лекциях
	7		№ 7,8 (5 сем.)	Слайды для медиапроектора со схемами и алгоритмами расчета режимов в сетях нескольких номинальных напряжений. Пакет программ «Math Cad 7.0»	Решение задач по темам ПЗ № 7,8 с привлечением пакета программ «Math Cad 7.0»		Защиты индивидуальных домашних заданий, Блиц-опрос на лекциях
	8			ПВК «SDO-6»	Определение однородных сетей. Метод расщепления сети и область его применения	4	Блиц-опрос на лекциях
	9		№ 7	Слайды для медиапроектора: «Участие эл. станций в балансе активной мощности ЭЭС», «Регулирование частоты в ЭЭС» «Характеристики турбин»	Потребители реактивной мощности. Выработка реактивной мощности на ЭС. Регулирующий эффект нагрузки. Решение задач по теме 7 (6 семестр)	4	Защиты индивидуальных домашних заданий, Блиц-опрос на лекциях

Таблица 3.

Учебно-методическая карта дисциплины для заочной формы обучения

№ лекции	№ темы	Наименование вопросов изучаемых на лекции	Наименование практических занятий	Изучаемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
					Содержание	Час	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	Содержание вопросов изучаемых на лекции приведены в подразделе 2.2.		Схема Амурской энергосистемы. Однолинейные схемы эл. сетей и подстанций в виде слайдов для медиапроектора	История развития топливно-энергетического комплекса России. Перечень объединенных энергетических систем. Состав ОЭС «Восток». Линии электропередачи переменного и постоянного тока. Понижающие и преобразовательные подстанции. Конструктивные элементы воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Провода ВЛ и тросы. Опоры: их классификация и конструкция. Область применения, линейная арматура; изоляторы. Конструктивные элементы кабельных линий электропередачи. Классификация кабельных линий, принципы формирования марки кабеля, маркировка кабелей, конструктивное исполнение кабелей различного уровня номинального напряжения их область применения. Кабельная арматура. Прокладка кабелей.	18	Блиц-опрос на лекции

1	2	3	4	5	6	7	8
2	3,4		№1 Расчет режимов разомкнутых сетей	Слайды для медиапроектора схемами алгоритмами расчета режимов разомкнутых сетей. Пакет программ «Math Cad 7.0»	Решение задач по темам ПЗ № 3,4 с привлечением пакета программ «Math Cad 7.0» Статические характеристики осветительной нагрузки двигателей. Статические характеристики комплексной нагрузки по напряжению и частоте. Регулируемый эффект нагрузки. Способы задания нагрузки при расчетах режимов разомкнутые сети. Замкнутые сети: кольцевые сети и сети с двухсторонним питанием. Схемы соединения эл. сети. Способы присоединения подстанций к эл. сети. Схемы эл. соединений подстанций.	20	Блиц-опрос на лекциях
3	6,7		№2 Расчет режимов замкнутых сетей	Слайды для медиапроектора схемами и алгоритмами расчета режимов в замкнутых сетях. Пакет программ «Math Cad 7.0»	Решение задач по темам ПЗ № 5,6 с привлечением пакета программ «Math Cad 7.0» Потери мощности в двухобмоточном, трехобмоточном трансформаторах, в автотрансформаторе. Падение и потеря напряжения. Расчет режима эл. сети по данным «конца» и по данным «начала» при заданном токе нагрузки. Построение векторных диаграмм при расчете режимов. Определение потоков мощности на головных участках в простых замкнутых сетях. Точка потокораздела.	14	Блиц-опрос на лекциях Контрольная работа № 1
4	8, 9		№1 Расчет режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями.	Слайды для медиапроектора схемами и алгоритмами расчета режимов в сетях нескольких номинальных напряжений. Пакет программ «Math Cad 7.0» ПВК «SDO-6»	Решение задач по темам ПЗ № 7,8 с привлечением пакета программ «Math Cad 7.0» Определение напряжения на стороне низкого напряжения трансформатора. Выбор номера ответвления РПК на трансформаторах и автотрансформаторах. Расщепление сети. Расчет режима в однородных сетях. Особенности расчета сетей с равномерно распределенной нагрузкой.	12	Блиц-опрос на лекциях Контрольная работа № 2

Учебно-методическая карта дисциплины по разделу «Электроснабжение»

Таблица 4

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекциях	Занятия (номера)		Используемые наглядные и метод. пособия	Самостоятельная работа студента		Формы контроля
			Практич.			номер	часы	
1	2	3	4		5	6	7	8
1	1							
2	2		1			1	2	Контрольная работа
3	3							
4	4		2			2	2	Контрольная работа
5	5							
6	6		3			3	2	Контрольная работа
7	7							
8	8		4					
9	8					4	2	Контрольная работа
10	9		5			5	2	Контрольная работа
11	10							
12	11		6			6	2	Контрольная работа
13	11		7					
14	12					7		Контрольная работа
15	13							
16	14		8			8	2	Контрольная работа
17	15							
18	16		9			9	2	Контрольная работа

Учебно-методическая карта дисциплины по разделу «Изоляция»

Таблица 5

Номер лекции	Номер темы	Наименование вопросов, изучаемых на лекции	Занятия (номера)		Используемые наглядные и метод. пособия	Самостоятельная работа студента		Формы контроля
			практ.	лаборат.		содержание	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, 2	1	Введение. Основные понятия и определения		1	Слайды с изоляционными материалами	Материалы по теме, по лабораторной работе	2	Блиц-опрос, входит контроль лаб. работ
3, 4	2	Общая характеристика внешней изоляции		2	Слайды с изоляционными материалами	-#-	3	Блиц-опрос, входит контроль лаб. работ
5, 6, 7	3	Разряды в воздушных промежутках		3	Слайды с характеристиками разрядов, вольтсекундными характеристиками	-#-	4	Блиц-опрос, входит контроль лаб. работ
8, 9, 10	4	Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов		4, 5	Слайды с разрядами вдоль поверхности изоляторов, с коротким разрядом, с регулированием эл. полей	-#- Лабораторная работа	5	Коллоквиум. Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
11, 12	5	Общие свойства внутренней изоляции			Слайды с характеристиками внутренней изоляции	Материалы по теме	2	Блиц-опрос
13, 14, 15, 16, 17	6	Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности		6	Слайды с видами внутренней изоляции	Материалы по теме, по лабораторной работе	6	Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
18, 19, 20, 21, 22	7	Изоляция устройств ВН		7	Слайды с конструкцией изоляции устройств высокого напряжения	-#-	6	Коллоквиум. Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
23, 24	8	Изоляция воздушных ЛЭП		8	Слайды с линейной изоляцией, с методикой ее выбора	-#-	3	Блиц-опрос. Защита лабораторной работы

3. Краткий конспект лекций

3.1. Методические указания по проведению лекций

Лекционный курс по дисциплине «Электроэнергетика. Передача и распределение электроэнергии» - направлен на формирование у студентов базовых знаний в области электрических сетей, развитие которых будет осуществлено в дисциплинах «Электроэнергетические системы и сети», «Электропитающие системы и сети», «Спец. курс электроэнергетических систем», «Дальние линии электропередачи СВН».

Целью данного раздела является оказание методической помощи в оптимальном распределении теоретического материала между лекциями, а также между аудиторными занятиями и самостоятельной работой по изучению дисциплины. Кроме того будет осуществлена систематизация излагаемого материала.

Лекцию нужно строить таким образом, чтобы осуществлять сквозную подготовку студентов, активизировать работу аудитории, поддерживать интерес к излагаемому материалу, развивать инженерное мышление у студентов. Методически лекция должна быть направлена на усвоение студентами излагаемого материала и меть эмоциональную окраску. Материал целесообразно излагать в доступной форме, приводя примеры из реальной жизни как в части эксплуатации, так и проектирования или развития систем, выделяя при этом наиболее насущные проблемы по рассматриваемой тематике общероссийской и региона.

Поставив задачи, которые будут решаться на лекции, преподаватель должен методически подвести аудиторию к их решению, играя при этом роль лидера. Тем самым у студентов развиваются способности логически мыслить и генерировать идеи. Для максимального усвоения материала целесообразно задействовать зрительную, слуховую и моторную память студентов. Для каждой лекции должна быть подготовлена презентация, включающая название лекции, цель и задачи, решаемые на лекции, план лекции, основные теоретические материалы, содержащие математические выкладки, рисунки, схемы, выводы. Презентацию не нужно загромождать текстом, справочным материалом.

В ходе лекции необходимо, опираясь на физическую сущность рассматриваемой задачи или процесса, показать основные теоретические выкладки и довести теоретический материал до инженерных решений и их технической реализации, показать область их применения.

Целесообразно, в процессе лекции использовать передовые образовательные технологии, например, методы активизации обучения, информационные технологии. Технические средства, используемые на лекции: медиапроектор, экран, ноутбук, проектоскоп.

Предлагается следующая структура построения лекции:

- тема;
- цель и задачи;
- план;
- фронтальный блиц-опрос (3-5 минут);
- вступление;
- изложение основного материала;
- закрепление;
- разделы, выносимые на самостоятельную проработку;
- выводы.

Блиц-опрос должен периодически чередоваться с самостоятельной работой (10-15 минут), проводимой в конце лекции.

При выдаче задания на самостоятельную проработку необходимо назвать учебники предложить найти дополнительные источники, в т.ч. и электронные, помимо указанных в рабочей программе.

Выводы должны быть краткими, но емкими и содержать основную мысль, которую лектор хотел донести до аудитории.

3.2. Краткий конспект лекций

Лекция 1.

Общие сведения об энергетических системах.

Цель лекции. Ознакомить студентов с основными разделами курса, показать роль энергетической системы в народном хозяйстве и тенденции ее развития, дать основные понятия и определения.

План лекции

1. Современное состояние электроэнергетики, перспективы ее развития.
2. Топливо-энергетический комплекс.
3. Основные определения и характеристики подсистем энергетической системы

Техническую основу современной электроэнергетики составляют 440 тепловых и гидравлических электростанций мощностью соответственно 132,1 и 43,8 млн. кВт и 9 атомных электростанций мощностью 22,1 млн. кВт. Протяженность линий электропередачи всех классов напряжения 2,67 млн. км, в т.ч. напряжением свыше 220 кВ – 150,7 тыс. км. В России существуют 7 ОЭС: ОЭС Центра, ОЭС Сибири, ОЭС Северо-Запада, ОЭС Северного Кавказа, ОЭС Средней Волги, ОЭС Востока, ОЭС Урала. Это деление техническое. Управление ими осуществляется объединенными диспетчерскими управлениями (ОДУ), которые подчиняются Центральному диспетчерскому управлению (ЦДУ) и подчиняют себе региональные диспетчерские управления (РДУ).

В настоящее время идет образование энергетических компаний, таких как ГидроОГК, ФСК и т.д. Далее приводится характеристика топливо-энергетического комплекса [1].

Энергетическая система состоит из электростанций, электрических сетей и потребителей электроэнергии, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии, при общем управлении этим режимом.

Электроэнергетическая система – это часть энергетической системы, за исключением тепловых сетей и тепловых потребителей – совокупность электрических частей электростанций, эл.сетей и электроприемников, работающих по согласованному режиму при его общем управлении.

Электростанция – производит или генерирует электроэнергию, а теплофикационная электростанция – электрическую и тепловую энергию. По виду первичного источника энергии, преобразуемого в электрическую или тепловую энергию, различают: тепловые (ТЭС), атомные (АЭС), гидравлические (ГЭС).

ТЭС делятся на конденсационные электростанции (КЭС), государственные районные электростанции (ГРЭС), теплофикационные (ТЭЦ) – вырабатывающие и электроэнергию и тепло.

Существуют также другие виды электростанций, относящиеся к нетрадиционным источникам энергии – гидроаккумулирующие, дизельные, солнечные, геотермальные, приливные, ветроэлектростанции, биоэлектростанции, но их мощность невелика.

Электрическая сеть – совокупность электроустановок, предназначенных для передачи и распределения электроэнергии от электростанций к потребителям. Эл. сеть состоит из воздушных и кабельных линий электропередачи, подстанций, РУ и переключательных пунктов. Можно сказать, что эл. сеть состоит из линий и трансформаторов. Трансформаторы служат для изменения параметров передаваемой энергии: тока и напряжения и устанавливаются на ПС вместе с коммутационной аппаратурой.

Линия электропередачи – это электроустановка, предназначенная для передачи электроэнергии, т.е. система проводов, соединительной арматуры, опор, изоляторов, траверс, кабелей, каналов и т.д. При передаче электроэнергии напряжением выше 1 кВ линия называется высоковольтной, при передаче электроэнергии напряжением до 1 кВ – низковольтной.

В РФ применяются стандартные номинальные (междуфазные напряжения трехфазного тока частотой 50 Гц) напряжения: 3,6,10,20,35,110,150,220,330,500,750,1150 кВ.

Передача электроэнергии от электростанций по линиям электропередачи осуществляется при напряжениях 110-500 кВ с целью снижения потерь электроэнергии, а напряжения генераторов 3-21 кВ. Следовательно, необходимы подстанции (ПС) для преобразования электроэнергии одного напряжения в электроэнергию другого напряжения.

Подстанция – это электроустановка, предназначенная для преобразования и распределения электроэнергии, она состоит из силовых трансформаторов, сборных шин, коммутационных аппаратов и вспомогательного оборудования – устройств РЗА, измерительных приборов. ПС предназначены для связи генераторов и потребителей электроэнергии с ЛЭП и для связи отдельных частей электроэнергетической системы. Различают ПС повышающие и понижающие.

Лекция 2.

Классификация электрических сетей.

Цель лекции. Привести классификацию электрических сетей и дать их краткую характеристику.

План лекции

1. Признаки классификации электрических сетей.
2. Классификация по роду тока и напряжению.
3. Классификация по выполняемым функциям.
4. Классификация по характеру потребителей.
5. Классификация по конфигурации схемы сети и по размерам территории.
6. Классификация по отношению к помещениям.

По роду тока сети делятся на сети переменного и постоянного тока. Приводится общая характеристика таких сетей. Дается их сравнительный анализ. Даются преимущества и недостатки сетей постоянного тока.

По номинальному напряжению сети делятся на:

низковольтные (НН) до 1 кВ;

сети среднего напряжения (СН) (3-35 кВ);

сети высокого напряжения (ВН) (110-220 кВ);

сети сверхвысокого напряжения (СВН) (330-750 кВ);

сети ультравысокого напряжения (УВН) 1150 кВ.

Линии СВН и УВН называются линиями межсистемной связи. Для таких линий характерна большая протяженность (свыше 500 км) и значительная передаваемая мощность (свыше 500 МВА) на одну цепь.

Линии ВН и СН (6-220 кВ) служат для передачи больших мощностей на расстояния в сотни км. Линии 110-220 кВ служат для связи электростанций в системе и для распределения электроэнергии между потребителями на расстояния десятков км.

Линии НН соединяют энергетическую систему непосредственно с потребителями небольшой мощности. Они используются и вне энергосистемы прямой связи источников тока низкого напряжения с отдельными токоприемниками низковольтными сетями.

По выполненным функциям различают: системообразующие, питающие и распределительные сети.

Системообразующие сети напряжением 330 ÷ 1150 кВ осуществляют функции формирования объединенных энергосистем, объединяя мощные электростанции и обеспечивая их функционирование как единого объекта управления, и одновременно обеспечивают передачу электроэнергии от мощных электростанций. Системообразующие сети осуществляют системные связи, т.е. связи очень большой длины между энергосистемами. Режимом системообразующих сетей управляет диспетчер объединенного диспетчерского управления (ОДУ), например ОДУ «Восток».

Основные преимущества объединения энергосистем:

1. Надежность работы. Если поврежден какой-то элемент (генератор, СТ или ЛЭП), то потребитель продолжает получать энергию от системы через другие неповрежденные элементы или при дефиците мощности в данной ЭС энергия может поступать по межсистемным связям от других энергосистем.

2. Использование несовмещения *max* нагрузок. У каждого потребителя или ЭС имеется свой *max* как по величине, так и по времени. В ОЭС использование этого несовмещения особенно эффективно. Например, если на Урале наступает ночь и электроосвещение отключается, то в Москве – вечер – в это время электроосвещение включается. Естественно, что высвободившуюся энергии в одной ЭС можно направить по ЛЭП в другую ЭС или туда, где есть в ней необходимость.

3. Меньшие резервы мощностей. В связи с возможностью передачи мощности из одной ЭС в другую резервы мощностей в каждой системе могут быть сокращены, что дает большой экономический эффект.

4. Совместная работа тепло- и гидростанций. Такая работа позволяет шире использовать станции с дешевым топливом. Т.к., источник энергии на ГЭС является вода, а летом, когда воды много, целесообразно использовать ГЭС, чтобы экономить топливо на ТЭС.

5. Использование более крупных агрегатов. Один агрегат большей мощности дешевле, чем несколько мелких такой же суммарной мощности. Применение небольших агрегатов, которые устанавливались ранее для резервирования, в условиях ЭС и тем более ОЭС становится нецелесообразным.

6. Большая маневренность. Она дает возможность переключения или отключения линий трансформаторов и изменения путей их питания.

Питающие сети предназначены для передачи электроэнергии от ПС системообразующей сети и частично от шин 110-220 кВ электростанций к центрам питания (ЦП) распределительных сетей – районным подстанциям. Питающие сети обычно замкнутые. Как правило, напряжение этих сетей ранее было 110-220 кВ. По мере роста плотности нагрузок, мощности электростанций и протяженности электросетей увеличивается напряжение распределительных сетей. Так, в последнее время напряжения питающих сетей иногда бывает 330-500 кВ.

Районная ПС имеет обычно высшее напряжение 110-220 кВ и низшее напряжение 6-35 кВ. На этой ПС устанавливают трансформаторы позволяющие регулировать под нагрузкой (РПН) напряжение на шинах низшего напряжения. Эти шины ЦП распределительной сети, которая присоединена к ним.

Распределительная сеть предназначена для передачи электроэнергии на небольшие расстояния от шин низшего напряжения районных ПС к промышленным, городским, сельским потребителям.

По характеру потребителя сети делятся на промышленные, городские и сельскохозяйственные. Дается характеристика таких сетей.

По конфигурации сети делятся на замкнутые и разомкнутые. Замкнутые сети делятся на простые замкнутые: кольцевые и сети с двухсторонним питанием, сложнзамкнутые сети; разомкнутые сети делятся на радиальные, магистральные, разветвленные.

По размерам территории сети делятся на местные (напряжением до 35 кВ) и районные (напряжением 110-220 кВ) – это распределительные сети; региональные (напряжением 330 кВ и выше).

По отношению к помещениям сети делятся на внутренние и наружные.

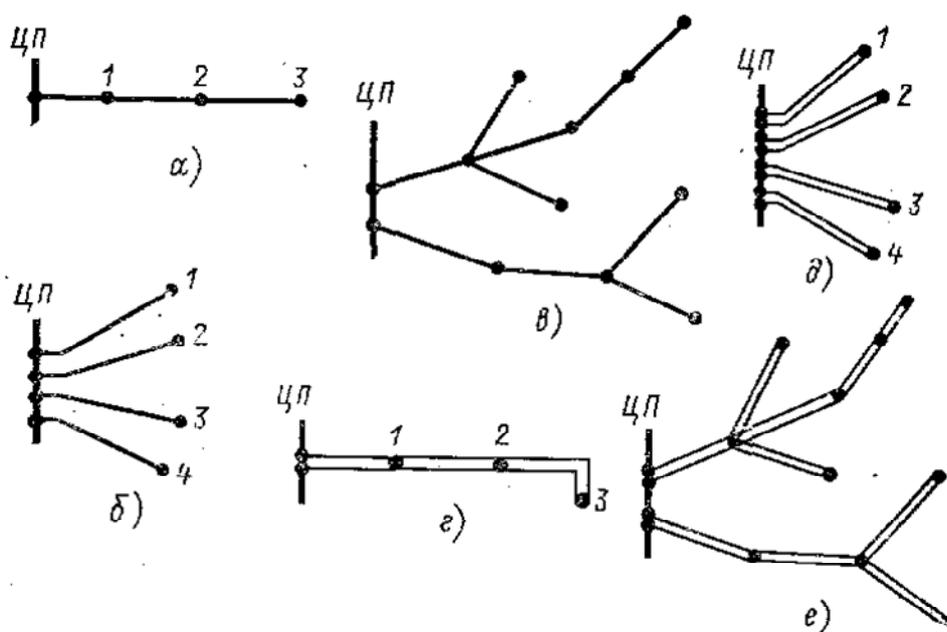
Лекция 3.

Схемы электрических сетей. Конфигурация электрических сетей.

Цель лекции: привести характеристику электрических сетей по схемам соединения и способам присоединения подстанций к сети, а также схем электрических соединений подстанций.

Схема соединения сети или конфигурация сети определяет соединение ветвей и узлов. Единой общепринятой классификации схем соединения сетей нет. Наиболее общим является разделение сетей по их схемам соединения на разомкнутые и замкнутые. Вторым важным признаком, по которому делятся схемы соединения сетей, является наличие или отсутствие резервирования. В разомкнутых сетях резервирование соответствует применению двух параллельных или двухцепных линий, нерезервированные разомкнутые сети выполняются одноцепными линиями. В свою очередь разомкнутые и замкнутые сети могут выполняться по различным типам схем соединения, имеющим свои особенности.

Рассмотрим более подробно различные типы схем соединения электрических сетей, приведенных на рис.



Схемы разомкнутых сетей:

а, б, в – магистральная, радиальная и радиально-магистральная нерезервированные; *г, д, е* – магистральная, радиальная и радиально-магистральная резервированные

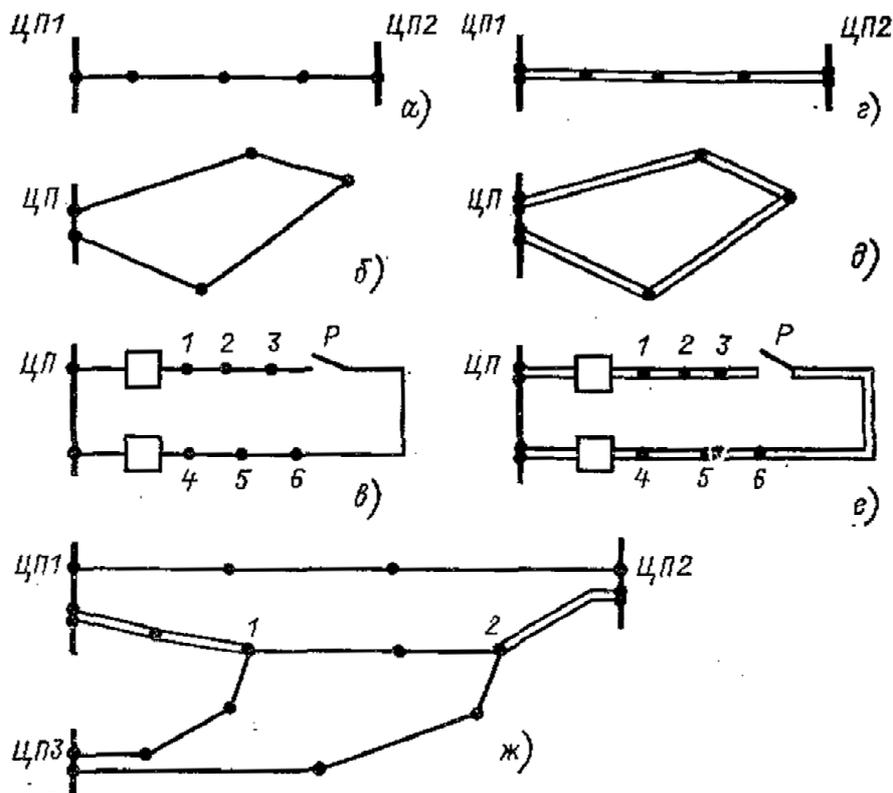
Сети также делятся на резервированные и нерезервированные. Нерезервированные разомкнутые сети выполняются одноцепными линиями, резервные – двумя параллельными или двухцепными линиями.

Разомкнутые цепи делятся на радиальные, магистральные, радиально-магистральные или разветвленные.

Замкнутые сети – это резервированные сети. Здесь потребитель получает питание не менее чем по двум ветвям. Замкнутые сети делятся на простые замкнутые и сложнзамкнутые.

В простых замкнутых каждый узел питается не более чем по двум ветвям, в

сложнозамкнутых сетях – несколько контуров.



Простые замкнутые и сложнозамкнутые сети:

а — одноцепная линия с двухсторонним питанием; б — одноцепная кольцевая; в — одноцепная петлевая; г — двухцепная линия с двухсторонним питанием; д — двухцепная кольцевая; е — двухцепная петлевая; ж — сложнозамкнутая

Способ присоединения подстанции к сети определяет схема подстанции. По способу присоединения к сети подстанции делятся на:

- тупиковые, т.е. присоединенные в конце сети;
- ответвленные, т.е. питающиеся от ответвлений;
- проходные, т.е. присоединенные по схеме заход-выход (заход на нее линии с двухсторонним питанием);
- узловые, т.е. присоединенные к сети не менее чем по трем линиям.

Транзитные ПС – это те подстанции, через которые осуществляется переток мощности между отдельными точками сети.

Схемы электрических соединений ПС приведены в [6].

Лекция 4.

Конструкция воздушных линий электропередачи.

Цель лекции: дать характеристику конструктивного исполнения воздушных линий электропередачи.

Основные конструктивные элементы ВЛ: провода, тросы, опоры, изоляторы и линейная арматура.

Провода служат для передачи электроэнергии. Грозозащитные тросы нужны для защиты от перенапряжений. Опоры поддерживают провода и тросы на определенной высоте над уровнем земли или воды. Изоляторы изолируют провода от опоры. С помощью линейной арматуры провода закрепляются на изоляторах, а изоляторы на опорах.

На ВЛ применяют неизолированные провода алюминиевые, сталеалюминиевые.

Различают алюминиевые провода марок А, АН, АЖ, сталеалюминиевые марок – АС, АСК, АСКП, АСКС.

Далее приводится конструкция, краткая характеристика и область применения каждой марки проводов.

Сечение провода маркируется следующим образом 1120/19, где числитель – сечение алюминиевой части, а знаменатель – стального сердечника.

Сейчас широко применяются самонесущие изолированные провода (СИП).

Лекция 5.

Опоры ВЛ. Изоляторы и линейная арматура.

Цель лекции: рассмотреть конструктивное исполнение, область применения и характеристику опор ВЛ, изоляторов и линейной арматуры.

Опоры делятся на анкерные и промежуточные, которые различаются способом подвески проводов. Опоры анкерного типа служат для натяжения проводов, промежуточные – для поддержки проводов.

Расстояние между промежуточными опорами называется промежуточным пролетом, между анкерными – анкерным пролетом.

Анкерные опоры предназначены для жесткого закрепления проводов в особо ответственных точках ВЛ.

Угловые опоры устанавливаются в точках поворота линии. Углом поворота линии называется угол в плане линии, дополняющей до 180° внутренний угол линии. Угловые опоры также делятся на промежуточные и анкерные.

К опорам специального назначения относятся транспозиционные – для изменения расположения проводов на опорах; ответвительные – для выполнения ответвлений от основной линии; переходные – для пересечения рек, ущелий и т.д.

Различают следующие положения проводов на опорах: треугольником, горизонтальное, обратный елкой, бочкой.

По материалу опоры делятся на деревянные, металлические и железобетонные.

Металлические опоры делятся на порталные, башенные или одностоечные, свободно стоящие и на оттяжках, V-образные опоры типа «Набла».

Далее приводится конструкция и область применения каждого вида опор.

В настоящее время применяются унифицированные опоры.

Изоляторы по материалу делятся на стеклянные, фарфоровые и полимерные. По конструкции их различают на штыревые и подвесные. Рассматриваются основные типы линейных изоляторов, дается их характеристика.

Линейная арматура включает следующие основные виды: зажимы для закрепления проводов в гирляндах изоляторов, сцепная арматура для подвески гирлянд на опорах и соединения их друг с другом, соединителем для соединения проводов и тросов в пролете, гасителем вибрации или демпфирующие петли для уменьшения вибрации и излома проводов, распорки для фиксации проводов расщеплений фазы относительно друг друга.

Зажимы делятся на поддерживающие и натяжные.

Сцепная арматура включает скобы, серьги, ушки. Соединители делятся на овальные и прессуемые.

Лекция 6.

Кабельные линии.

Цель лекции: рассмотреть классификацию и конструктивное исполнение кабельных линий.

Различают силовые, контрольные кабели и кабели управления.

Силовые кабели состоят из одной или нескольких токоведущих жил, изоляции фазной и поясной, защитной оболочки, брони, наружного защитного покрова. Между защитной

оболочкой и броней может быть подушка под броней.

Токопроводящие жилы изготавливают из алюминия или меди.

Изоляция выполняется бумажной, пропитанной маслом, полиэтиленовой, резиновой.

Защитные оболочки, накладываемые поверх изоляции для ее предохранения от влаги и воздуха, бывают свинцовыми, алюминиевыми, поливинилхлоридными.

Броня изготавливается из стальных лент или проволок.

Подушка под броней – это джутовая прослойка из хлопчатобумажной пропитанной пряжи или из кабельной сульфатной бумаги.

Наружный защитный покров может быть из джута, пропитанного антикоррозийным составом или шланга.

Далее рассматриваются конструкции кабелей разных классов номинального напряжения.

Принципы формирования марки кабелей:

1 -	2 -	3 -	4 -	5 -	6
жила	изоляция	оболочка	подушка под броней	броня	наружный покров

Газонаполненные кабели – это кабели с изолирующей бумагой, пропитанной небольшим количеством компаунда и наполненные инертным газом (азот).

Маслонаполненные кабели 110 и 220 кВ бывают высокого и низкого давления с масляным каналом внутри жилы или в трубе, заполненной маслом.

К новым конструкциям кабелей относятся криогенные кабельные линии, ГИЛы (газоизолирующие линии), кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Приводится их характеристика и конструкция, маркировка.

Лекция 7.

Кабельная арматура, прокладка кабелей.

Цель лекции: показать способы соединения кабельных отрезков и условия прокладки кабелей.

Кабельная арматура предназначена для соединения строительных длин (отдельных отрезков) кабеля, а также для присоединения концов кабелей к аппаратуре или шинам распределительных устройств.

Арматура для соединения отрезков кабелей – соединительные муфты. Арматура для оконцевания кабелей – концевые муфты и концевые заделки. Их основное назначение – герметизация кабелей в местах соединений и оконцеваний.

Рассматривается конструктивное исполнение соединительных и концевых муфт. Приводится классификация муфт по назначению и дается характеристика стопорных, ответвленных и других муфт. Показывается принцип маркировки муфт и приводятся наиболее распространенные марки.

Прокладка кабелей осуществляется внутри и вне помещений.

Способы прокладки кабелей: в траншеях, туннелях, блоках, галереях. Приводится назначение каждого из этих способов и указывается количество кабелей, проложенных при каждом из этих способов. Дается характеристика каждого способа прокладки.

Лекция 8.

Схемы замещения линий электропередачи.

Цель лекции: рассмотреть схемы замещения и их параметры для ВЛ и КЛ, показать как определяются параметры схемы замещения ВЛ и КЛ.

Линии электропередачи обладают распределенными по длине погонными (на единицу длины) параметрами. Для линий сравнительно небольшой длины (до 400 км) распределенность параметров можно не учитывать и использовать сосредоточенные

параметры: активное и индуктивное сопротивления линии r_l и x_l , активную и емкостную проводимость линии g_l и b_l .

Целью расчета параметров схемы замещения линий электропередачи (ЛЭП) является определение продольных активного и индуктивного сопротивлений, а также поперечных активной и емкостной проводимостей на землю для каждой из трех фаз ЛЭП.

Применяемые конструктивные исполнения ЛЭП таковы, что можно полагать параметры схем замещения каждой фазы электропередачи одинаковыми, что позволяет выполнять графическое изображение схемы замещения только для одной фазы ЛЭП.

Для воздушных ЛЭП напряжением 110 кВ и выше длиной до 400 км используется П-образная схема замещения (рис. 1).

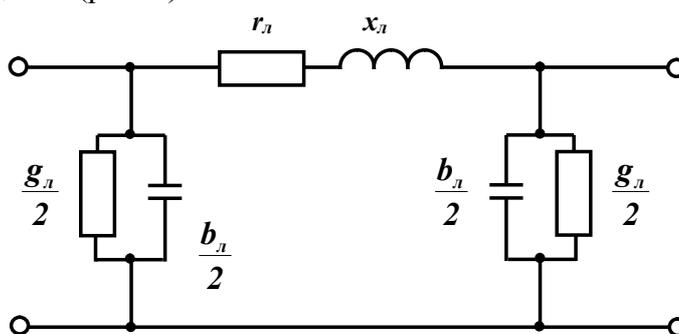


Рис. 1. П-образная схема замещения воздушной ЛЭП

Активное сопротивление линии определяется по формуле:

$$r_l = r_0 \cdot l, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где r_l - погонное сопротивление, Ом/км, при температуре провода $+20^0$ С;

l - длина линии, км.

Активное сопротивление единицы длины провода (жила кабеля) определяется материалом токоведущих проводников и площадью их сечения и при частоте переменного тока 50 Гц принимается равным омическому (явление поверхностного эффекта начинает сказываться при сечениях более 500 мм^2):

$$r_0 = \frac{\rho}{F}, \text{ Ом / км} \quad (2)$$

или

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot F}, \text{ Ом / км}, \quad (3)$$

где F - поперечное сечение провода или жилы кабеля, мм^2 ;

ρ - удельное сопротивление $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$;

γ - удельная проводимость, $\text{м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$.

Для алюминия $\rho = 28,9 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$, $\gamma = 34,6 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

для меди $\rho = 18,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$, $\gamma = 53,0 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

для сталеалюминиевых проводов $\rho = 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$; $\gamma = 31,7 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$.

При температуре, отличной от 20^0 С, сопротивление линии уточняется по выражению:

$$r_{0,t} = r_0 \cdot [1 + \alpha_T(t - 20)], \text{ Ом}, \quad (4)$$

где α_T - температурный коэффициент, $1 / ^\circ\text{C}$, равный $0,004$ для сталеалюминиевых проводов;

$\alpha_T = 0,0043 \text{ } 1 / ^\circ\text{C}$ для медных проводов;

t - температура провода, $^\circ\text{C}$.

Активное сопротивление стальных проводов зависит от тока и находится по таблицам, в зависимости от поперечного сечения.

Индуктивное сопротивление фазы линии определяется следующим образом:

$$x_l = x_0 \cdot l, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где x_0 - погонное индуктивное сопротивление, Ом/км.

Погонные индуктивные сопротивления фаз воздушной линии электропередачи в общем случае различны. Они зависят от взаимного расположения проводников и их геометрических размеров.

Переменный ток, проходя по линии, образует вокруг проводников переменное магнитное поле, которое наводит в проводнике ЭДС. Сопротивление току, вызываемое противодействием ЭДС самоиндукции, называется индуктивным сопротивлением.

В проводе одной из фаз трехфазной линии токи соседних проводов наводят ЭДС взаимной индукции, которая приводит к уменьшению индуктивного сопротивления. Поэтому чем дальше друг от друга расположены фазные провода, тем меньше будет влияние соседних проводов и, следовательно, больше поток рассеяния между проводами и индуктивное сопротивление.

При расчетах симметричных режимов погонное индуктивное сопротивление определяется зависимостью:

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \left(\frac{D_{cp}}{R} \right) + 0,0157 \mu, \text{ Ом/км}, \quad (6)$$

где D_{cp} - среднегеометрическое расстояние между фазными проводами, мм;

R - радиус провода, мм;

μ - относительная магнитная проницаемость материала провода.

Для алюминиевых, сталеалюминиевых и медных проводов принимается $\mu = 1$.

Значения индуктивных сопротивлений единицы длины проводов различного сечения варьируются в зависимости от среднегеометрического расстояния между фазами.

Среднегеометрическое расстояние между фазами определяется зависимостью:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где D_{AB} ; D_{BC} ; D_{CA} - расстояние между проводами соответствующих фаз, м.

Например, при расположении фаз по вершинам равностороннего треугольника со стороной D среднегеометрическое расстояние равно D , а при горизонтальном расположении проводов $D_{cp} = \sqrt[3]{2D}$ (см. рис. 2).

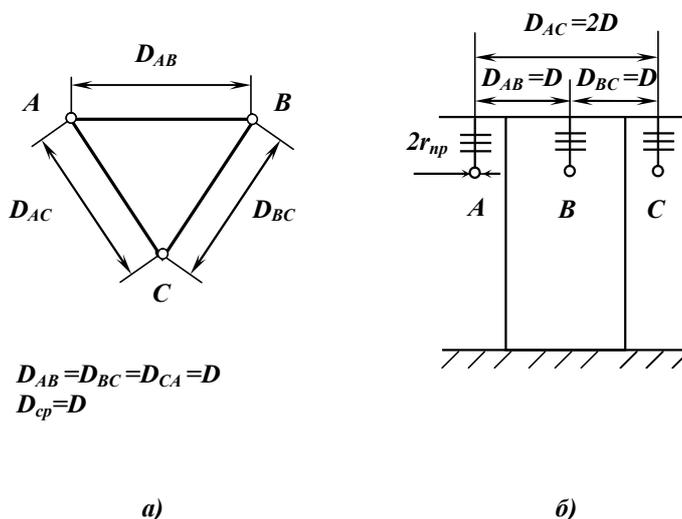


Рис. 2. Расположение проводов линии электропередачи: а) по вершинам равностороннего треугольника; б) при горизонтальном расположении фаз.

Расстояния между фазами определяются изоляционными промежутками в зависимости от класса напряжения (см. табл. 1).

Таблица 1. Усредненные среднегеометрические расстояния между фазными проводами воздушных линий

Класс напряжения, кВ	35	110	150	220	330	500	750
Среднегеометрическое расстояние, м	3,5	5	6,5	8	11	14	19,5

При несимметричном расположении проводов ЭДС самоиндукции и взаимной индукции проводов отдельных фаз неодинаковы, что приводит к различию их сопротивлений. Для выравнивания сопротивлений отдельных фаз применяется способ взаимной перестановки мест проводов на опоре. Такая перестановка называется транспозицией.

Для уменьшения индуктивного сопротивления проводов, а также исключения явления “короны” при нормальных климатических условиях в линиях электропередачи напряжением выше 220 кВ применяют расщепление провода. Каждая фаза линии при этом содержит два и более провода, связанных дистанционными распорками длиной 30 - 60 см.

В формулу (6) в этом случае вводится не радиус провода R , а эквивалентный радиус провода, $R_{э\kappa}$. При количестве проводов в расщеплении n он определяется по формуле:

$$R_{э\kappa} = \sqrt[n]{R \cdot a^{n-1}}, \quad (8)$$

где n - число проводов в фазе;

a - расстояние между осями проводов в расщепленной фазе, мм.

Например, при расщеплении провода на 4:

$$R_{э\kappa} = \sqrt[4]{R \cdot a^3}. \quad (9)$$

Погонное индуктивное сопротивление, Ом/км, при расщеплении провода в фазе определяется по формуле:

$$x_0 = 0,1445 \lg \left(\frac{D_{cp}}{R_{э\kappa}} \right) + \frac{0,0157}{n}. \quad (10)$$

Для стальных проводов погонное индуктивное сопротивление, Ом/км, определяется в условиях, когда μ (см. выражение (6)) не равно единице. Первая составляющая, которую называют внешним индуктивным сопротивлением x_0' , равна

$$x_0' = 0,1445 \cdot \lg \left(\frac{D_{cp}}{R} \right). \quad (11)$$

Вторая составляющая, называемая внутренним сопротивлением, зависит от тока, протекающего по проводу, и равна

$$x_0'' = 0,0157 \cdot \mu. \quad (12)$$

Индуктивное сопротивление стальных проводов:

$$x_0 = x_0' + x_0''. \quad (13)$$

Для кабельных линий погонное индуктивное сопротивление x_0 определяют из таблиц физико-химических данных.

В приближенных расчетах можно пользоваться средними значениями погонных индуктивностей, которые равны:

- для воздушных ЛЭП напряжением до 330 кВ $x_{0cp} = 0,4$ Ом / км; напряжением до 1150 кВ $x_{0cp} = 0,3$ Ом / км;
- для кабельных ЛЭП с бумажной изоляцией $x_{0cp} = 0,08$ Ом / км.

Активная проводимость линии электропередачи g_0 определяется потерями активной мощности на “корону” и в незначительной степени активной проводимостью изоляции. Для кабелей активная проводимость определяется только потерями в диэлектрике изоляции от тока утечки через диэлектрик, т.к. “корона” отсутствует.

Коронирование проводов возникает при интенсивной ионизации окружающего провод воздуха. Особенно интенсивно коронируют провода в сырую погоду. “Корона” (фиолетовое свечение на поверхности провода и потрескивание электрических разрядов) возникает, когда на поверхности провода напряженность электрического поля (его градиент) превышает электрическую прочность воздуха, т.е.:

$$E_{нов} \geq E_{кор},$$

где $E_{кор} = 30 \div 32 \text{ кВ/см}$.

Наиболее радикальным средством снижения потерь мощности на “корону” является увеличение диаметра (сечения) провода, т.к.:

$$E_{нов} = \frac{U}{F}. \quad (14)$$

Расчет погонной активной проводимости для воздушных линий производится по формуле:

$$g_0 = \left(\frac{\Delta P_0}{U_\phi^2} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ См/км}, \quad (15)$$

где ΔP_0 - потери активной мощности на “корону” на 1 км, кВт;

U_ϕ - напряжение фазы, кВ.

Потери на “корону” имеют место в том случае, когда рабочее напряжение линии превышает максимальное напряжение, при котором загорается “корона”. Его называют критическим напряжением “короны” $U_{кф}$.

Для проводов, расположенных по вершинам треугольника:

$$U_{кф} = 48,9 \cdot m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot R \cdot \lg \left(\frac{D_{cp}}{R} \right), \text{ кВ}, \quad (16)$$

где m_0 - коэффициент, учитывающий состояние поверхности провода (для однопроволочных проводов $m_0 = 0,93 \div 0,97$, для многопроволочных $m_0 = 0,83 \div 0,87$);

m_n - коэффициент, учитывающий состояние погоды (при сухой погоде $m_n = 1$, при дожде, тумане или гололеде $m_n = 0,8$);

R - радиус провода или эквивалентный радиус провода (при расщеплении фазы), см;

δ - коэффициент, учитывающий уровень барометрического давления и температуру окружающей среды.

Коэффициент δ определяется выражением:

$$\delta = \frac{3,92 \cdot b}{273 + t}, \quad (17)$$

где b - атмосферное давление в см. рт. ст.;

t - температура окружающей среды, °С.

При $b = 76 \text{ см рт. ст.}$ и $t = 25^\circ \text{ С}$ коэффициент δ равен 1.

Для проводов, расположенных горизонтально:

$$U'_{кф} = 0,96 U_{кф} \text{ - для среднего провода;}$$

$$U'_{кф} = 1,06 U_{кф} \text{ - для крайнего провода.}$$

Потери мощности на “корону” определяются из выражения:

$$\Delta P_0 = \left(\frac{0,18}{\delta} \right) \cdot \sqrt{\frac{R}{D_{cp}}} \cdot (U_\phi - U_{кф})^2, \text{ кВт/км.} \quad (18)$$

Для исключения условий возникновения “короны” определены минимальные сечения и диаметры проводов для различных номинальных напряжений (см. табл. 2).

Таблица 2. Минимальные сечения и диаметры сталеалюминиевых проводов по условиям “короны”

Номинальное напряжение, кВ	Количество проводов в фазе	Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²
110	1	11,3	70
150	1	15,2	120
220	1	21,6	240
330	2	23,5*	300
500	3	25,2*	300
750	4	29*	400

* При расстоянии между проводами в фазе 400 - 600 мм.

Активная проводимость кабельной линии рассчитывается по формуле:

$$g_0 = \left(\frac{\Delta P_0'}{U_\phi^2} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ См/км,} \quad (19)$$

где $\Delta P_0'$ - потери активной мощности в изоляции, отнесенные к одной фазе и определяемые зависимостью

$$\Delta P_0' = U_\phi^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \text{tg} \delta, \quad (20)$$

здесь C_0 - удельная рабочая емкость кабеля, Ф/км;

$\text{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции при фазном напряжении.

Активная проводимость линии равна:

$$g_l = g_0 \cdot l. \quad (21)$$

Погонная емкостная проводимость b_0 , См / км, как воздушных линий, так и кабельных, обусловлена наличием емкостей между проводом и землей, а также между фазными проводами. Она рассчитывается по формуле:

$$b_0 = \left(\frac{7,58}{\text{lg} \frac{D_{cp}}{R}} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (22)$$

Благодаря наличию емкостей линия становится источником реактивной мощности. Реактивная мощность, генерируемая линией (зарядная мощность), определяется зависимостью:

$$Q_c = \frac{1}{2} \cdot U^2 b_0 \cdot l, \text{ квар,} \quad (23)$$

где l - длина линии.

Комплекс полного сопротивления единицы длины линии содержит действительную часть в виде погонного активного сопротивления и мнимую - в виде погонного индуктивного сопротивления

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0, \quad (24)$$

следовательно, модуль полного сопротивления определяется как:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}. \quad (25)$$

Комплекс полной поперечной проводимости единицы длины линии записывается следующим образом:

$$\underline{y}_0 = g_0 - jb_0, \quad (26)$$

а ее модуль

$$y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}. \quad (27)$$

Для определения каждого сопротивления и проводимости в схеме замещения линии необходимо значение величин сопротивлений, отнесенных к единице длины линии, умножить на длину линии l , км.

При расчете установившихся режимов сетей до 220 кВ включительно активная проводимость практически не учитывается (см. рис. 3а). Для большинства расчетов в сетях 110 - 220 кВ линия электропередачи обычно представляется более простой схемой замещения, в которой активная проводимость не учитывается, а вместо емкостной проводимости учитывается реактивная мощность, генерируемая емкостью линий (см. рис. 3б).

В сетях с $U_{ном} \geq 330$ кВ при определении потерь мощности и при расчете оптимальных режимов необходимо учитывать потери на “корону”, т.е. ее активную проводимость.

Для воздушных линий $U_{ном} \leq 35$ кВ в схеме замещения присутствуют только активные и индуктивные сопротивления (см. рис. 3в).

Для двухцепных ЛЭП схема замещения такая же, как и для одноцепных, но сопротивления линии вдвое меньше, а проводимости вдвое больше.

Кабельные линии электропередачи представляют такой же П-образной схемой замещения, как и воздушные линии (рис. 1).

При расчетах режимов для кабельных сетей с $U_{ном} \leq 10$ кВ можно учитывать только активное сопротивление (см. рис. 3г). В схемах замещения кабельных линий высокого напряжения необходимо учитывать Q_c , и при напряжении ≥ 220 кВ - активную проводимость g_l .

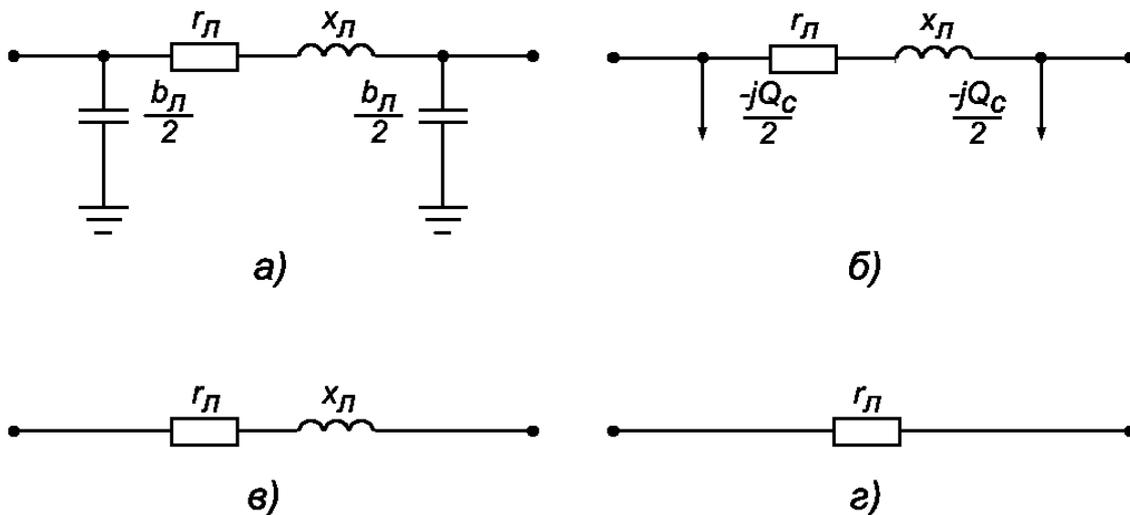


Рис. 3. Схемы замещения линий электропередачи:

- а), б) воздушная линия 110-220 кВ с емкостной проводимостью и с реактивной мощностью, генерируемой емкостью линии;
- в) воздушная или кабельная линия напряжением ≤ 35 кВ;
- г) кабельная линия напряжением ≤ 10 кВ.

Лекция 9.

Трансформаторы и автотрансформаторы. Схемы замещения двухобмоточных трансформаторов.

Цель лекции: дать характеристику трансформаторов и автотрансформаторов как элементов электрической сети и показать каким образом замещаются двухобмоточные силовые трансформаторы при расчете установившихся режимов.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются основным электрическим оборудованием, обеспечивающим передачу электрической энергии от электростанций к потребителям и ее распределение.

С помощью трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется повышение напряжения до значений 35; 110; 220; 330; 500; 750 кВ, необходимых для линий электропередачи, а также многократное ступенчатое понижение напряжения до значений, при которых работают электроприемники: 20; 10; 6; 0,66; 0,38; 0,22 кВ.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, однофазные и трехфазные, выпускаются номинальной мощностью, кратной 10, 16, 25, 40, 63 кВА. Трансформаторы могут быть двух- и трехобмоточные, а также с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов и автотрансформаторов определяются на основе каталожных данных. Для двухобмоточных трансформаторов используются следующие каталожные данные:

номинальная мощность трансформатора, $S_{т ном}$;

напряжение обмотки высокого напряжения, $U_{вн}$;

напряжение обмотки низкого напряжения, $U_{нн}$;

потери активной мощности в режиме короткого замыкания, $\Delta P_{к}$;

напряжение короткого замыкания, $u_{к}$;

потери активной мощности в режиме холостого хода, $\Delta P_{х}$;

ток холостого хода, $I_{х}$.

Номинальной называют мощность трансформатора, которой он может быть нагружен при номинальных температурных условиях охлаждающей среды.

Номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток - это напряжения между выводами обмоток при холостом ходе трансформатора.

В режиме короткого замыкания (КЗ) одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а по другой протекает ток, равный номинальному, при некотором приложенном напряжении $u_{к}$, которое и называется напряжением короткого замыкания. Оно меньше номинального и выражается в процентах от него отношением:

$$u_{к, \%} = \frac{u_{к}}{U_{вн}} 100\%. \quad (28)$$

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, практически целиком расходуется на нагрев его обмоток, а потери в стали ничтожны из-за малого значения приложенного напряжения $u_{к}$, т.к. потери в стали пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому приближенно считают, что все потери мощности в опыте КЗ $\Delta P_{к}$ идут на нагрев обмоток трансформатора, т.е.:

$$\Delta P_{к} = 3I_{ном}^2 \cdot R_{м} = \frac{S_{т ном}^2}{U_{вн}^2 \cdot R_{м}}, \quad (29)$$

где $R_{м}$ - активное сопротивление трансформатора.

В режиме холостого хода первичная обмотка включается на номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Потребляемый из сети ток называется током холостого хода. Он выражается в процентах от номинального тока первичной обмотки, $I_{в ном}$:

$$I_{x,\%} = \frac{I_x}{I_{\text{ном}}} 100\%. \quad (30)$$

Мощность потерь в режиме холостого хода складывается из мощности потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис, ΔP_x ; мощности, идущей на намагничивание стали, ΔQ_x ; мощности потерь в первичной обмотке, обусловленных током холостого хода. Но при холостом ходе $I_x \ll I_{\text{ном}}$, - следовательно, мала мощность потерь в первичной обмотке по сравнению с потерями в магнитопроводе. Поэтому для трансформаторов с номинальной мощностью более 1 кВА учитываются только потери в стали:

$$\Delta S_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x. \quad (31)$$

Состав каталожных данных для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов имеет следующие отличия от перечисленных выше.

Для трехобмоточных трансформаторов указывают напряжения всех трех обмоток: высокого $U_{\text{вн}}$, среднего $U_{\text{сн}}$, низкого $U_{\text{нн}}$, а также соотношение мощностей обмоток в процентах от $S_{\text{ном}}$: $100/100/100\%$; $100/100/66,7\%$ или $100/66,7/66,7\%$.

Если мощности обмоток неодинаковы, то даются три значения потерь мощности короткого замыкания: $\Delta P_{\text{к, в-н}}$; $\Delta P_{\text{к, с-н}}$; $\Delta P_{\text{к, в-с}}$, %, каждое из которых соответствует опыту для двух обмоток (третья разомкнута), и при этом указанные значения отнесены к номинальной мощности менее мощной обмотки.

Указываются три относительных значения напряжения короткого замыкания: $u_{\text{к, в-н}}$; $u_{\text{к, в-с}}$; $u_{\text{к, с-н}}$, %, так как для трехобмоточных трансформаторов режим КЗ выполняется для всех возможных сочетаний обмоток. При этом если мощности обмоток не одинаковы, то приводимые значения отнесены к номинальному току менее мощной обмотки.

Паспортные данные трансформаторов с расщепленной обмоткой такие же, как и у двухобмоточных.

Автотрансформаторы изготавливаются на номинальное напряжение 150 ÷ 750 кВ и применяются для связи электрических сетей и их элементов, когда не требуется большой коэффициент трансформации, $K_{\text{АТ}} \leq 2$.

Все автотрансформаторы имеют соединение трех фаз обмоток ВН и СН в звезду и образуют общую для обоих напряжений нулевую точку, заземляемую наглухо (рис. 5). У автотрансформатора обмотки ВН (AX) и СН (aX) электрически связаны, а обмотка НН имеет с обмотками ВН и СН обычную трансформаторную связь. Часть фазной обмотки, заключенная

между выводами A и a (B и b , C и c), называется последовательной, а между выводами a и X (b и Y , c и Z) - общей. На рис. 5 показано распределение токов в одной фазе при работе автотрансформатора в понижающем режиме.

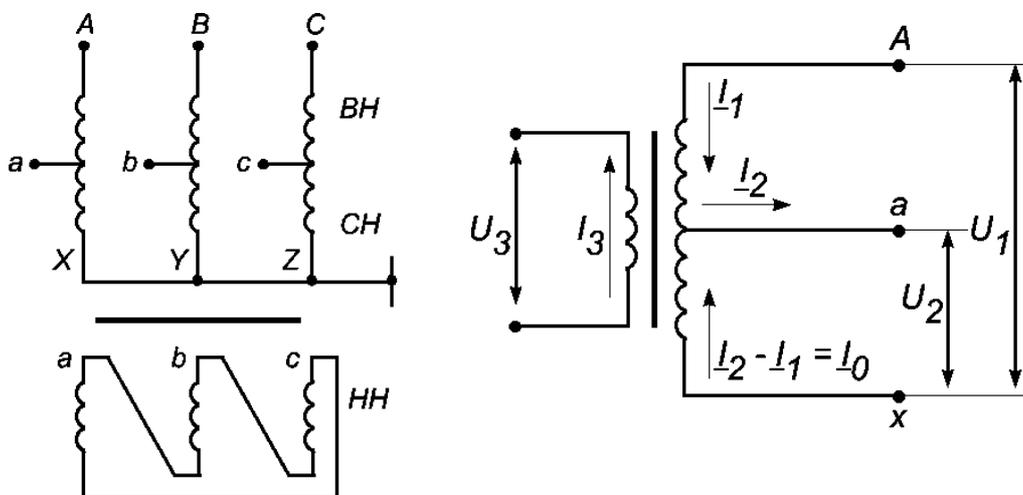


Рис. 5. Схема соединений обмоток автотрансформатора

Здесь \underline{I}_1 - ток последовательной обмотки, магнитный поток которого наводит в общей обмотке ток \underline{I}_0 , равный

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_2 - \underline{I}_1, \quad (32)$$

где \underline{I}_2 - ток вторичной цепи.

У понижающих автотрансформаторов мощность последовательной обмотки называется типовой S_m и равна мощности общей обмотки:

$$S_m = \sqrt{3} I_1 \cdot (U_1 - U_2) = \sqrt{3} (I_2 - I_1) \cdot U_2; \quad (33)$$

$$S_m = \sqrt{3} I_1 \cdot U_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right) = S_{ATном} \left(1 - \frac{1}{K_{AT}} \right), \quad (34)$$

где $K_{AT} = U_1 / U_2$.

Очевидно, что $S_m < S_{ATном}$, поэтому выражение $(1 - 1/K_{AT})$ называют коэффициентом выгоды, α . Тогда $S_m = \alpha \cdot S_{ATном}$.

Типовая мощность - это та часть мощности автотрансформатора, которая передается электромагнитным путем. Как известно, размеры, масса, расход активных материалов определяются главным образом электромагнитной мощностью, поэтому по сравнению с трансформаторами той же мощности у автотрансформаторов меньшие размеры, меньший расход металла, ниже стоимость, меньшие потери мощности.

В паспортных данных напряжение короткого замыкания и потери мощности в режиме КЗ для автотрансформатора даются заводами - изготовителями: между обмотками ВН и СН - $u_{к в-с}$, $\Delta P_{к в-с}$ отнесенные к номинальной мощности, а между обмотками ВН и НН - $u_{к в-н}$, $\Delta P_{к в-н}$, и СН-НН - $u_{к с-н}$, $\Delta P_{к с-н}$ - отнесенные к типовой мощности.

В схемах замещения электрических сетей двухобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы при ненагруженной обмотке низкого напряжения представляются в виде Г-образной схемы замещения, где ветвь намагничивания включена со стороны выводов обмотки высокого напряжения - в отличие от курса электрических машин, где схема замещения Т-образная. Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 6.

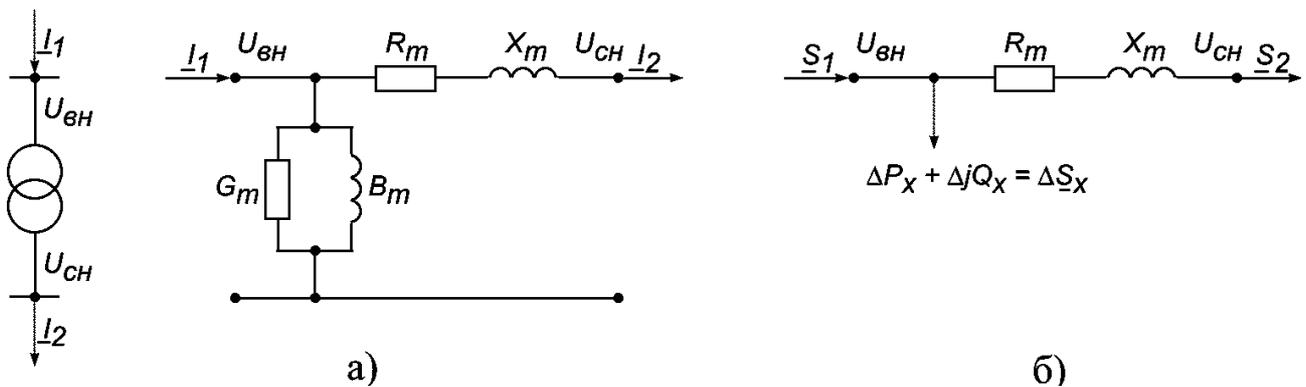


Рис. 6. Г-образная схема замещения трансформатора.

На рис. 6 поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности ХХ.

При номинальном напряжении первичной обмотки $U_{вн} \geq 330 \text{ кВ}$ используется схема, показанная на рис. 6а, а при номинальном напряжении $U_{вн} \leq 220 \text{ кВ}$ ветвь намагничивания в схеме замещения заменяется постоянным отбором мощности, равным суммарным потерям холостого хода (см. рис. 6б).

Активное сопротивление в схеме замещения равно сумме сопротивления первичной обмотки R_1 и сопротивления вторичной обмотки R'_2 , приведенного к первичной, т.е.

$$R_m = R_1 + R'_2 \quad (35)$$

и для одной фазы определяется по выражению:

$$R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}^2} \quad (36)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно сумме индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки X_1 и приведенного к ней индуктивного сопротивления вторичной обмотки X'_2 , т.е.

$$X_m = X_1 + X'_2 \quad (37)$$

Оно определяется по формуле:

$$X_m = \frac{u_{p, \%} \cdot U_{вн}^2}{100 \cdot S_{т ном}}, \quad (38)$$

где $u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2}$ - индуктивная составляющая напряжения КЗ, равная падению напряжения на индуктивном сопротивлении трансформатора;

u_a - активная составляющая напряжения КЗ, равная:

$$u_{a, \%} = \frac{\sqrt{3} I_{вн} R_m}{U_{вн}} \cdot 100\% = \frac{\Delta P_k}{S_{т ном}} \cdot 100\%, \quad (39)$$

где $I_{вн}$ - номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

Для современных мощных трансформаторов $R_m \ll X_m$ и $u_p \approx u_k$.

Следовательно:

$$X_m = \frac{u_{k, \%} \cdot U_{вн}^2}{100 \cdot S_{т ном}} \quad (40)$$

Активная проводимость обусловлена потерями активной мощности в стали трансформатора на гистерезис и вихревые токи и определяется (для одной фазы) как

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} \quad (41)$$

Индуктивная проводимость обусловлена основным магнитным потоком и учитывает потери реактивной мощности, расходуемые на намагничивание сердечника трансформатора. Она определяется по выражению:

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{вн}^2}, \quad (42)$$

где ΔQ_x - потери реактивной мощности, определяемые реактивной составляющей вектора тока холостого хода, т.е.

$$I_{x, p} = \sqrt{I_x^2 - I_{x, a}^2} \quad (43)$$

Но ввиду малости составляющей $I_{x, a} \ll I_x$ принимают $I_{x, p}$ равным модулю вектора тока холостого хода, т.е.

$$\Delta Q_x = \frac{I_{x, \%}}{100} \cdot S_{т ном} \quad (44)$$

При параллельной работе двух или более одинаковых трансформаторов ($n_m \geq 2$) параметры схемы замещения определяются выражениями:

$$\underline{Z}_{m\Sigma} = \frac{R_m + jX_m}{n_m}, \quad (45)$$

$$\underline{Y}_{m\Sigma} = n_m (G_m + jB_m) \quad (46)$$

или

$$\underline{\Delta S}_x = n_m (\Delta P_x + j\Delta Q_x) \quad (47)$$

Лекция 10.

Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

Цель лекции: показать каким образом замещаются трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы при расчете установившихся режимов.

Трехобмоточные трансформаторы в схемах замещения электрических сетей представляются трехлучевой звездой; в зависимости от номинального напряжения (как и для двухобмоточных трансформаторов) либо с ветвью намагничивания (рис. 7а), либо с заменой ее постоянным отбором мощности в режиме холостого хода (рис. 7б).

Согласно действующему стандарту соотношение между мощностями отдельных обмоток ВН/СН/НН в современных трехобмоточных трансформаторах одинаково, поэтому в паспортных данных приводятся общие потери короткого замыкания, по которым определяется общее активное сопротивление трансформатора:

$$R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_n^2}{S_{\text{ном}}^2}, \quad (48)$$

где U_n - номинальное напряжение той обмотки, к которой приводят сопротивление трансформатора. В основном это напряжение обмотки ВН.

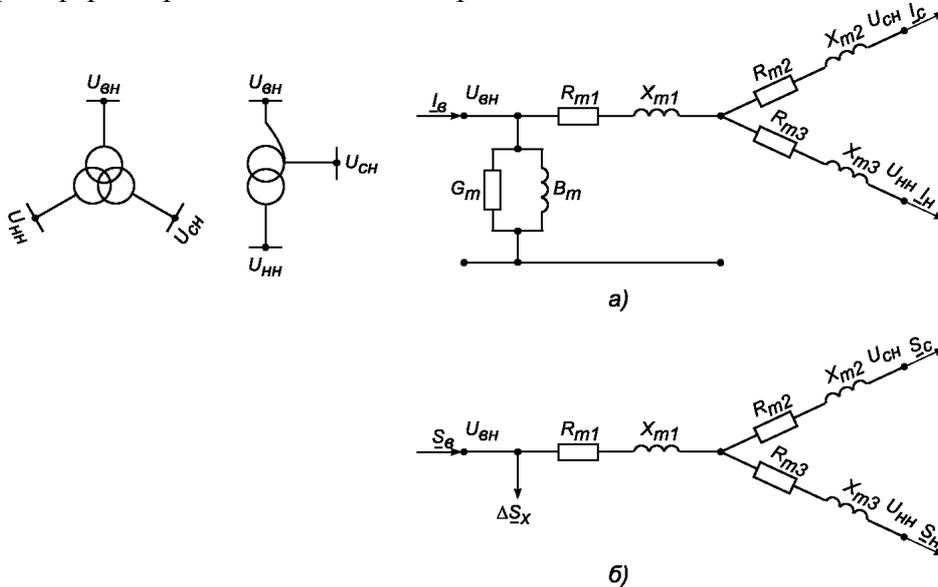


Рис. 7. Схема замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

На рис. 7 поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности XX.

Тогда активное сопротивление каждой обмотки трансформатора при равенстве их мощностей составляет:

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = 0,5 R_{\text{общ}}. \quad (49)$$

Однако эксплуатируются и трехобмоточные трансформаторы с разными мощностями обмоток. В таком случае активные сопротивления лучей звезды в схеме замещения определяются по потерям мощности короткого замыкания, отнесенным к соответствующим лучам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\kappa 1} = \Delta P_{\kappa, \text{в}} &= 0,5 (\Delta P_{\kappa, \text{в-с}} + \Delta P_{\kappa, \text{в-н}} - \Delta P_{\kappa, \text{с-н}}) \\ \Delta P_{\kappa 2} = \Delta P_{\kappa, \text{с}} &= 0,5 (\Delta P_{\kappa, \text{в-с}} + \Delta P_{\kappa, \text{с-н}} - \Delta P_{\kappa, \text{в-н}}) \\ \Delta P_{\kappa 3} = \Delta P_{\kappa, \text{н}} &= 0,5 (\Delta P_{\kappa, \text{в-н}} + \Delta P_{\kappa, \text{с-н}} - \Delta P_{\kappa, \text{в-с}}) \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

$$R_{m1} = \frac{\Delta P_{\kappa 1} \cdot U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{ном}}^2}, \quad (51)$$

$$R_{m2} = \frac{\Delta P_{\kappa 2} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}, \quad (52)$$

$$R_{m3} = \frac{\Delta P_{\kappa 3} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}. \quad (53)$$

Индуктивные сопротивления обмоток или лучей эквивалентной звезды схемы замещения находят по соответствующим значениям напряжения короткого замыкания обмоток, определяемым по каталожным данным:

$$\left. \begin{aligned} u_{\kappa 1} &= u_{\kappa, в} = 0,5 (u_{\kappa, в-с} + u_{\kappa, в-н} - u_{\kappa, с-н}) \\ u_{\kappa 2} &= u_{\kappa, с} = 0,5 (u_{\kappa, в-с} + u_{\kappa, с-н} - u_{\kappa, в-н}) \\ u_{\kappa 3} &= u_{\kappa, н} = 0,5 (u_{\kappa, в-н} + u_{\kappa, с-н} - u_{\kappa, в-с}) \end{aligned} \right\}. \quad (54)$$

Учитывая, что в трехобмоточных трансформаторах $u_{\kappa a} \ll u_{\kappa p}$ можно принять $u_{\kappa p} \approx u_{\kappa}$, получаем:

$$X_{m1} = \frac{u_{\kappa 1} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (55)$$

$$X_{m2} = \frac{u_{\kappa 2} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (56)$$

$$X_{m3} = \frac{u_{\kappa 3} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (57)$$

где $u_{\kappa i}$ задано в относительных единицах.

Как правило, индуктивное сопротивление обмотки среднего напряжения X_{m2} благодаря взаимному влиянию соседних обмоток близко к нулю или имеет небольшое отрицательное значение, соответствующее емкостному сопротивлению, поэтому оно принимается равным нулю.

Активная и индуктивная проводимости трехобмоточного трансформатора рассчитываются, как и двухобмоточного, по выражениям (41), (42), а при их замене постоянным отбором мощности потери в стали $\Delta \underline{S}_x$ определяются по выражению (47), где $n_m = 1$.

В отличие от трехобмоточных трансформаторов трансформаторы с расщепленной обмоткой низкого напряжения имеют соотношение мощностей обмоток 100/50/50 %, т.е. суммарная мощность обмоток низкого напряжения равна мощности обмотки высшего напряжения. Эти трансформаторы могут работать как с параллельным соединением обмоток, так и с отдельным их включением. В первом случае трансформатор с расщепленной обмоткой работает как обычный двухобмоточный трансформатор и параметры его схемы замещения определяются по выражениям, справедливым для двухобмоточных трансформаторов.

При отдельном включении расщепленных обмоток схема замещения трансформатора соответствует рис. 7, причем активные сопротивления лучей звезды, а также проводимости цепи намагничивания или потери в стали определяются по соответствующим выражениям для трехобмоточного трансформатора.

Индуктивные сопротивления обмоток определяются потоками рассеяния и зависят от взаимного расположения обмоток. Поскольку обмотка высокого напряжения располагается между обмотками низкого напряжения, ее индуктивное сопротивление можно считать равным нулю, а индуктивные сопротивления ветвей расщепленной обмотки X'_{2m} и X''_{2m} равны двойному значению общего сопротивления трансформатора:

$$X'_{2m} = X''_{2m} = 2X_m \text{ или } X_m = 0,5 X'_{2m} = 0,5 X''_{2m}. \quad (58)$$

Общее индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению для двухобмоточного трансформатора.

Исходя из сказанного, схему замещения трансформатора с расщепленной обмоткой можно представить в виде:

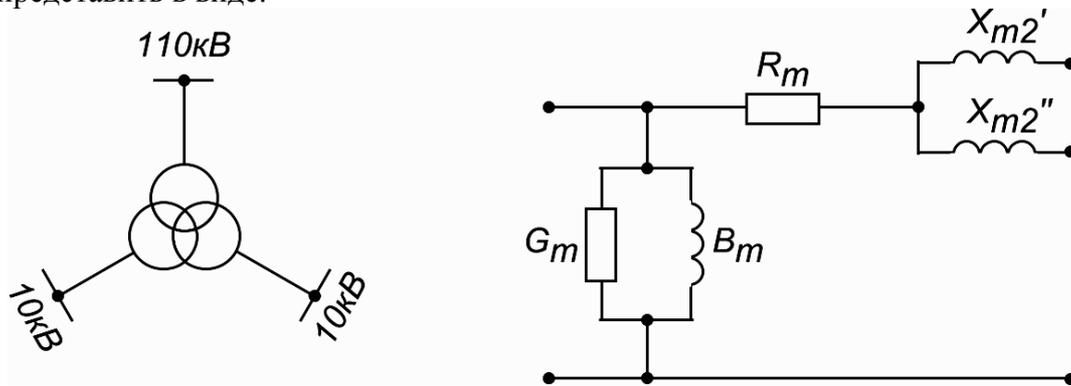


Рис. 8. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Схема замещения автотрансформатора также представляется трехлучевой звездой (рис. 7). В отличие от трехобмоточного трансформатора автотрансформатор характеризуется номинальной и типовой мощностью, на которую рассчитана последовательная обмотка.

Общее активное сопротивление автотрансформатора определяется по потерям мощности $\Delta P_{к, в-с}$ в режиме короткого замыкания в обмотках высокого и среднего напряжения, имеющих электрическую связь:

$$R_{общ} = \frac{\Delta P_{к12} \cdot U_{вн}^2}{S_{1ном}^2} = \frac{\Delta P_{к, в-с} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТном}^2}. \quad (59)$$

Активные сопротивления обмоток ВН и СН будут равны, если мощности потерь $\Delta P_{к}$ для них одинаковы. Тогда:

$$R_{m1} = R_{m2} = 0,5 R_{общ}. \quad (60)$$

Активное сопротивление обмотки низкого напряжения зависит от ее мощности и определяется из соотношения:

$$\frac{R_{m3}}{R_{m1}} = \frac{S_{АТном}}{S_{нн}}. \quad (61)$$

Оно равно:

$$R_{m3} = \frac{R_{m1} \cdot S_{АТном}}{S_{нн}}. \quad (62)$$

Если в каталоге приводятся потери мощности короткого замыкания между парами обмоток ($\Delta P'_{к, в-н}$; $\Delta P'_{к, с-н}$; $\Delta P_{к, в-с}$), то $\Delta P_{к, в-с}$ приведены к номинальной мощности автотрансформатора, а $\Delta P'_{к, в-н}$ и $\Delta P'_{к, с-н}$ – к типовой мощности (мощности обмотки НН).

При определении активных сопротивлений обмоток потери короткого замыкания должны быть приведены к номинальной мощности:

$$\Delta P_{к в-н} = \frac{\Delta P'_{к в-н}}{\alpha^2}; \quad (63)$$

$$\Delta P_{к с-н} = \frac{\Delta P'_{к с-н}}{\alpha^2}, \quad (64)$$

где $\alpha = \frac{S_{АТном}}{S_{тип}} = \frac{U_{вн} - U_{сн}}{U_{вн}}.$ (65)

И уже по ним определяют потери мощности короткого замыкания для каждой из обмоток по выражению (50).

Тогда активные сопротивления обмоток равны:

$$R_{m1} = \frac{\Delta P_{\kappa 1} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТ ном}^2}, \quad (66)$$

$$R_{m2} = \frac{\Delta P_{\kappa 2} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТ ном}^2}, \quad (67)$$

$$R_{m3} = \frac{\Delta P_{\kappa 3} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТ ном}^2}. \quad (68)$$

Индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды определяются так же, как для трехобмоточного трансформатора, с использованием выражений (55)-(57). Если в каталоге или справочных данных указаны напряжения короткого замыкания пар обмоток ($u'_{\kappa, в-н}$, $u'_{\kappa, с-н}$), приведенные к типовой мощности, то их приведение к единому энергетическому уровню осуществляется по выражениям:

$$u_{\kappa, в-н} = u'_{\kappa, в-н} / \alpha, \quad (69)$$

$$u_{\kappa, с-н} = u'_{\kappa, с-н} / \alpha. \quad (70)$$

Проводимости автотрансформатора рассчитываются по выражениям (41) и (42), а потери мощности в стали - по выражению (47), где $n_m=1$.

Сопротивления и проводимости трансформаторов и автотрансформаторов могут быть отнесены не только к номинальному напряжению обмотки высокого напряжения $U_{вн}$, но и к напряжению других обмоток, если оно принимается за расчетное напряжение сети.

Лекция 11.

Статические характеристики нагрузок потребителей.

Цель лекции: привести статические характеристики разных типов нагрузки по частоте и по напряжению, показать типовые обобщенные статические характеристики комплексной нагрузки.

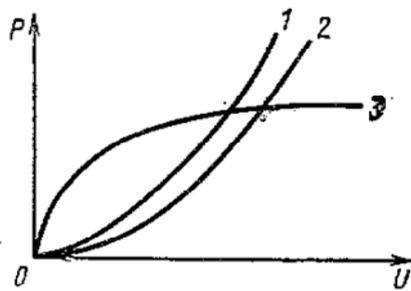
Потребители электроэнергии по своему характеру делятся на промышленные электроприемники, коммутационно-бытовую нагрузку, сельскохозяйственные потребители, электрифицированный железнодорожный транспорт и т.д. Они различаются по номинальной мощности, напряжению, могут потреблять и генерировать реактивную мощность. Самый распространенный вид потребителей – асинхронные двигатели. Выделяют специальные виды нагрузок – выпрямители и инверторы, электропечная нагрузка, сварка. Существенную часть в потреблении электроэнергии составляют потери электроэнергии. Для расчета режимов целесообразно иметь комплексный состав нагрузки в %:

мелкие асинхронные двигатели	34
крупные асинхронные двигатели	14
освещение	25
выпрямители, инверторы, электропечная нагрузка	10
синхронные двигатели	10
потери в сетях	7

Важнейшей характеристикой потребителя является значение его активной и реактивной мощности, которая зависит от напряжения и частоты.

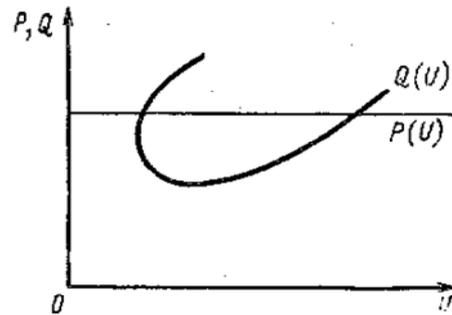
Статистические характеристики нагрузки по напряжению или частоте – это зависимости активной и реактивной мощности от напряжения (или частоты) при медленных изменениях параметров режима.

Далее рассматриваются статические характеристики нагрузки по напряжению для осветительной нагрузки (рис.), асинхронного двигателя (рис.), синхронного двигателя (рис.).



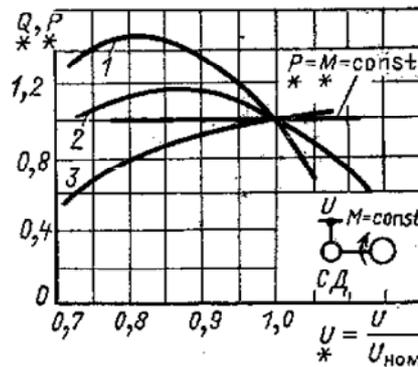
Статические характеристики активной мощности осветительной нагрузки по напряжению: $P(U)$:

1 — при $r_H = \text{const}$; 2 — при r_H , зависящем от U в соответствии с кривой 3; 3 — зависимость сопротивления ламп накаливания от напряжения



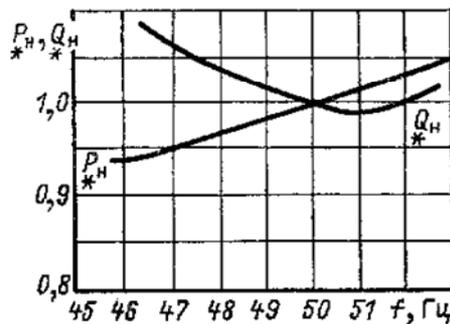
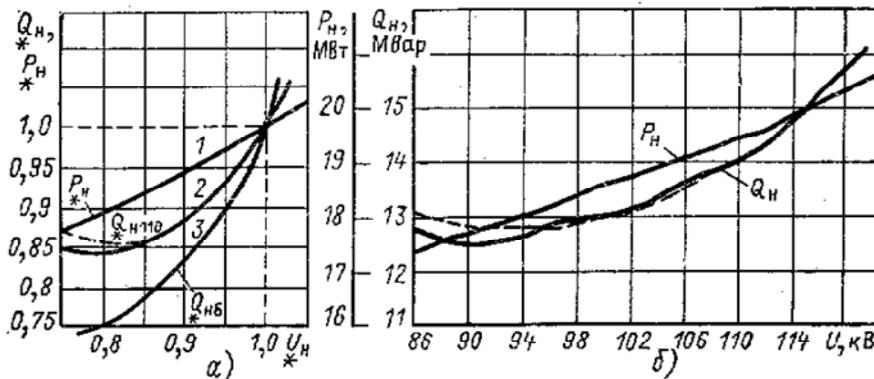
Статические характеристики асинхронного двигателя по напряжению

Статические характеристики синхронного двигателя с независимым возбуждением по напряжению



Статические характеристики нагрузки по напряжению:

a — типовые обобщенные характеристики: 1 — активной мощности, 2 — реактивной мощности для узла 110 кВ, 3 — реактивной мощности для узла 6(10) кВ; b — зависимости $P_H(U)$, $Q_H(U)$ в абсолютных единицах, построенные для примера 2.8



Статические характеристики нагрузки по частоте

При расчетах режимов на ЭВМ статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте задаются в виде полиномов второй степени.

Когда неизвестны статические характеристики узла нагрузки пользуются типовыми статическими характеристиками комплексной нагрузки (рис.).

Регулирующим эффектом нагрузки называют степень изменения активной и реактивной мощности нагрузки при изменении частоты или напряжения.

Лекция 12.

Модели нагрузок потребителей и генераторов для расчетов режимов электрических сетей и систем.

Цель лекции: показать как задаются нагрузки и представляются генераторы при расчетах режимов электрических сетей и систем.

Способы задания нагрузок:

а) постоянным током по модулю и фазе – для расчетов режимов в сетях низкого напряжении;

б) постоянной по величине мощностью – для расчета режимов в питающих и распределительных сетях высокого напряжения;

в) постоянной проводимостью – для расчета электромеханических переходных процессов;

г) статической характеристикой нагрузки по напряжению - для расчета послеаварийных режимов, когда напряжения сильно отличаются от номинального;

д) статической характеристикой нагрузки по частоте – для расчета послеаварийных режимов, когда имеет место дефицит мощности;

е) случайным процессом – для расчета режимов систем с большой долей специфичной нагрузки и для повышения точности расчетов.

Генераторы могут задаваться при расчетах режимов на ЭВМ:

а) постоянными активной и реактивной мощностями;

б) постоянной активной мощностью и модулем напряжения;

в) постоянными модулем и фазой напряжения.

Далее дается характеристика оптимального применения каждого из способов и вводится понятие балансирующего узла.

Лекция 13.

Приведенная и расчетная нагрузки узла.

Цель лекции: показать как определяются потери мощности в трансформаторах и автотрансформаторах, приведенная и расчетная нагрузки узлов.

Для количественной характеристики работы электрической сети рассчитывают ее рабочие режимы. С этой целью составляется расчетная схема замещения, в которой каждый элемент сети представляется своей схемой замещения. Покажем на примере участка сети, состоящего из двух линий и трансформатора, как составляется схема замещения (рис. 11).

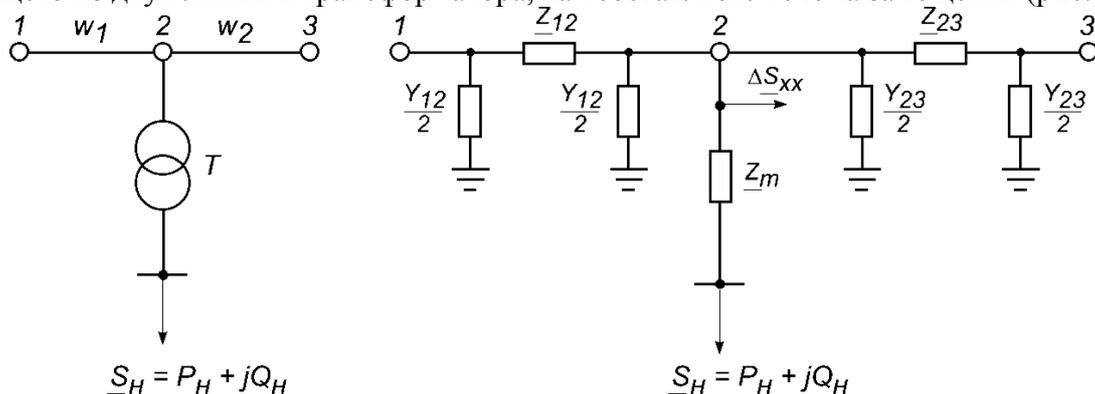


Рис. 11. Схема замещения участка сети с двухобмоточным трансформатором

Так как электрические сети имеют большое количество линий и трансформаторов, то для упрощения конфигурации схемы замещения сети вначале определяют приведенные и расчетные мощности нагрузок подстанций.

Под приведенной мощностью нагрузки подстанции понимается мощность подстанции, приведенная к высокой стороне трансформатора, т.е. мощность нагрузки с учетом потерь мощности в силовом трансформаторе:

$$\underline{S}_n = \underline{S}_n + \Delta \underline{S}_m = P_n + \Delta P_m + j(Q_n + \Delta Q_m), \quad (71)$$

где $\Delta \underline{S}_m$ - потери мощности в силовом трансформаторе.

Потери мощности в силовом трансформаторе состоят из нагрузочных потерь (потери в меди) и потерь холостого хода (потери в стали).

В двухобмоточном силовом трансформаторе нагрузочные потери мощности трансформатора рассчитываются по выражениям:

активные потери мощности

$$\Delta P_m = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_{вн}^2} \cdot R_m + \Delta P_x \quad (72)$$

или

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_k \cdot S_n^2}{S_{т ном}^2} + \Delta P_x = \Delta P_k \cdot K_3^2 + \Delta P_x, \quad (73)$$

где K_3 – коэффициент загрузки трансформатора, равный $K_3 = \frac{S_n}{S_{т ном}}$;

реактивные потери мощности

$$\Delta Q_m = \left(\frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_{вн}^2} \right) \cdot X_m + \Delta Q_x \quad (74)$$

или

$$\Delta Q_m = \frac{u_{к, \%} \cdot S_n^2}{100 \cdot S_{т ном}} + \frac{I_{х, \%} \cdot S_{т ном}}{100}. \quad (75)$$

При использовании для определения потерь номинального напряжения трансформатора в их расчет вводится погрешность, связанная с заменой реального уровня напряжения на его номинальное значение. Однако при ручных расчетах эта погрешность допустима. При расчетах на ПЭВМ пользуются нагрузкой подстанций без приведения ее к высокой стороне.

В трехобмоточном трансформаторе или в автотрансформаторе потери мощности рассчитываются по следующим выражениям:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_{кв} \cdot S_{вн}^2}{S_{т ном}^2} + \frac{\Delta P_{кс} \cdot S_{сн}^2}{S_{т ном}^2} + \frac{\Delta P_{кн} \cdot S_{нн}^2}{S_{т ном}^2} + \Delta P_x \quad (76)$$

или

$$\Delta P_m = \frac{S_{нн}^2}{U_в^2} R_{m3} + \frac{S_{сн}^2}{U_в^2} R_{m2} + \frac{S_{вн}^2}{U_в^2} R_{m1} + \Delta P_x, \quad (77)$$

$$\Delta Q_m = \frac{u_{кв, \%} \cdot S_{вн}^2}{100 \cdot S_{т ном}} + \frac{u_{кс, \%} \cdot S_{сн}^2}{100 \cdot S_{т ном}} + \frac{u_{кн, \%} \cdot S_{нн}^2}{100 \cdot S_{т ном}} + \frac{I_{х, \%} \cdot S_{т ном}}{100} \quad (78)$$

или

$$\Delta Q_m = \frac{S_{nn}^2}{U_6^2} X_{m3} + \frac{S_{cn}^2}{U_6^2} X_{m2} + \frac{S_{6n}^2}{U_6^2} X_{m1} + \Delta Q_x, \quad (79)$$

где U_6 - напряжение высокой стороны трансформатора.

Здесь мощность нагрузки на высокой стороне трансформатора определяется следующим образом:

$$\underline{S}_{6n} = \underline{S}_{nn} + \Delta \underline{S}_{mn} + \underline{S}_{cn} + \Delta \underline{S}_{mc}, \quad (80)$$

где $\Delta \underline{S}_{mn}$ и $\Delta \underline{S}_{mc}$ - соответственно потери мощности в обмотке низкого и среднего напряжения

$$\Delta \underline{S}_{mc} = \frac{S_{cn}^2}{U_6^2} (R_{m2} + jX_{m2}); \Delta \underline{S}_{mn} = \frac{S_{nn}^2}{U_6^2} (R_{m3} + jX_{m3}).$$

Расчетная нагрузка подстанции включает в себя приведенную мощность нагрузки и сумму реактивных мощностей, генерируемых линиями, подходящими к подстанции. Например, для рис. 11 расчетная нагрузка подстанции равна:

$$\underline{S}_p = \underline{S}_n + \Delta \underline{S}_m - jQ_{c12}^k - jQ_{c23}^n, \quad (81)$$

где jQ_{c12}^k ; jQ_{c23}^n - соответственно реактивные мощности, генерируемые в конце линии 12 и начале линии 23.

Эти мощности также называются зарядными и определяются по выражениям:

$$Q_{c12}^k = \frac{U_2^2 \cdot b_{12}}{2}; Q_{c23}^n = \frac{U_2^2 \cdot b_{23}}{2}, \quad (82)$$

где b_{12} и b_{23} - емкостные проводимости линий.

В ручных расчетах при определении зарядных мощностей вместо реального значения напряжения допускается использовать его номинальное значение.

Таким образом, при использовании приведенных и расчетных нагрузок подстанции упрощенные схемы замещения для участка сети имеют вид:

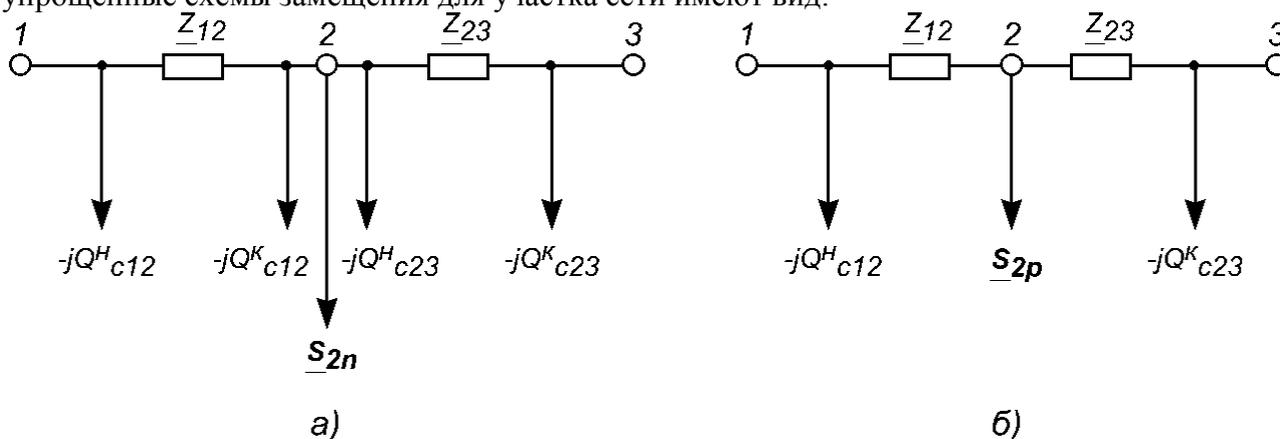


Рис. 12. Упрощенные схемы замещения:

а - при использовании приведенной нагрузки узла, \underline{S}_{2n}

б - при использовании расчетной нагрузки узла, \underline{S}_{2p} .

Если неизвестна номинальная мощность силового трансформатора, то ее можно определить следующим образом.

Двухобмоточный трансформатор

Сначала находят расчетную мощность трансформатора

$$S_{m \text{ расч}} = \frac{\sqrt{P_n^2 + Q_3^2}}{N_T \cdot K_3},$$

где Q_3 – реактивная мощность, передаваемая через трансформатор в сеть низкого напряжения (переток реактивной мощности из сети высокого напряжения);

N_T – число трансформаторов на подстанции;

K_3 – коэффициент загрузки трансформатора (для двухтрансформаторных подстанций $K_3=0,7$; для однострансформаторных $K_3=0,8 \div 0,85$).

$$Q_3 = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n,$$

где $\operatorname{tg} \varphi_n$ – нормативный базовый коэффициент мощности, задаваемый энергосистемой потребителям в часы максимальных нагрузок, определяется согласно /16/.

Затем по справочным данным выбирается трансформатор с номинальной мощностью, удовлетворяющей условию

$$S_{m \text{ ном}} \geq S_{m \text{ расч}}.$$

Трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор

Определяется суммарная нагрузка трансформатора

$$\underline{S}_{m\Sigma} = P_{nn} + P_{cn} + j(Q_3 + Q_{cn}),$$

где P_{nn} , P_{cn} – соответственно активная нагрузка низкой и средней сторон трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора;

Q_3 – реактивная мощность, передаваемая через трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) в сеть низкого напряжения;

Q_{cn} – реактивная мощность, передаваемая через трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) в сеть среднего напряжения.

В целях снижения потерь мощности в распределительных сетях энергосистем Q_{cn} определяется, исходя из оптимизации режима по реактивной мощности /11/.

Расчетная мощность трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора равна

$$S_{m(at) \text{ расч}} \geq \frac{\sqrt{(P_{nn} + P_{cn})^2 + (Q_3 + Q_{cn})^2}}{N_T \cdot K_3}.$$

Номинальная мощность трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора выбирается по справочным данным так же, как и двухобмоточного трансформатора, т.е. по условию

$$S_{m(at) \text{ ном}} \geq S_{m(at) \text{ расч}}.$$

Лекция 14.

Расчет режима разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжении в конце разомкнутой линии.

Цель лекции: дать понятие падение и потеря напряжения, рассмотреть порядок расчета режимов по данным «конца».

Под разомкнутой сетью понимают такую сеть, питание которой можно осуществить только с одной стороны. Разомкнутая сеть не содержит контуров. Примеры вариантов выполнения разомкнутых сетей приведены на рис. 15.

Здесь (рис. 15а) показана радиальная разомкнутая сеть, на рис. 15б - магистраль, на рис. 15в - разветвленная разомкнутая сеть.

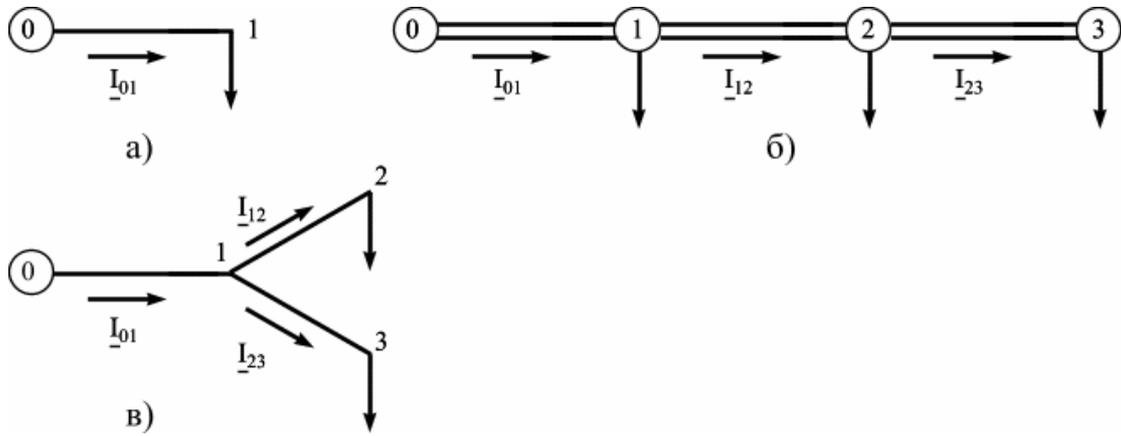


Рис. 15. Варианты выполнения разомкнутых сетей

Независимо от конфигурации разомкнутой сети для расчета ее режимов используется единый алгоритм.

Прежде чем рассматривать алгоритм расчета режимов таких сетей, необходимо ввести понятия падения и потери напряжения.

Под падением напряжения понимают векторную (геометрическую) разность между комплексами напряжений начала и конца линии

$$\underline{U}_\Delta = \Delta U + j\delta U, \quad (83)$$

где ΔU - продольная составляющая падения напряжения, т.е. проекция падения напряжения на действительную ось;

δU - поперечная составляющая падения напряжения, т.е. проекция падения напряжения на мнимую ось.

Падение напряжения на участке сети (рис. 16) можно определить через потоки мощности и напряжение в конце участка сети либо через потоки мощности и напряжение в начале участка.

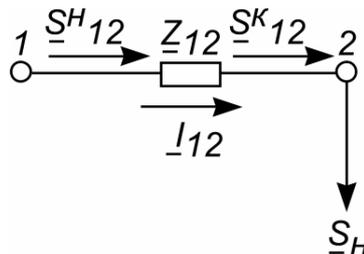


Рис. 16. Простейшая схема замещения участка сети

В первом случае (см. рис. 16) падение напряжения можно определить, выражая ток, протекающий по участку 12 через мощность в конце участка:

$$\begin{aligned} \underline{U}_\Delta &= \sqrt{3} \underline{I}_{12} \underline{Z}_{12} = \sqrt{3} \frac{\underline{S}_{12}^{*K}}{\sqrt{3} U_2^*} \underline{Z}_{12} = \frac{P_{12}^K - jQ_{12}^K}{U_2^*} (R_{12} + jX_{12}) = \\ &= \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2^*} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2^*}. \end{aligned} \quad (84)$$

Если \underline{U}_2 задано только модулем, то продольную и поперечную составляющие падения напряжения, определенные по нагрузке в конце участка сети, можно записать в следующем виде:

$$\Delta U = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2}; \quad \delta U = \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2}. \quad (85)$$

На векторной диаграмме (см. рис. 17а) показаны напряжения в начале и в конце участка и падение напряжения на нем. При построении векторной диаграммы известное напряжение в конце участка \underline{U}_2 располагаем вдоль действительной оси, затем строим продольную и поперечную составляющие падения напряжения, определенные по нагрузке в конце участка, падение напряжения и напряжение в начале участка.

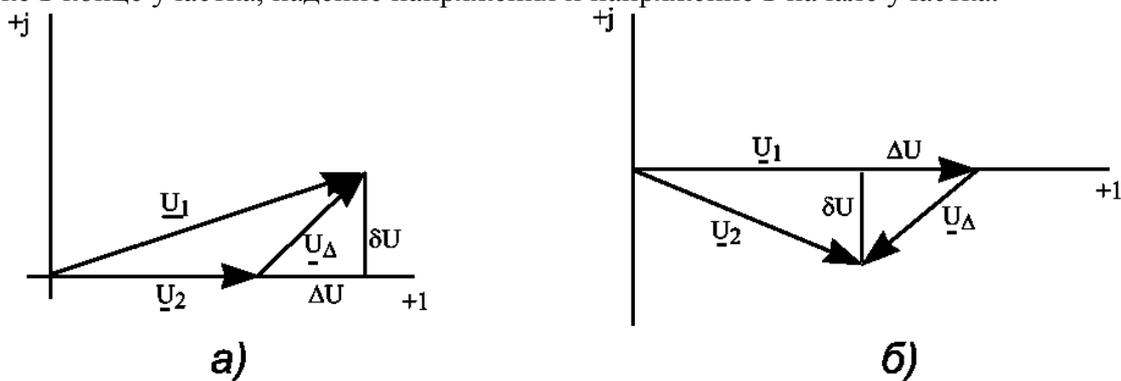


Рис. 17. Векторная диаграмма напряжений:

- а) при известном напряжении в конце линии;
 б) при известном напряжении в начале линии.

Следовательно:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{U}_\Delta = \underline{U}_2 + \Delta U_{12} + j\delta U_{12}. \quad (86)$$

Модуль и фаза \underline{U}_1 равны:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2}. \quad (87)$$

$$\varphi_{U1} = \arctg\left(\frac{\delta U_{12}}{U_2 + \Delta U_{12}}\right). \quad (88)$$

Во втором случае известен поток мощности и напряжение в начале участка. Выражая ток, протекающий по участку, через известные параметры, падение напряжения на участке сети можно записать в следующем виде:

$$\underline{U}_\Delta = \frac{P_{12}'' \cdot R_{12} + Q_{12}'' \cdot X_{12}}{U_1^*} + j \frac{P_{12}'' \cdot X_{12} - Q_{12}'' \cdot R_{12}}{U_1^*} \quad (89)$$

или при задании \underline{U}_1 модулем:

$$\Delta U = \frac{P_{12}'' \cdot R_{12} + Q_{12}'' \cdot X_{12}}{U_1}; \quad (90)$$

$$\delta U = \frac{P_{12}'' \cdot X_{12} - Q_{12}'' \cdot R_{12}}{U_1}.$$

Векторная диаграмма для данного случая имеет вид, показанный на рис. 17б.

Откуда

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}_\Delta = \underline{U}_1 - \Delta U_{12} - j\delta U_{12}. \quad (91)$$

Модуль и фаза \underline{U}_2 равны:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2}. \quad (92)$$

$$\varphi_{U2} = \arctg \frac{\delta U_{12}}{U_1 - \Delta U_{12}}. \quad (93)$$

Необходимо отметить тот факт, что проекции падения напряжения на действительную и мнимую оси в первом и во втором случаях не равны между собой при одном и том же векторе падения напряжения.

Учитывая тот факт, что в условиях эксплуатации более точно определяются мощности нагрузок, а не токи, рассмотрим алгоритм расчета рабочих режимов разомкнутых сетей при указанном способе задания исходных данных.

Расчет режима при известных нагрузках и напряжении в конце разомкнутой сети

Алгоритм расчета сети рассмотрим на примере схемы, приведенной на рис. 18.

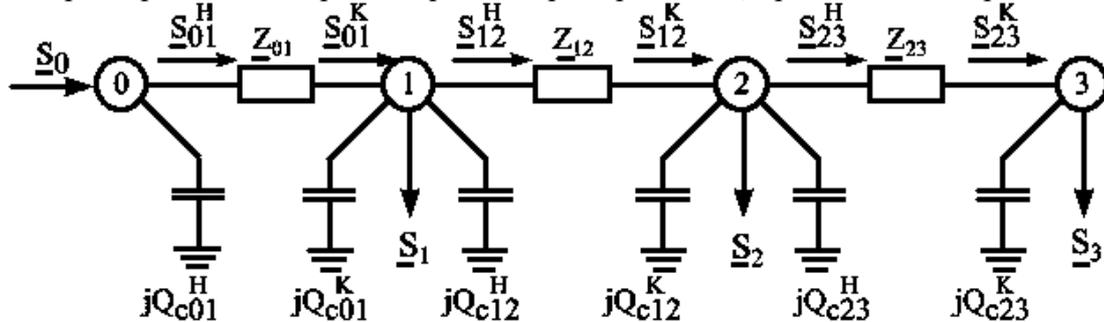


Рис. 18. Расчетная схема сети

Здесь нагрузки в узлах 1, 2, 3 заданы приведенными мощностями. Источник питания показан узлом 0, напряжение известно в узле 3, т.е. в конце рассматриваемой сети. Расчет состоит в последовательном определении мощностей и напряжений от конца сети к началу.

1. Определяем зарядную мощность линии 23 в конце последнего участка сети, т.е. в конце участка 23:

$$Q_{c23}^K = \frac{j b_{23} l_{23} U_3^2}{2}. \quad (94)$$

2. Определяем мощность в конце последнего участка сети, т.е. участка 23:

$$\underline{S}_{23}^K = \underline{S}_3 - j Q_{c23}^K. \quad (95)$$

3. Определяем потери мощности на последнем участке:

$$\Delta \underline{S}_{23} = \frac{P_{23}^{K^2} + Q_{23}^{K^2}}{U_3^2} (R_{23} + j X_{23}). \quad (96)$$

4. Находим мощность в начале последнего участка:

$$\underline{S}_{23}^H = \underline{S}_{23}^K + \Delta \underline{S}_{23}. \quad (97)$$

5. Определяем падение напряжения на последнем участке, т.е. на участке 23:

$$\underline{U}_{\Delta 23} = \frac{P_{23}^K \cdot R_{23} + Q_{23}^K \cdot X_{23}}{U_3^*} + j \frac{P_{23}^K \cdot X_{23} - Q_{23}^K \cdot R_{23}}{U_3^*}. \quad (98)$$

6. Находим напряжение в предпоследнем участке сети, т.е. в узле 2:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_3 + \underline{U}_{\Delta 23}. \quad (99)$$

7. Рассчитываем зарядные мощности в начале ВЛ последнего участка сети и в конце ВЛ предпоследнего участка сети:

$$Q_{c23}^H = \frac{j b_{23} l_{23} U_2^2}{2}, \quad (100)$$

$$Q_{c12}^K = \frac{j b_{12} l_{12} U_2^2}{2}. \quad (101)$$

8. Определим мощность в конце предпоследнего участка:

$$\underline{S}_{12}^K = \underline{S}_{23}^H + \underline{S}_2 - j (Q_{c23}^H + Q_{c12}^K). \quad (102)$$

Далее алгоритм повторяется с пункта 3 до определения напряжения источника питания. Если источником питания является электростанция, то, как правило, определяется мощность, генерируемая с шин станции, следующим образом:

$$\underline{S}_{sc} = \underline{S}'_{01} - j Q''_{c01} \cdot \quad (103)$$

Рассмотренный метод расчета режимов разомкнутой сети является точным, т.к. известны все исходные данные относительно одного узла (последнего) и нагрузки остальных узлов.

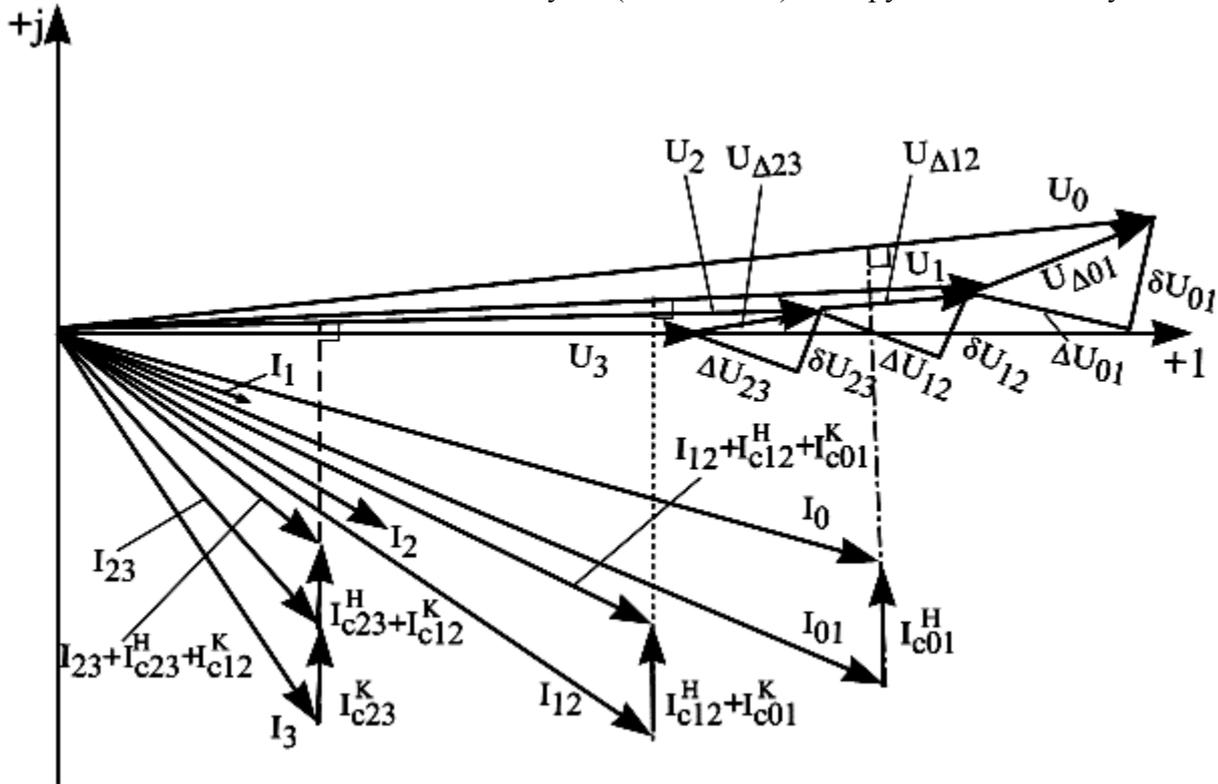


Рис.19. Векторная диаграмма, иллюстрирующая рассматриваемый алгоритм

Лекция 15.

Расчет режима разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжениями источника питания.

Цель лекции: привести порядок расчета режимов разомкнутых сетей по данным «начала».

В рассматриваемом случае известны нагрузки в узлах и напряжение источника питания. Именно такой способ задания исходной информации применяется в условиях эксплуатации при расчете и анализе режимов. Здесь источник питания - балансирующий узел, в нем заданы модуль и фаза напряжения, а неизвестны активная и реактивная мощность, т.е. $\underline{U}_\delta = \text{const}$, $\underline{S}_\delta = \text{var}$. При таком способе задания исходной информации невозможно определить неизвестные потоки мощности по участкам сети и напряжения в узлах точным методом, используя первый закон Кирхгофа и закон Ома, т.к. напряжение в конце разомкнутой сети неизвестно. Данную задачу можно решить, составляя систему нелинейных уравнений узловых напряжений и решая ее любым известным итерационным методом, - например, методом Ньютона-Рафсона. Такой подход предполагает использование специальных промышленных программ для расчета режимов сети и неудобен для понимания физической сущности протекающих процессов. Пользоваться им при ручном счете нецелесообразно в виду большой трудоемкости расчетов (количество итераций в зависимости от сложности схемы может достигать 10 и более).

Однако можно осуществить приближенный расчет режимов простых разомкнутых сетей в два этапа, пользуясь методом итераций или последовательных приближений. В этом случае достигается требуемая инженерная точность расчета (до 5%) при одной – двух итерациях в зависимости от номинального напряжения и разветвленности сети, легко понимается физическая сущность протекающих процессов в сети и осуществляется аналитический анализ режима.

Рассмотрим алгоритм расчета режима разомкнутой сети в два этапа на примере рис. 20.

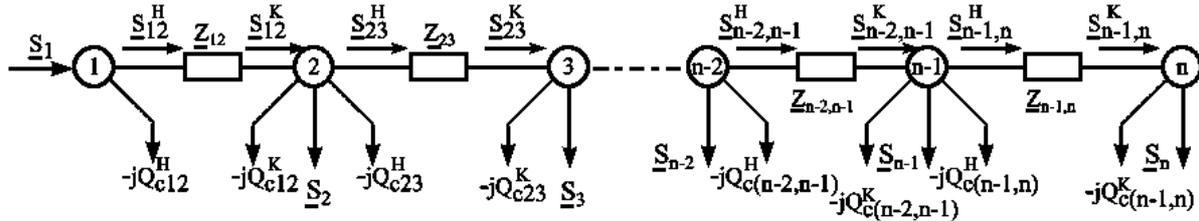


Рис. 20. Схема замещения разомкнутой сети для расчета по данным начала

Составляется схема замещения, в которой нагрузки узлов являются приведенными (рис. 20).

Первый этап заключается в определении потоков мощности по участкам сети, с учетом потерь мощности. Т.к. напряжения в узлах заранее неизвестны, то в качестве первого приближения их принимают равными номинальному значению. Расчет ведется от конца сети к началу, т.е. к головному участку.

1. Определение зарядных мощностей в начале и конце каждого участка сети:

$$Q_{Cij}^H = Q_{Cij}^K = \frac{1}{2} b_{0ij} \cdot l_{ij} \cdot U_{НОМ}^2 \quad (104)$$

или

$$Q_{Cij}^H = Q_{Cij}^K = \frac{1}{2} q_{0ij} \cdot l_{ij}, \quad (105)$$

где Q_{Cij}^H и Q_{Cij}^K – соответственно зарядная мощность начала и конца участка линии;
 q_0 – погонное значение зарядной мощности, справочная величина, Мвар/км;
 l_{ij} – длина участка ij .

2. Определение потока мощности в конце последнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-1,n}^K = \underline{S}_{ПР(n)} - j \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^N Q_{Cij}, \quad (106)$$

где $\underline{S}_{ПР(n)}$ – приведенная мощность последнего узла разомкнутой сети;

ij – номер линии, подходящей к последнему участку сети;

N – число линий, подходящих к последнему участку сети.

3. Определение потерь мощности на последнем участке сети:

$$\Delta \underline{S}_{n-1,n} = \frac{(P_{n-1,n}^K)^2 + (Q_{n-1,n}^K)^2}{U_{НОМ}^2} (R_{n-1,n} + jX_{n-1,n}). \quad (107)$$

4. Определение потока мощности в начале последнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-1,n}^H = \underline{S}_{n-1,n}^K + \Delta \underline{S}_{n-1,n}. \quad (108)$$

5. Определение потока мощности к концу предпоследнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-2,n-1}^K = \underline{S}_{n-1,n}^H + \underline{S}_{ПР(n-1)} - j \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^N Q_{Cij}. \quad (109)$$

Далее алгоритм повторяется с пункта 3 до определения потока мощности в начале головного участка.

Второй этап заключается в определении напряжений в узлах по рассчитанным на первом этапе потокам мощности и известному напряжению источника питания. Расчет ведется от начала сети к концу, т.е. от начала головного участка к последнему участку сети.

6. Определение падения напряжения на головном участке:

$$\underline{U}_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^H R_{12} + Q_{12}^H X_{12}}{U_1^*} + j \frac{P_{12}^H X_{12} - Q_{12}^H R_{12}}{U_1^*} = \Delta U_{12} + j\delta U_{12}, \quad (110)$$

где U_1^* - сопряженный комплекс напряжения источника питания.

7. Определение напряжения в первом узле нагрузки от источника питания:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}_{\Delta 12}. \quad (111)$$

Далее алгоритм повторяется до определения напряжения в последнем узле нагрузки сети.

При расчете напряжений в узлах рассчитываются модуль U_{i+1} и фаза $\varphi_{U_{i+1}}$ по выражениям:

$$U_{i+1} = \sqrt{(U_i - \Delta U_{i,i+1})^2 + (\delta U_{i,i+1})^2}; \quad (112)$$

$$\varphi_{U_{i+1}} = \arctg \frac{\delta U_{i,i+1}}{U_i - \Delta U_{i,i+1}} \quad (113)$$

Полученное значение напряжения в последнем узле сравнивается с первым приближением, т.е. с номинальным значением напряжения по выражению:

$$|\varepsilon| = \left| \frac{U_n^{(1)} - U_{ном}}{U_n^{(1)}} \right| 100\% \leq 5\%, \quad (114)$$

где $U_n^{(1)}$ - модуль напряжения последнего узла, полученный в результате выполнения первой итерации.

Если разница не превышает 5%, то требуемая точность расчета достигнута и вторая итерация не требуется.

В противном случае осуществляется переход ко второй итерации. В качестве второго приближения на первом этапе напряжения в узлах принимаются равными значениям, полученным на втором этапе первой итерации. И расчет повторяется, начиная с п.1.

Как правило, для сетей с номинальным напряжением до 110 кВ включительно требуемая точность расчета достигается при одной итерации. При этом можно пренебречь поперечной составляющей падения напряжения. В сетях напряжением до 35 кВ включительно не учитывают зарядные мощности линий ввиду того, что они в сто и более раз меньше зарядных мощностей линий 110 кВ, т.е. очень малы и их значения соизмеримы с погрешностью расчета.

В сетях 220 кВ требуемая точность расчета в основном достигается при выполнении двух итераций.

Лекция 16.

Расчет режимов в кольцевых сетях.

Цель лекции: показать как замещаются в расчетах режимов кольцевые сети и привести порядок расчета установившихся режимов в них.

Кольцевые сети

Сети с одноконтурной конфигурацией называются кольцевыми. Кольцевые сети могут иметь как одинаковые номинальные напряжения всех участков, так и различные при осуществлении связи участков разных номинальных напряжений через автотрансформаторы

или трехобмоточные трансформаторы соответствующих подстанций. Алгоритм расчета таких сетей един. Однако во втором случае перед расчетом установившихся режимов параметры схемы замещения участков сети приводят к одной ступени напряжения по следующим выражениям:

$$\underline{Z}_{\text{пр}} = \underline{Z}k_T^2, \quad \underline{Y}_{\text{пр}} = \frac{\underline{Y}}{k_T^2}, \quad (115)$$

где $\underline{Z}_{\text{пр}}$, $\underline{Y}_{\text{пр}}$ - приведенные к базисному напряжению сопротивление и проводимость рассматриваемого элемента электрической сети;

k_T - коэффициент трансформации идеального трансформатора на пути между рассматриваемыми элементами и сетью базисной ступени напряжения.

Под базисным напряжением понимают напряжение той ступени, к которому приводят всю сеть. Как правило, это ступень с более высоким напряжением.

Т.к. реальное напряжение обмоток силового трансформатора или автотрансформатора заранее неизвестно, то при первом приближении коэффициенты трансформации определяют по номинальным напряжениям трансформатора или средним номинальным напряжениям сети. В этом случае при приведении сопротивлений или проводимостей более низкой ступени напряжения (второй) к более высокой ступени (первой) коэффициент трансформации идеального трансформатора определяется следующим образом:

$$k_T = \frac{U_{\text{НОМ}_1}}{U_{\text{НОМ}_2}}. \quad (116)$$

Таким образом, кольцевая сеть имеет одинаковое номинальное напряжение и готова к расчету (см. рис. 21).

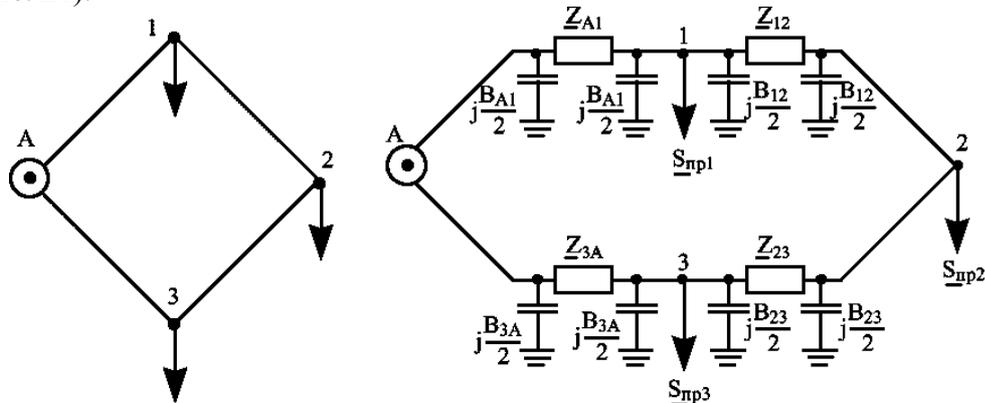


Рис. 21. Пример кольцевой сети и ее схема замещения

Алгоритм расчета кольцевых сетей при использовании метода последовательных приближений (см. п. 2.2.3) показан ниже.

1-й этап. Распределение потоков мощности по участкам кольцевой сети без учета потерь мощности

1. Кольцевая сеть разрезается по источнику питания и приводится к сети с двумя источниками питания, имеющими одинаковое напряжение (рис. 22).

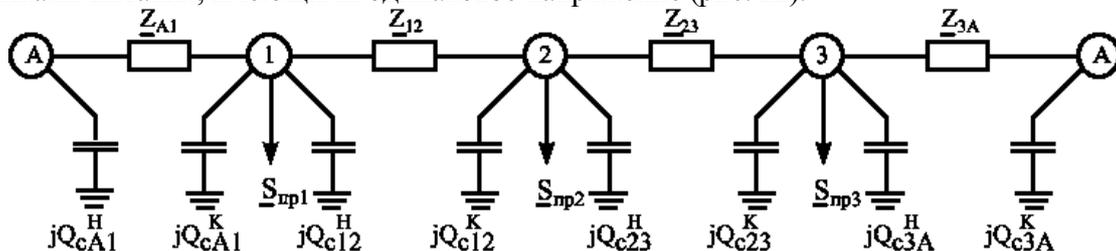


Рис. 22. Схема замещения кольцевой сети, разрезанной по источнику питания

2. Определяется расчетная нагрузка каждого узла по выражению (81). Схема замещения кольцевой сети с расчетными нагрузками узлов подготовлена к определению потоков мощности на головных участках (см. рис. 23).

Под головным понимается участок сети, непосредственно примыкающий к источнику питания.

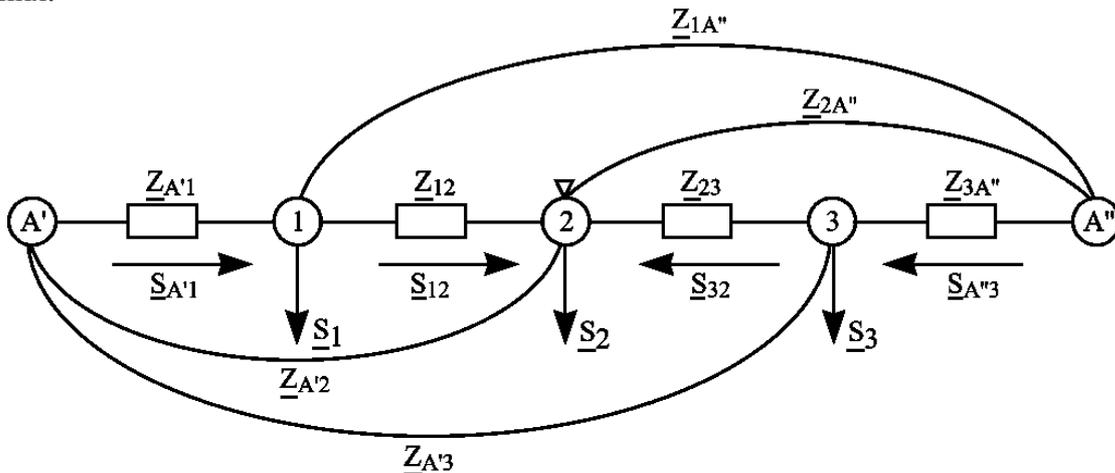


Рис. 23. Схема замещения кольцевой сети с расчетными нагрузками узлов

Здесь S_i - расчетная нагрузка i - го узла.

3. Определяются потоки мощности на головных участках, при этом используется допущение об отсутствии потерь мощности на участках. В общем виде:

$$\underline{S}_{A'1} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \underline{Z}_{iA''}^*}{\underline{Z}_{A'-A''}^*}, \quad (117)$$

$$\underline{S}_{A''n} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \underline{Z}_{iA'}^*}{\underline{Z}_{A'-A''}^*} \quad (118)$$

или применительно к рассматриваемой схеме:

$$\underline{S}_{A'1} = \frac{\underline{S}_1 \underline{Z}_{1A''}^* + \underline{S}_2 \underline{Z}_{2A''}^* + \underline{S}_3 \underline{Z}_{3A''}^*}{\underline{Z}_{A'-A''}^*}; \quad (119)$$

$$\underline{S}_{A''3} = \frac{\underline{S}_1 \underline{Z}_{1A'}^* + \underline{S}_2 \underline{Z}_{2A'}^* + \underline{S}_3 \underline{Z}_{3A'}^*}{\underline{Z}_{A'-A''}^*}, \quad (120)$$

где \underline{S}_i - расчетная мощность нагрузки i -го узла;

$\underline{Z}_{iA'}^*$, $\underline{Z}_{iA''}^*$ - сопряженные комплексы сопротивлений от i -й точки сети до соответствующего конца (A' или A'') развернутой схемы замещения кольцевой сети при ее разрезании в точке источника питания;

$\underline{Z}_{A'-A''}^*$ - сопряженный комплекс суммарного сопротивления всех участков кольцевой сети.

Проверка правильности расчета осуществляется по следующему условию: сумма потоков мощности на головных участках равна сумме расчетных мощностей всех узлов.

4. Определяется точка потокораздела активной и реактивной мощности. Точка потокораздела - тот узел сети, нагрузка которого получает питание с двух сторон. Иными словами, это точка сети, в которой встречаются потоки мощности. Для нахождения точки потокораздела используется первый закон Кирхгофа:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{A'1} - \underline{S}_1; \quad \underline{S}_{23} = \underline{S}_{12} - \underline{S}_2 \quad \text{и т.д.} \quad (121)$$

После точки потокораздела мощность на участке, следующем за ней, меняет свой знак на противоположный.

С целью проверки правильности расчета поток мощности на одном из участков рассчитывается с двух сторон. При этом должно выполняться условие (см. рис. 23):

$$\underline{S}_{23} = - \underline{S}_{32}. \quad (122)$$

Точка потокораздела на схеме замещения обозначается ∇ .

5. Разделение кольцевой сети на две разомкнутые магистральные в точке потокораздела.

В данном пункте схема замещения кольцевой сети приводится к двум схемам замещения разомкнутых сетей (см. рис. 24).

Значения \underline{S}_{12} и \underline{S}_{32} получены в п.4 при определении точки потокораздела.

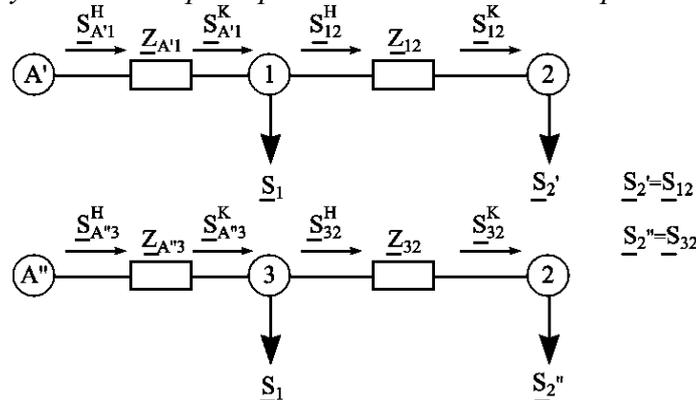


Рис. 24. Приведенная к двум разомкнутым схема замещения

6. Расчет двух разомкнутых сетей по алгоритму, приведенному в п.2.2.3, т.е. по методу расчета сети в два этапа (расчет разомкнутой сети по данным начала).

На первой итерации в качестве исходных приближений напряжения в узлах принимаются равными номинальному. В каждой из схем замещения, приведенных на рис. 24, рассчитывается напряжение в узле 2, т.е. в точке потокораздела. Напряжение в точке потокораздела должно совпадать. В противном случае осуществляется переход ко второй итерации, при этом находят среднее значение напряжения в точке потокораздела:

$$U_2 = \frac{U'_2 + U''_2}{2}. \quad (123)$$

В качестве напряжений узлов во второй итерации используются значения напряжений узлов, полученные на первой итерации, при этом напряжение узла 2 принимается равным среднему. Расчет оканчивается при достижении требуемой точности, т.е. значения напряжений в точке потокораздела, определенные с двух сторон, совпадают и на двух соседних итерациях не отличаются более чем на 5%.

Особенности расчета режимов замкнутых сетей при двух точках потокораздела

В общем случае точки потокораздела по активной и реактивной мощности могут не совпадать. Рассмотрим особенности расчета режимов таких сетей на примере схемы, приведенной на рис. 25.

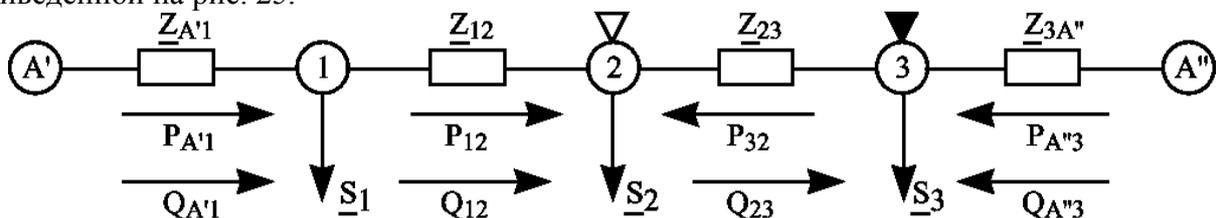


Рис. 25. Схема замещения простой замкнутой сети с двумя точками потокораздела

На рис. 26: ∇ - точка потокораздела по активной мощности;

\blacktriangledown - точка потокораздела по реактивной мощности.

Чтобы разделить сеть (рис. 25) на две разомкнутые сети, необходимо вычислить потери мощности на участке между точками потокораздела:

$$\Delta \underline{S}_{23} = \Delta P_{23} + j\Delta Q_{23} = \frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{ном}} \underline{Z}_{23}. \quad (124)$$

Теперь необходимо «вырезать» участок между точками потокораздела, т.е. участок 2-3. Следовательно, потери мощности на нем нужно включить в нагрузку узлов 2 и 3 по следующим выражениям:

$$\underline{S}_2^* = P_{12} + j(Q_{12} + \Delta Q_{23}), \quad (125)$$

$$\underline{S}_3^* = P_{A''3} + \Delta P_{32} + jQ_{A''3}, \quad (126)$$

где потоки мощности \underline{S}_{ij} по участкам сети, без учета потерь мощности, определяются по алгоритму расчета кольцевых сетей, т.е. по выражениям (121).

Таким образом, рассматриваемая сеть приведена к двум разомкнутым (рис. 26) и может быть рассчитана по алгоритму расчета режимов разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжениях источников питания.

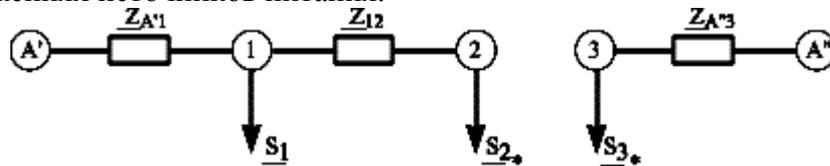


Рис. 26. Разделение простой замкнутой сети с двумя точками потокораздела на две разомкнутые

Лекция 17.

Сети с другими источниками питания.

Порядок расчета режимов в сетях различных комбинаций разомкнутых и замкнутых схем.

Цель лекции: показать особенности расчета режимов в сетях с двухсторонним питанием, систематизировать порядок расчета различных комбинациях разомкнутых и простых замкнутых сетей.

В общем случае два источника питания, имеющие различные фиксированные напряжения, соединяются между собой линиями с промежуточными подстанциями.

Расчет режима такой сети выполняется аналогично расчету режима кольцевой сети, но с использованием метода наложения.

В этом случае схема сети с двусторонним питанием представляется в виде двух схем:

а) схема сети с одинаковыми напряжениями источника питания, т.е. напряжение первого источника принимается равным напряжению второго (см. рис. 23)

$$U_{ип1} = U_{ип2}. \quad (127)$$

б) схема сети без промежуточного отбора мощности, в которой напряжение одного источника принимается равным нулю, а второго - разности между напряжениями источников питания. Такая схема замещения показана на рис. 27.

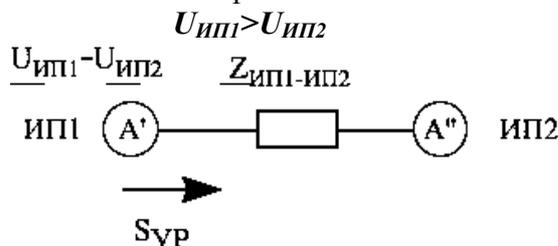


Рис. 27. Схема замещения сети без отбора мощности

В сети, схема которой приведена на рис. 27, протекает уравнивающая мощность от источника питания с большим напряжением к источнику питания с меньшим напряжением, она равна

$$\underline{S}_{ур} = \frac{U_{ип1}^* - U_{ип2}^*}{Z_{A'-A''}^*} \cdot U_{ном} \cdot \quad (128)$$

Исходя из сказанного, алгоритм расчета сети с двухсторонним питанием следующий:

1. Рассчитываются потоки мощности на головных участках сети при равенстве напряжений источников питания по выражениям (117), (118), $\underline{S}_{ГУ}$.
2. Определяется уравнивающая мощность по выражению (128).
3. Уточняются потоки мощности на головных участках с учетом уравнивающей мощности $\underline{S}_{ур}$.

Для головного участка, питаемого от источника с большим напряжением:

$$\underline{S}_{ГУ}^{факт} = \underline{S}_{ГУ} + \underline{S}_{ур} \cdot \quad (129)$$

Для головного участка, питаемого от источника с меньшим напряжением:

$$\underline{S}_{ГУ}^{факт} = \underline{S}_{ГУ} - \underline{S}_{ур} \cdot \quad (130)$$

4. Определяется точка потоко раздела. Дальнейший расчет сети сводится к алгоритму расчета кольцевой сети.

Порядок расчета различных комбинаций замкнутых и разветвленных разомкнутых сетей

При расчете реальных сетей довольно часто встречаются ситуации, когда в схеме сети сочетаются различные комбинации соединения замкнутых и разветвленных разомкнутых сетей. Наиболее типичны следующие:

- к различным узлам кольцевой сети подключены разветвленные разомкнутые сети (рис. 28);
- к разомкнутой сети в одном или нескольких узлах подключены кольцевые сети (рис. 29);
- к сети с двухсторонним питанием в одном или нескольких узлах подключены разветвленные разомкнутые сети (рис. 30);
- к сети с двухсторонним питанием подключена кольцевая сеть (рис. 31).

Порядок расчета таких сетей показан на рис. 28-31, на которых приведены комбинации соединения простых замкнутых сетей и разветвленных разомкнутых сетей.

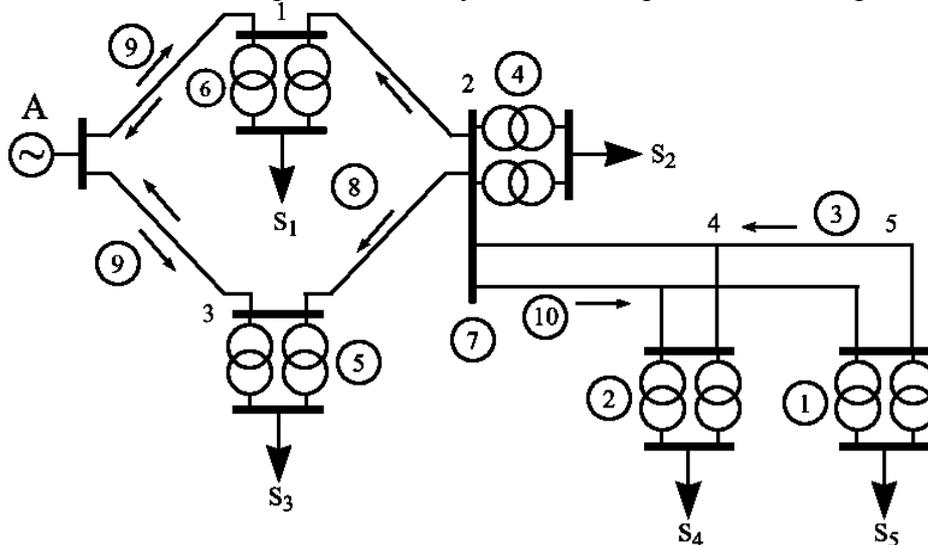


Рис. 28. Схема сети, содержащей кольцо и разветвленную разомкнутую сеть

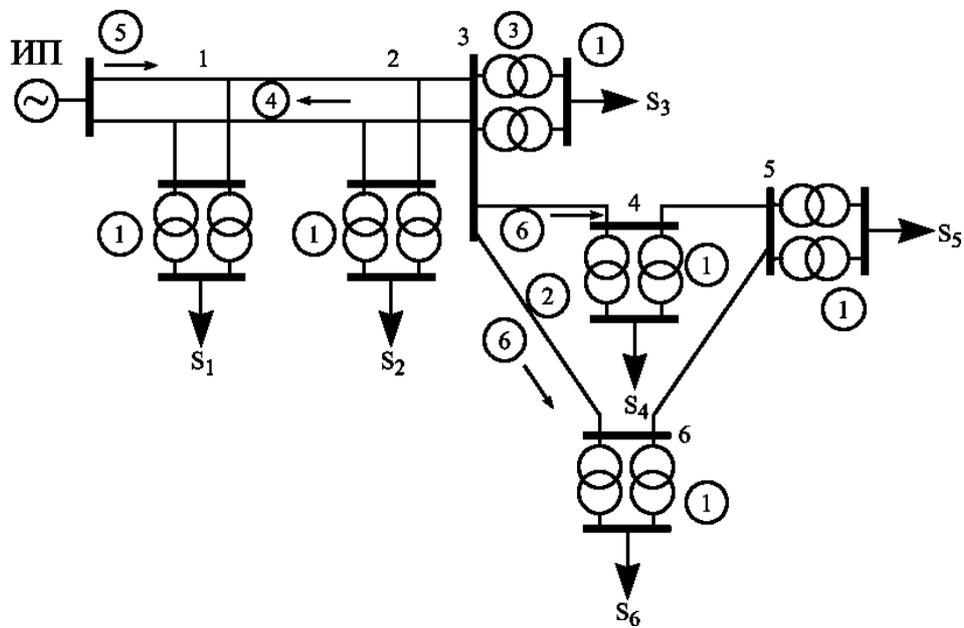


Рис. 29. Схема сети, содержащей разомкнутую сеть и питаемое от нее кольцо

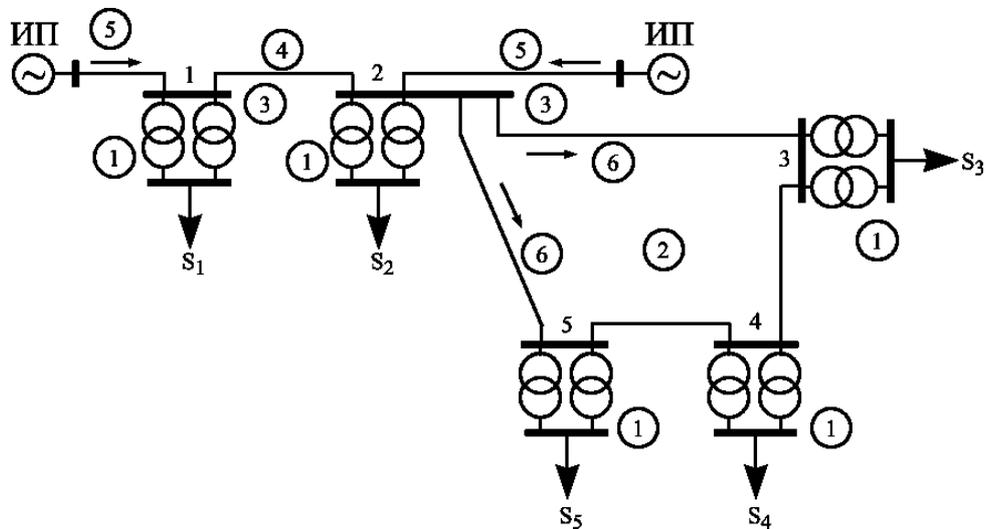


Рис. 30. Схема сети, содержащей магистраль с двухсторонним питанием и разомкнутую сеть

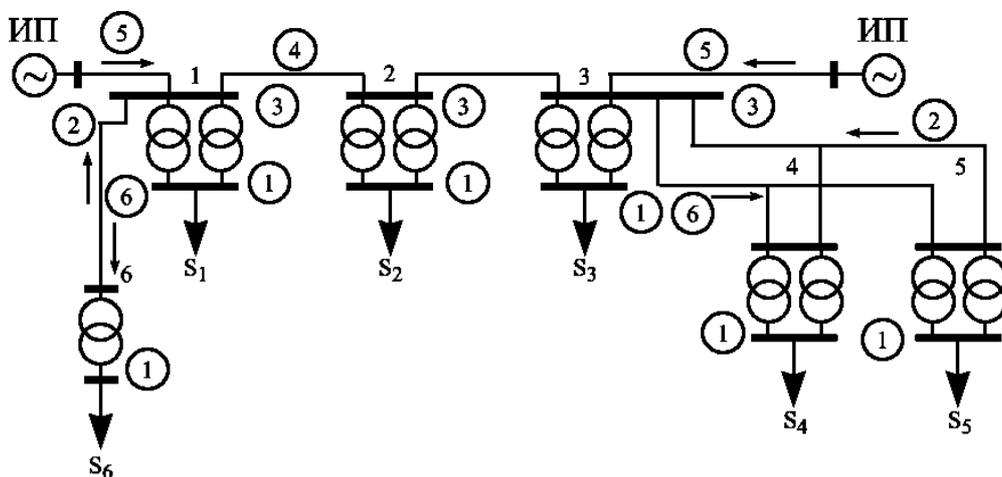


Рис. 31. Схема сети, содержащей магистраль с двухсторонним питанием и питаемое от нее кольцо

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 28.

1. Определение приведенной нагрузки узла 5.
2. Определение приведенной нагрузки узла 4.
3. Расчет потоков мощности с учетом потерь в разомкнутой магистрали 2-4-5.
4. Определение приведенной нагрузки узла 2.
5. Определение приведенной нагрузки узла 3.
6. Определение приведенной нагрузки узла 1.
7. Определение суммарной мощности узла 2 (с учетом потока мощности в начале участка 2-4).
8. Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце А-1-2-3-А.
9. Расчет напряжений в узлах кольца по известному напряжению источника питания.
10. Расчет напряжений в узлах разомкнутой сети.

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 29.

1. Определение приведенных мощностей нагрузок i -го узла (узел 1, 2, 3, 4, 5, 6).
2. Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце 3-4-5-6-3.
3. Определение суммарной мощности узла 3.
4. Расчет потоков мощности с учетом потерь в разомкнутой сети ИП-1-2-3.
5. Расчет напряжений в узлах разомкнутой сети по известному напряжению источника питания.
6. Расчет напряжений в узлах кольца сети по найденному напряжению третьего узла.

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 30.

1. Определение приведенной мощности нагрузки i -го узла (узел 1, 2, 3, 4, 5, 6).
2. Расчет потоков мощностей в разомкнутых участках сети 1-6 и 3-4-5.
3. Определение расчетной нагрузки узлов (узлы 1, 2, 3).
4. Расчет потоков мощности с учетом потерь в сети с двухсторонним питанием.
5. Определение напряжений в узлах магистрали с двухсторонним питанием.
6. Расчет напряжений в узлах разомкнутой сети:
 - а) в узлах 4, 5 по напряжению узла 3;
 - б) в узле 6 по напряжению узла 1.

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 31.

1. Определение приведенной мощности нагрузки узлов (узлы 1, 2, 3, 4, 5).
2. Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце 2-3-4-5-2.
3. Определение расчетных нагрузок узлов (узел 1 и 2).
4. Расчет потоков мощности с учетом потерь в магистрали с двухсторонним питанием.
5. Определение напряжений в узлах магистрали с двухсторонним питанием.
6. Определение напряжений в узлах кольца по найденному напряжению узла 2.

Алгоритм расчета по каждому выделенному пункту приведен в соответствующих разделах (2.1, 2.2, 3.1, 3.3).

Примечание: порядок расчета сети (см. рис. 28-31) в тексте показан относительно цифр в кружках, приведенных на рисунках.

Лекция 18.

Расчет режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями.

Цель лекции: показать как определяется напряжение на низкой и средней стороне трансформаторов и привести порядок расчета режимов в сети с двумя и более номинальными напряжениями.

Все рассмотренные способы электрического расчета сетей позволяли определять напряжения на стороне высокого напряжения (ВН) подстанций. Рассмотрим способ расчета напряжения на стороне низкого напряжения (НН) подстанции (см. рис. 32) /2/. На рис. 32 силовой трансформатор представлен в виде двух элементов: первый – сопротивление трансформатора \underline{Z}_{T1} , второй – идеальный трансформатор. Идеальный трансформатор не имеет сопротивления, но обладает коэффициентом трансформации:

$$n_T = \frac{U_{Вном}}{U_{Нном}}. \quad (131)$$

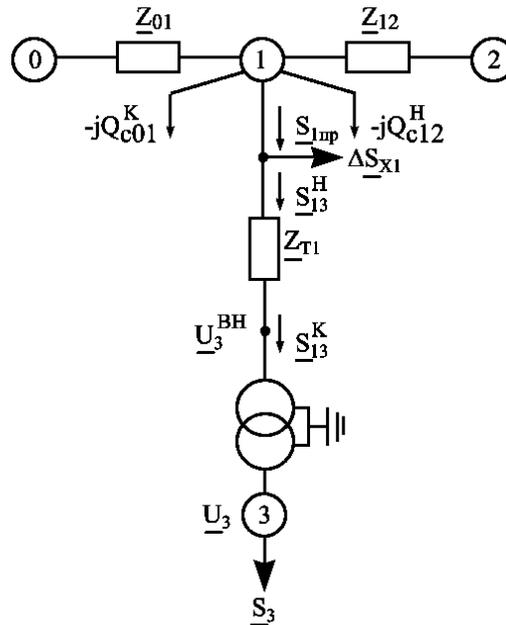


Рис. 32. Схема для определения напряжения на низкой стороне трансформатора

Такое условное разделение силового трансформатора на его сопротивление и идеальный трансформатор применяется, когда совместно рассматриваются сети высшего и низшего напряжений без приведения параметров сети к одному базисному напряжению. Расчет напряжения низкой стороны трансформатора ведется так же, как и напряжения в конце любого сопротивления.

Обозначим приведенное к стороне ВН напряжение на шинах НН - \underline{U}_3^{BH} ; действительное напряжение на шинах НН - \underline{U}_3 . Мощность нагрузки узла 3, \underline{S}_3 , известна. Тогда расчет напряжения на шинах НН подстанции осуществляется в следующем порядке:

определяется мощность, входящая в обмотку ВН силового трансформатора:

$$\underline{S}_{13}^H = \underline{S}_{1np} - \Delta \underline{S}_{X1}, \quad (132)$$

где

$$\underline{S}_{1np} = \underline{S}_3 + \Delta \underline{S}_{T1} + \Delta \underline{S}_{X1}; \quad (133)$$

приведенную нагрузку трансформатора \underline{S}_{1np} можно найти из понятия расчетной нагрузки:

$$\underline{S}_{1np} = \underline{S}_{P1} + j \cdot Q_{c01}^K + j \cdot Q_{c12}^H.$$

По известным напряжению узла \underline{U}_1 и мощности в начале участка \underline{S}_{13}^H легко определить напряжение низкой стороны трансформатора, приведенное к высокой \underline{U}_3^{BH} в конце сопротивления \underline{Z}_{T1} :

$$\underline{U}_3^{BH} = \underline{U}_1 - \frac{P_{13}^H \cdot R_{T1} + Q_{13}^H \cdot X_{T1}}{U_1^*} - j \cdot \frac{P_{13}^H \cdot X_{T1} - Q_{13}^H \cdot R_{T1}}{U_1^*}. \quad (134)$$

Модуль и фаза этого напряжения равны

$$U_3^{BH} = \sqrt{\left(U_1 - \frac{P_{13}^H \cdot R_{T1} + Q_{13}^H \cdot X_{T1}}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{P_{13}^H \cdot X_{T1} - Q_{13}^H \cdot R_{T1}}{U_1} \right)^2}; \quad (135)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_{13}^H \cdot X_{T1} - Q_{13}^H \cdot R_{T1}}{U_1 - (P_{13}^H \cdot R_{T1} + Q_{13}^H \cdot X_{T1})}. \quad (136)$$

Чтобы найти действительное напряжение на шинах НН подстанции, т.е. \underline{U}_3 , надо \underline{U}_3^{BH} разделить на коэффициент трансформации n_T :

$$\underline{U}_3 = \frac{\underline{U}_3^{BH}}{n_T} = \underline{U}_3^{BH} \cdot \frac{U_{Нном}}{U_{Вном}}. \quad (137)$$

Порядок расчета сети с разными номинальными напряжениями

Рассмотрим последовательность расчета сети с разными номинальными напряжениями на примере сети с двумя номинальными напряжениями $U_{ВН}$, $U_{СН}$ (см. рис. 33). Здесь трехобмоточный трансформатор является трансформатором связи между сетями разного номинального напряжения. На рис. 34 показана схема замещения сети с идеальными трансформаторами.

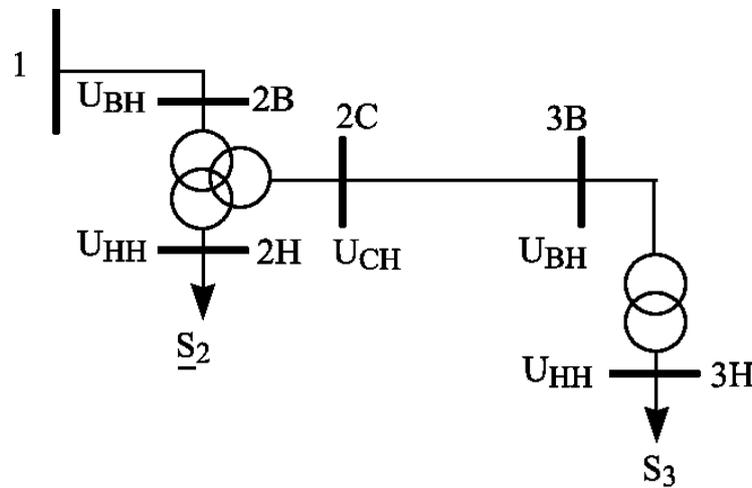


Рис. 33. Схема сети с двумя номинальными напряжениями

Определим приведенные нагрузки узлов \underline{S}_3 и \underline{S}_2 и преобразуем схему замещения к виду, показанному на рис. 35.

На рис. 35 представлен один идеальный силовой трансформатор, соответствующий преобразованию напряжения от высокого к среднему.

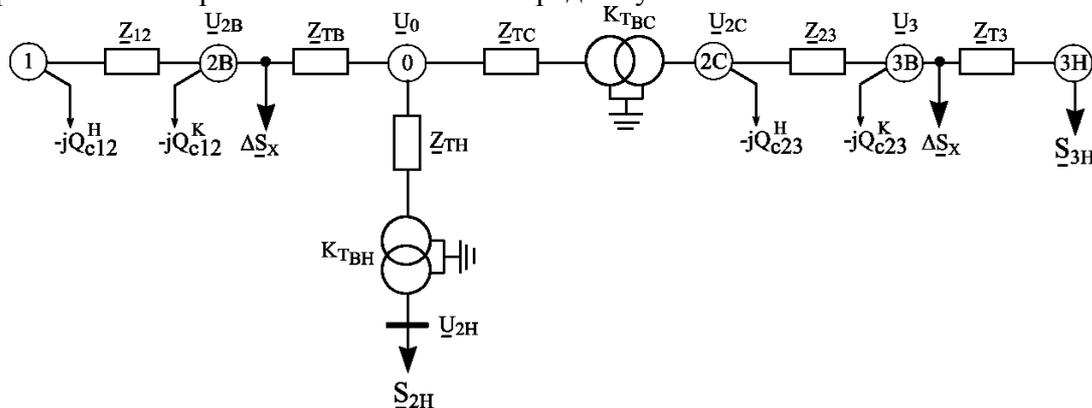


Рис. 34. Схема замещения сети с идеальными трансформаторами

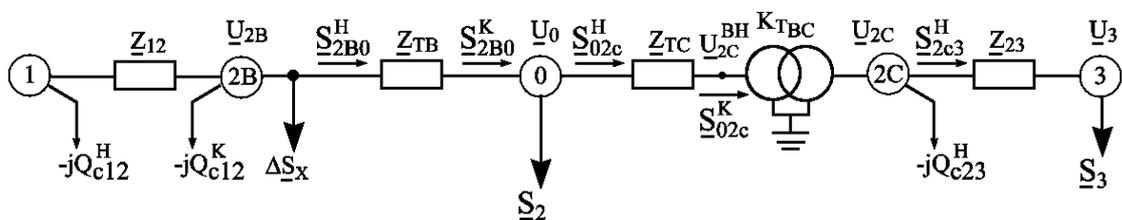


Рис. 35. Преобразованная схема замещения сети

Таким образом, в схеме, приведенной на рис. 35, показаны Z_{TC} – сопротивление обмотки СН трансформатора и идеальный силовой трансформатор, не имеющий сопротивления, но обладающий коэффициентом трансформации:

$$K_{TBC} = \frac{U_{BH}}{U_{CH}}. \quad (138)$$

В узле 3 приведена расчетная нагрузка.

Расчет сети с разными номинальными напряжениями можно проводить двумя способами.

Первый способ – приведение сети к одному базисному напряжению.

При этом рассчитывается режим сети, схема замещения которой показана на рис.36, где отсутствуют идеальные трансформаторы, но сопротивление линии 23 приведено к высокой стороне, т.е. к U_{BH} .

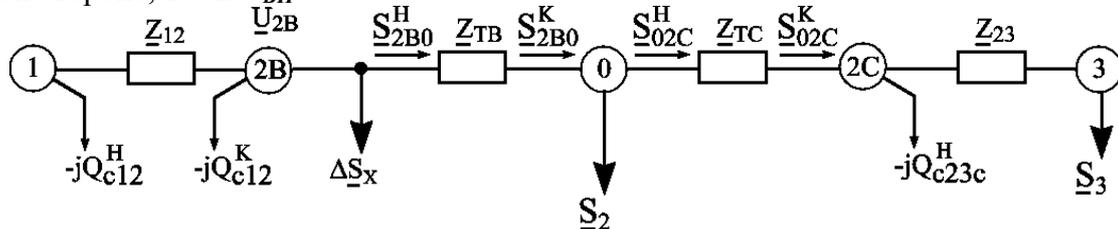


Рис. 36. Схема замещения

Приведение к ВН сопротивления осуществляется по следующему выражению:

$$Z_{23}^B = Z_{23} \cdot K_{TBC}^2 = Z_{23} \cdot \left(\frac{U_{BH}}{U_{CH}} \right)^2. \quad (139)$$

Аналогично для проводимости: $Y_{23}^B = Y_{23} \cdot \frac{1}{K_{TBC}^2}$.

Этот способ часто используется при расчете токов короткого замыкания и редко - при расчете установившихся режимов электрических сетей и систем.

Второй способ – учет идеальных трансформаторов, т.е. коэффициентов трансформации при определении напряжения.

Последовательность расчета режима сети по данным конца

1. Ведется расчет режима разомкнутой сети среднего напряжения по значениям напряжения U_3 (участок 2С-3). Определяется напряжение на шинах СН трансформатора 2 U_{2C} (см. рис. 35).

2. Напряжение U_{2C} приводится к высокой стороне:

$$U_{2C}^{BH} = K_{Tbc} \cdot U_{2C}, \quad (140)$$

а потоки мощности до и после идеального трансформатора равны между собой.

$$S_{02c}^K = S_{2c3}^H. \quad (141)$$

3. Дальнейший расчет ведется по алгоритму расчета режима разомкнутой сети на высокой стороне силового трансформатора, т.е. при известном напряжении в конце сети U_{2c}^{BH} .

Последовательность расчета режима сети по данным начала

I этап – определение потоков мощности с учетом потерь сначала в сети СН, затем в сети ВН – так же, как для сети с одним номинальным напряжением, вплоть до определения потоков мощности в началах головных участков сети ВН. При этом потери мощности в сети СН определяются по номинальному напряжению сети СН, а в сети ВН - по номинальному напряжению сети ВН.

II этап – определение напряжений в узлах сети ВН по заданному напряжению источника питания и рассчитанным потокам мощности в начале каждого участка сети.

Определяется напряжение в нулевой точке трансформатора U_0 :

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{2B} - \underline{U}_{\Delta 2B0}, \quad (142)$$

где $\underline{U}_{\Delta 2B0}$ – падение напряжения в обмотке ВН трансформатора.

$$\underline{U}_{\Delta 2B0} = \frac{P_{2B0}^H \cdot R_{TB} + Q_{2B0}^H \cdot X_{TB}}{U_{2B}} + j \frac{P_{2B0}^H \cdot X_{TB} - Q_{2B0}^H \cdot R_{TB}}{U_{2B}}.$$

Затем рассчитывается напряжение средней стороны, приведенное к высокой стороне

$$\underline{U}_{2C}^{BH} = \underline{U}_0 - \underline{U}_{\Delta 02C}, \quad (143)$$

где $\underline{U}_{\Delta 02C}$ – падение напряжения в обмотке СН трансформатора.

$$\underline{U}_{\Delta 02C} = \frac{P_{02C}^H \cdot R_{TC} + Q_{02C}^H \cdot X_{TC}}{U_0} + j \frac{P_{02C}^H \cdot X_{TC} - Q_{02C}^H \cdot R_{TC}}{U_0}.$$

После этого находится действительное напряжение средней стороны силового трансформатора.

$$U_{2C} = \frac{U_{2C}^{BH}}{K_{TBC}} = U_{2C}^{BH} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{BH}}. \quad (144)$$

Затем рассчитываются напряжения в узлах сети среднего напряжения по значению \underline{U}_{2C} как напряжения источника питания.

Если в сети есть несколько различных трансформаторов связи, то коэффициенты трансформации учитываются аналогичным образом.

При расчетах установившихся режимов сложных электрических сетей и систем на ЭВМ для расчета сетей с различными номинальными напряжениями используются уравнения узловых напряжений, учитывающие наличие в сети трансформаторов связи.

Лекция 19.

Регулирование напряжения в сети.

Выбор ответвлений РПН двухобмоточных трансформаторов.

Цель лекции: дать понятие о регулировании напряжения, способах и средствах регулирования, показать как обеспечить желаемое напряжение на стороне НН двухобмоточного трансформатора.

Под регулированием напряжения понимают принудительное изменение режима напряжения в сети и у электроприемников с целью обеспечить требования ГОСТ 13109-97 или оптимальный режим по напряжению.

Регулирование напряжения может осуществляться:

изменением напряжения у источника питания, – например, изменением коэффициента трансформации силового трансформатора под нагрузкой (РПН) либо со снятием нагрузки (ПБВ) или с помощью линейного регулятора;

изменением величины реактивной мощности, протекающей по сети (поперечная компенсация реактивной мощности);

изменением реактивного сопротивления сети (продольная компенсация реактивной мощности).

Для обеспечения необходимых режимов напряжения во всей распределительной сети должны выбираться централизованные средства регулирования напряжения, к которым относятся трансформаторы с РПН и линейные регуляторы, устанавливаемые в центрах питания. Если регулирование напряжения в центре питания не обеспечивает необходимого уровня напряжения, то используют способы местного (локального) регулирования напряжения (изменение коэффициента трансформации цеховых трансформаторов, установки продольной компенсации, батареи конденсаторов поперечной компенсации и т. д.)

Для определения добавки напряжения, создаваемой трансформатором с РПН (линейным регулятором), необходимо выбрать нужное напряжение ответвлений (отпаяк) РПН трансформатора или линейного регулятора.

Рассмотрим алгоритм выбора номера ответвлений (отпаяк) РПН, установленных на различного типа трансформаторах и автотрансформаторах, а также линейных регуляторов.

Двухобмоточный силовой трансформатор
(устройство РПН установлено на стороне ВН)

1. Определение приведенного к стороне ВН напряжения стороны НН силового трансформатора

$$U_{НН}^{ВН} = U_{ВН} - \Delta U_T, \quad (145)$$

где $U_{ВН}$ - фактическое напряжение на стороне ВН, полученное в результате расчета режима сети высокого напряжения;

ΔU_T - модуль падения напряжения в силовом трансформаторе.

2. Определение желаемого коэффициента трансформации

$$K_{ТВН}^{жел} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел}}, \quad (146)$$

где $U_{НН}^{жел}$ - желаемое напряжение на стороне НН силового трансформатора.

3. Выбор номера отпайки РПН.

Условием выбора номера отпайки РПН является его попадание в диапазон регулирования напряжения, т.е.

$$-N \leq n \leq +N, \quad (147)$$

где $\pm N$ - крайние номера отпаяк РПН (даются в справочниках, - например, $\pm 9 \times 1,78\%$);

n - номер отпайки.

Шаг регулирования t задается в процентах, - например, 1,78%.

Диапазон регулирования напряжения равен:

$$\pm N \cdot t, \quad (148)$$

например, $\pm 16\%$.

Действительный коэффициент трансформации определяется выражением:

$$K = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{НН}^{ном}} \cdot (1 + n \cdot t_*) = K_{ТВН}^{ном} \cdot (1 + n \cdot t_*), \quad (149)$$

где t_* - шаг регулирования в относительных единицах.

Если в качестве желаемого принять действительный коэффициент трансформации, т.е.:

$$K_{ТВН}^{жел} = K_{ТВН}^{ном} \cdot (1 + n_{жел} \cdot t_*), \quad (150)$$

то из (150) можно найти желаемый номер отпайки РПН для обеспечения требуемого значения напряжения на низкой стороне трансформатора:

$$n_{жел} = \left(\frac{K_{ТВН}^{жел}}{K_{ТВН}^{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_*} = \left(\frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел} \cdot K_{ТВН}^{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_*}. \quad (151)$$

Полученный номер отпайки округляется до ближайшего целого, $n_{станд}$.

По найденному $n_{станд}$ определяется фактическое напряжение низкой стороны $U_{НН}^{факт}$:

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ТВН}^{ном} \cdot (1 + n_{станд} \cdot t_{*})}. \quad (152)$$

Лекция 20.

Регулирование напряжения с помощью ответвлений РПН трехобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов, линейных регуляторов.

Цель лекции: привести порядок выбора номера отпайки РПН, линейного регулятора для обеспечения желаемого напряжения.

В трехобмоточном силовом трансформаторе регулирование напряжения под нагрузкой выполняется в обмотке высшего напряжения (РПН устанавливается в нейтрали обмотки ВН), а обмотка среднего напряжения содержит ответвления, которые переключаются после снятия нагрузки (устройство ПБВ – переключение без возбуждения, установлено в обмотке СН). Поэтому сначала необходимо выбрать номер отпайки РПН, чтобы обеспечить желаемое напряжение на низшей стороне трансформатора, а затем рассчитывать ответвление ПБВ для обеспечения желаемого значения на средней стороне трансформатора.

Действительные коэффициенты трансформации равны:

$$K_{ТВН} = K_{ТВН}^{ном} \cdot (1 + n_p \cdot t_{p*}), \quad (153)$$

$$K_{ТВС} = K_{ТВС}^{ном} \cdot \frac{1 + n_p \cdot t_{p*}}{1 + n_n \cdot t_{n*}}, \quad (154)$$

где n_p, t_{p*} - номер отпайки и шаг регулирования устройства РПН в относительных единицах;

n_n, t_{n*} - номер отпайки и шаг регулирования устройства ПБВ в относительных единицах.

Порядок выбора

Определяется напряжение низшей стороны трансформатора, приведенное к стороне высшего напряжения:

$$U_{НН}^{ВН} = U_{ВН} - \Delta U_{ТВ} - \Delta U_{ТН}, \quad (155)$$

где $U_{ВН}$ – фактическое напряжение высокой стороны трансформатора, полученное в результате расчета режима сети высшего напряжения;

$\Delta U_{ТВ}, \Delta U_{ТН}$ – соответственно модули падения напряжения в обмотке ВН и обмотке НН силового трансформатора.

Рассчитывается напряжение средней стороны трансформатора, приведенное к стороне высшего напряжения:

$$U_{СН}^{ВН} = U_{ВН} - \Delta U_{ТВ} - \Delta U_{ТС}, \quad (156)$$

где $\Delta U_{ТС}$ – модуль падения напряжения в обмотке СН трансформатора.

Определяются желаемые коэффициенты трансформации напряжения с высокой на низкую и с высокой на среднюю стороны трансформатора.

$$K_{ТВН}^{жел} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел}}; \quad K_{ТВС}^{жел} = \frac{U_{СН}^{ВН}}{U_{СН}^{жел}}, \quad (157)$$

где $U_{НН}^{жел}, U_{СН}^{жел}$ – соответственно желаемые напряжения низкой и средней сторон трансформатора.

Выбирается номер отпайки РПН, $n_p^{жел}$, со стороны высшего напряжения, обеспечивающий желаемое напряжение на шинах НН (трансформатор рассматривается как двухобмоточный с обмотками высшего и низшего напряжения), из выражения (153):

$$n_p^{жсел} = \left(\frac{K_{ТВН}^{жсел}}{K_{ТВН}^{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_{p*}} = \left(\frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жсел} \cdot K_{ТВН}^{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_{p*}}. \quad (158)$$

Полученный номер округляется до ближайшего целого $n_p^{станд}$.

Выбирается номер ответвления ПБВ, $n_n^{жсел}$, со стороны среднего напряжения, обеспечивающий желаемое напряжение на средней стороне трансформатора, из выражения (154):

$$\begin{aligned} n_n^{жсел} &= \left(\frac{K_{ТВС}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}{K_{ТВС}^{жсел}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_{n*}} = \\ &= \left(\frac{K_{ТВС}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*}) \cdot U_{СН}^{жсел}}{U_{СН}^{ВН}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_{n*}}. \end{aligned} \quad (159)$$

Полученный номер округляется до ближайшего целого $n_n^{станд}$.

Рассчитываются действительные значения напряжения на шинах низшего и среднего напряжения:

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ТВН}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}, \quad (160)$$

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН} \cdot (1 + n_n^{станд} \cdot t_{n*})}{K_{ТВС}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}. \quad (161)$$

Если для обеспечения желаемого напряжения на средней стороне трансформатора не хватает диапазона регулирования устройства ПБВ, то со стороны обмотки среднего напряжения устанавливается линейный регулятор (вольтодобавочный трансформатор). Номер ответвления линейного регулятора в этом случае определяют по формуле:

$$n_{ЛР}^{жсел} = \left(\frac{U_{СН}^{жсел} - U_{СН}^{факт}}{U_{ЛР}^{ном}} \right) \frac{1}{t_{ЛР*}}, \quad (162)$$

где $t_{ЛР*}$ - шаг (ступень) регулирования линейного регулятора в относительных единицах.

$U_{ЛР}^{ном}$ - номинальное напряжение линейного регулятора.

Рассчитанный номер ответвления линейного регулятора округляется до ближайшего целого, $n_{ЛР}^{станд}$.

Мощность линейного регулятора выбирается по мощности нагрузки, подключаемой к шинам СН.

Действительное значение напряжения на шинах СН при установке линейного регулятора равно:

$$U_{СН}^{действ} = U_{СН}^{факт} + n_{ЛР}^{станд} \cdot t_{ЛР*} \cdot U_{ЛР}^{ном}, \quad (163)$$

где $U_{СН}^{факт}$ - определяется по выражению (161);

Автотрансформаторы

Автотрансформаторы могут иметь устройство регулирования напряжения под нагрузкой в нейтрали или со стороны среднего либо со стороны высшего напряжения (см. рис. 37). В автотрансформаторах регулирование напряжения во всех случаях осуществляется только на средней стороне. Чтобы получить желаемое напряжение на стороне НН автотрансформатора, нужно установить линейный регулятор со стороны низкого напряжения либо включить его в нейтраль автотрансформатора.

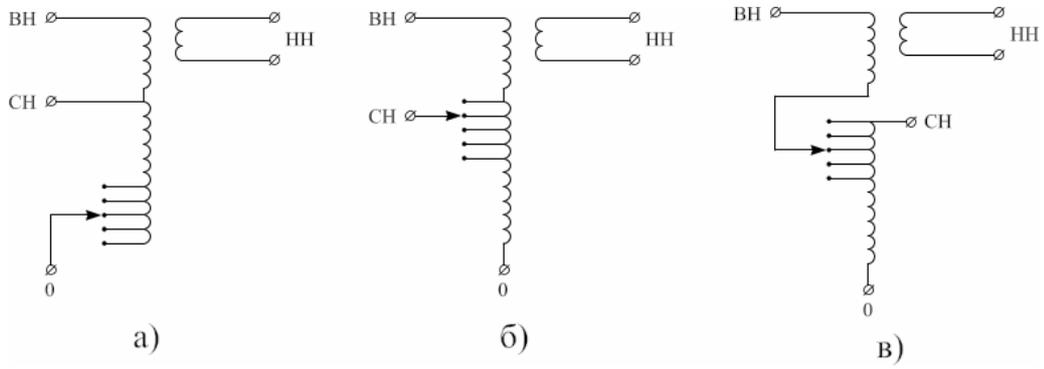


Рис. 37. Расположение устройства РПН в автотрансформаторе:

- а) устройство РПН расположено в нейтрали
- б) устройство РПН расположено в обмотке СН
- в) устройство РПН расположено в обмотке ВН

Номинальные коэффициенты автотрансформатора равны:

$$K_{BC}^{ном} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{СН}^{ном}}; \quad K_{ВН}^{ном} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{НН}^{ном}} = const, \quad (164) \quad \text{т.е.}$$

коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на низшую не регулируется.

Рассмотрим различные случаи регулирования напряжения под нагрузкой в автотрансформаторе.

Устройство РПН установлено в обмотке СН автотрансформатора.

В этом случае действительный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны автотрансформатора на среднюю равен:

$$K_{BC}^{факт} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{СН}^{ном} \cdot (1 + n_p \cdot t_{p*})} = \frac{K_{BC}^{ном}}{1 + n_p \cdot t_{p*}}. \quad (165)$$

Номер отпайки РПН автотрансформатора выбирается с целью обеспечения желаемого напряжения средней стороны автотрансформатора по следующему алгоритму:

определяются напряжения средней и низкой сторон, приведенные к высшей стороне автотрансформатора, по выражениям (155), (156); выбирается желаемый номер отпайки РПН из выражения (165):

$$n_{жел} = \left(\frac{K_{BC}^{ном}}{K_{BC}^{жел}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_{p*}} = \left(\frac{K_{BC}^{ном} \cdot U_{СН}^{жел}}{U_{СН}^{ВН}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_{p*}}; \quad (166)$$

номер отпайки РПН округляется до ближайшего целого, $n_{станд}$; определяются действительные уровни напряжения средней и низшей сторон автотрансформатора:

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН}}{K_{BC}^{факт}} = \frac{U_{СН}^{ВН} \cdot (1 + n_{станд} \cdot t_{p*})}{K_{BC}^{ном}}; \quad (167)$$

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}}. \quad (168)$$

Если действительное значение напряжения не удовлетворяет желаемому, то со стороны низшего напряжения автотрансформатора устанавливается линейный регулятор (рис. 38), номер ответвления которого определяется по формуле:

$$n_{ЛР} = \left(\frac{U_{НН}^{жел}}{U_{НН}^{факт}} - 1 \right) \frac{1}{t_{ЛР*}} \quad (169)$$

и округляется до ближайшего целого, $n_{ЛР}^{станд}$.

Тогда действительное напряжение на шинах НН равно:

$$U_{\text{HH}}^{\text{факт}} = U_{\text{HH}}^{\text{расч}} + n_{\text{ЛР}}^{\text{станд}} \cdot U_{\text{ЛР}}^{\text{ном}} \cdot t_{\text{ЛР}*}, \quad (170)$$

$$\text{где } U_{\text{HH}}^{\text{расч}} = \frac{U_{\text{HH}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ВН}}^{\text{ном}}}. \quad (171)$$

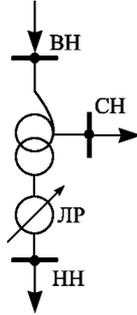


Рис. 38. Установка линейного регулятора со стороны НН автотрансформатора
Устройство РПН установлено в обмотке СН автотрансформатора, линейный регулятор – в
нейтрали обмотки ВН автотрансформатора.

Добавочная ЭДС линейного регулятора в относительных единицах $\Delta e_{\text{ЛР}*}$, необходимая для обеспечения желаемого напряжения на стороне НН автотрансформатора, определяется из соотношения:

$$U_{\text{HH}}^{\text{жел}} = \frac{U_{\text{HH}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ВН}}^{\text{ном}} (1 + \Delta e_{\text{ЛР}*})} = \frac{U_{\text{HH}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ВН}}^{\text{ном}} (1 + n_{\text{ЛР}} \cdot t_{\text{ЛР}*})}. \quad (172)$$

Отсюда желаемый номер ответвления линейного регулятора равен:

$$n_{\text{ЛР}}^{\text{жел}} = \left(\frac{K_{\text{ВН}}^{\text{жел}}}{K_{\text{ВН}}^{\text{ном}}} - 1 \right) \frac{1}{t_{\text{ЛР}*}}. \quad (173)$$

Округляем расчетное значение до ближайшего целого, $n_{\text{ЛР}}^{\text{станд}}$, и определяем фактическое напряжение низкой стороны

$$U_{\text{HH}}^{\text{факт}} = \frac{U_{\text{HH}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ВН}}^{\text{ном}} (1 + n_{\text{ЛР}} \cdot t_{\text{ЛР}*})} = \frac{U_{\text{HH}}^{\text{ВН}} \cdot U_{\text{HH}}^{\text{ном}}}{U_{\text{ВН}}^{\text{ном}} (1 + n_{\text{ЛР}} \cdot t_{\text{ЛР}*})}, \quad (174)$$

где $U_{\text{HH}}^{\text{ВН}}$ определяется по выражению (155).

Номер отпайки РПН выбирается из выражения для определения действительного коэффициента трансформации высшего напряжения в среднем:

$$K_{\text{ВС}} = K_{\text{ВС}}^{\text{ном}} \frac{1 + n_p \cdot t_{\text{р}*}}{1 + n_{\text{ЛР}} \cdot t_{\text{ЛР}*}}, \quad (175)$$

откуда

$$\begin{aligned} n_p^{\text{жел}} &= \left(\frac{K_{\text{ВС}}^{\text{ном}} (1 + n_{\text{ЛР}}^{\text{станд}} \cdot t_{\text{ЛР}*})}{K_{\text{ВС}}^{\text{жел}}} - 1 \right) \frac{1}{t_{\text{р}*}} = \\ &= \left(\frac{K_{\text{ВС}}^{\text{ном}} (1 + n_{\text{ЛР}}^{\text{станд}} \cdot t_{\text{ЛР}*}) \cdot U_{\text{СН}}^{\text{жел}}}{U_{\text{СН}}^{\text{ВН}}} - 1 \right) \frac{1}{t_{\text{р}*}}, \end{aligned} \quad (176)$$

где $U_{\text{СН}}^{\text{ВН}}$ определяется по выражению (156).

Полученный номер ответвления округляется до ближайшего целого, $n_p^{\text{станд}}$. Рассчитывается действительное значение напряжения на средней стороне автотрансформатора:

$$U_{CH}^{факт} = \frac{U_{CH}^{ВН} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}{K_{BC}^{ном} \cdot (1 + n_{ЛР} \cdot t_{ЛР*})}. \quad (177)$$

Устройство РПН установлено в нейтрали автотрансформатора.

Действительный коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением равен:

$$K_{BC} = \frac{U_{ВН}^{ном} \cdot (1 + n_p \cdot t_{p*})}{U_{CH}^{ном} + n_p \cdot t_{p*} \cdot U_{ВН}^{ном}} = \frac{K_{BC}^{ном} \cdot (1 + n_p \cdot t_{p*})}{1 + n_p \cdot t_{p*} \cdot K_{BC}^{ном}}. \quad (178)$$

Чтобы выбрать номер отпайки РПН, обеспечивающий желаемое напряжение средней стороны, необходимо по выражению (156) определить напряжение средней стороны, приведенное к высшей, $U_{CH}^{ВН}$, затем вычислить желаемый коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением по выражению (157).

Номер отпайки РПН определяется из выражения для действительного коэффициента трансформации (178):

$$n_p^{жел} = \frac{1 - \frac{K_{BC}^{жел}}{K_{BC}^{ном}}}{\left(\frac{K_{BC}^{жел}}{K_{BC}^{ном}} - 1\right) \cdot t_{p*}}. \quad (179)$$

Найденный номер отпайки РПН округляется до ближайшего целого $n_p^{станд}$ и по нему рассчитывается напряжение средней стороны автотрансформатора:

$$U_{CH}^{факт} = \frac{U_{CH}^{ВН} \cdot \left(\frac{1}{K_{BC}^{ном}} + n_p^{станд} \cdot t_{p*}\right)}{1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*}}. \quad (180)$$

Действительное напряжение на шинах НН в этом случае равно:

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}. \quad (181)$$

Если действительное значение напряжения низкой стороны автотрансформатора не соответствует желаемому, то со стороны обмотки НН устанавливается линейный регулятор, номер ответвления которого рассчитывается по формуле (169).

Действительное напряжение на шинах НН при установке линейного регулятора равно:

$$U_{НН}^{действ} = U_{НН}^{факт} \left(1 + n_{ЛР}^{станд} \cdot t_{ЛР*}\right), \quad (182)$$

где $U_{НН}^{факт}$ определяется по выражению (181).

Устройство РПН установлено в обмотке ВН автотрансформатора.

Действительный коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением равен:

$$K_{BC} = \frac{U_{ВН}^{ном} \cdot (1 + n_p \cdot t_{p*})}{U_{CH}^{ном}} = K_{BC}^{ном} (1 + n_p \cdot t_{p*}). \quad (183)$$

Отсюда можно определить номер отпайки РПН, обеспечивающий желаемое напряжение на средней стороне:

$$n_p^{жел} = \left(\frac{K_{BC}^{жел}}{K_{BC}^{ном}} - 1\right) \frac{1}{t_{p*}}, \quad (184)$$

где $K_{BC}^{жел}$ определяется по выражению (157).

При округлении его до ближайшего целого, $n_p^{станд}$, действительное напряжение на шинах СН определяется как

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН}}{K_{ВС}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}. \quad (185)$$

Действительное напряжение на шинах НН равно

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p*})}. \quad (186)$$

Если действительное напряжение на шинах НН не соответствует желаемому, со стороны НН устанавливается линейный регулятор, номер ответвления которого определяется по выражению:

$$n_{ЛР}^{жел} = \left(\frac{U_{НН}^{жел} - U_{НН}^{факт}}{U_{ЛР}^{ном}} \right) \cdot \frac{1}{t_{ЛР*}}, \quad (187)$$

а действительное напряжение на шинах НН после установки линейного регулятора - по выражению:

$$U_{НН}^{действ} = U_{НН}^{факт} + n_{ЛР}^{станд} \cdot t_{ЛР*} \cdot U_{ЛР}^{ном}. \quad (188)$$

Таким образом, рассмотрены все возможные случаи установки РПН в автотрансформаторе в сочетании с линейным регулятором для обеспечения желаемых напряжений на сторонах СН и НН.

Лекция 21.

Определение наибольшей потери напряжения в сети.

Цель лекции: охарактеризовать допущения при расчете разомкнутых местных сетей и показать как определяется наибольшая потеря напряжения.

Допущения при расчете электрических сетей напряжением до 35 кВ включительно:

- 1) зарядная мощность линий не учитывается;
- 2) не учитывается реактивное сопротивление кабеля;
- 3) не учитываются потери в стали трансформаторов;
- 4) при расчете потоков мощности не учитываются потери мощности;
- 5) пренебрегают поперечной составляющей падения напряжения;
- 6) расчет потери напряжения ведется по номинальному напряжению.

Наибольшей потерей напряжения называется разница между напряжением источника питания и узла с самым низким напряжением.

Далее выводится формула для наибольшей потери напряжения:

$$\Delta U_{НБ} = \frac{\sum_{k=2}^n (P_k R_k + Q_k X_k)}{U_{ном}}$$

где P_k, Q_k — мощность нагрузки k -го узла; r_k, x_k — сопротивление от узла 1 до узла k ; n — количество узлов.

Рассматривается на примерах порядок определения наибольшей потери напряжения в разветвленной сети.

Лекция 22.

Расчет линии с равномерно распределенной нагрузкой. Однородные сети.

Цель лекции: показать особенности расчета режимов в линии с равномерно распределенной нагрузкой, дать понятие об однородных сетях.

Линия, к которой по всей длине на равных расстояниях подключены равные нагрузки рассматривается как линия с равномерно распределенной нагрузкой.

В такой линии потери мощности в 3 раза меньше, чем в линии той же длины, но с нагрузкой, сосредоточенной в конце линии. Поэтому в расчетах режимов ее замещают линией с сосредоточенной суммарной нагрузкой, приложенной в точке, соответствующей 1/3 длины линии.

Потеря напряжения в линии с равномернораспределенной нагрузкой в 2 раза меньше, чем в линии с сосредоточенной в конце нагрузкой, поэтому ее замещают линией сосредоточенной суммарной нагрузкой, приложенной в середине линии.

В однородной сети отношение активного и реактивного сопротивлений всех ветвей схемы замещения сети одинаково. В однородной сети все участки которой выполнены проводами (кабелями) одного сечения распределение мощностей можно находить по длинам линий на головных участках сети, что очень важно при проектировании, когда сечения еще неизвестны.

В однородных сетях распределение активных и реактивных мощностей не зависят друг от друга. Поэтому можно рассчитать как бы две независимые друг от друга сети: одну – нагруженную только активными нагрузками, другую – только реактивными. Такой прием называют расщеплением сети.

Лекция 23.

Линии электропередачи сверхвысокого напряжения.

Цель лекции: привести общую характеристику ЛЭП сверхвысокого напряжения.

Линии электропередачи СВН являются межсистемными связями. Для них характерны большая протяженность (более 500 км) и значительная передаваемая мощность (более 500 МВА на одну цепь). В таких линиях применяют расщепление проводов.

ЛЭП сверхвысокого напряжения имеют ряд особенностей, отличающих их от других элементов сети. Это учет распределенности параметров и волновых свойств линии, необходимость применения специальных устройств и мероприятий для управления режимом линии и увеличения пропускной способности линии.

Волновой характер передачи энергии совершается за счет движения результирующих волн напряжения и тока.

Основными характеристиками бегущей волны является фазовая скорость и длина волны.

Длиной волны называется расстояние между двумя соседними точками на линии, фазы колебаний которых отличаются на 2π .

Волновое сопротивление, определяющее токи прямой и обратной волн по соответствующим напряжениям, является функцией параметров линии, связанных с ее конструкцией:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$$

Волновой длиной линии называется величина, характеризующая изменение фазы напряжения или тока при распространении волны от конца к началу линии.

Схему замещения таких линий можно представлять пассивным четырехполюсником.

Натуральная мощность течет по линии, когда сопротивление нагрузки на ее конце равно волновому сопротивлению.

Для ЛЭП СВН характерны большие зарядные мощности, поэтому подключают на концах линии и иногда посередине реакторы поперечной компенсации.

Линии СВН могут выполняться на постоянном токе. Их преимущества следующие: предел передаваемой мощности по линии не зависит от ее длины и больше, чем у передачи переменного тока; снимается понятие передела по статической устойчивости; для таких линий достаточно 2 провода или одного, если в качестве второго использовать землю; энергосистемы, связанные ЛЭП постоянного тока или вставками постоянного тока могут работать не синхронно или с различными частотами; возможен реверс мощности.

Недостатки ЛЭП ПТ: наличие выпрямительных устройств ведет к искажению качества электроэнергии; невозможен отбор мощности; большая стоимость электропередачи.

Лекция 24.

Баланс активной мощности и его связь с частотой.

Цель лекции: показать каким образом регулируется частота в системе, исходя из баланса активной мощности.

В каждый момент времени в системе должен соблюдаться баланс активной мощности, т.е. равенство генерируемой и потребленной мощности с учетом потерь.

При неизменном составе нагрузок системы потребляемая ими мощность связано с частотой переменного тока. Снижение генерируемой мощности приводит к снижению частоты в сети и наоборот.

Причины нарушения баланса мощности:

- а) аварийное отключение генератора;
- б) неожиданный рост потребления мощности;
- в) аварийное отключение линии или трансформаторов связи.

Превышение генерируемой мощности над потребляемой можно ликвидировать, уменьшая мощность генераторов или отключая часть из них. Превышение мощности потребления над генерацией ведет к снижению частоты, его можно ликвидировать либо вводя дополнительные резервы генерирующей мощности, либо автоматической частотной разгрузкой (АЧР).

Различают горячие и холодные резервы мощности. Виды резервов мощности: нагрузочный, ремонтный, аварийный, народнохозяйственный. Кроме резерва мощности на электростанциях должен быть резерв энергии.

АЧР - это дискретная система регулирования, отключающая потребителей ступенями (очередями).

Лекция 25.

Регулирование частоты в системе .

Цель лекции: показать как регулируется частота вращения турбины и частота в ЭЭС.

Задачи лекции: Привести характеристики регуляторов скорости турбины и показать физическую сущность регулирования частоты в ЭЭС.

Регулирование частоты в ЭЭС требует изменения мощности, которые генераторы выдают в сеть. Мощность генераторов определяется мощностью турбы.

Различают нерегулируемую турбину (мощность ее неизменна), турбину со статической характеристикой, астатической характеристикой.

Регуляторы скорости турбин называются первичными регуляторами частоты. Для дополнительной корректировки частоты используют вторичное регулирование автоматическими регуляторами частоты.

Регулирование частоты в ЭЭС осуществляют несколько электростанций.

Станция, балансирующая по частоте воспринимает на себя все изменения потребляемой мощности в системе.

Рассматривается процесс регулирования частоты в системе на примере двух станций, показывается, что изменения мощностей электростанций обратно пропорциональны коэффициентам статизма их регуляторов скорости.

Коэффициент статизма равен тангенсу угла наклона статической характеристики регуляторов скорости.

Лекция 26.

Баланс реактивной мощности и его связь с напряжением. Регулирующий эффект нагрузки.

Цель лекции: показать связь напряжения в системе с балансом реактивной мощности и реагирование нагрузки на изменения режима в сети.

Баланс реактивной мощности это равенство генерируемой и потребленной с учетом потерь реактивной мощности. Генерируемая мощность включает в себя мощность для генераторов, компенсирующих устройств, зарядную мощность ВЛ. В потребляемую мощность входит реактивная мощность потребителей и собственные нужды.

Баланс реактивной мощности в системе определяет некоторый уровень напряжения. Необходимость в оценке баланса реактивной мощности возникает при проектировании подсистемы регулирования напряжения целесообразности ввода новых регулирующих устройств. Нарушение баланса реактивной мощности ведет к изменению уровня напряжения. Если генерируемая реактивная мощность больше потребленной, то напряжение в сети растет и наоборот.

Далее рассматривается как реагирует нагрузка на изменение режима, т.е. уровня напряжения. Если напряжение по каким-то причинам в конце линии понизилось, то нагрузка в силу своего положительного регулирующего эффекта его повысит. Нагрузка имеет положительный регулирующий эффект при $U \geq U_{кр}$ и наоборот. В последнем случае понижение напряжения в конце линии вызывает рост потребления реактивной мощности. Это вызывает рост потерь напряжения в линии и снижение напряжения в конце линии. Опять растет реактивная нагрузка и т.д. Такое явление называется лавиной напряжения, при этом опрокидываются (останавливаются) асинхронные двигатели. Остановить снижение напряжения можно только отключив нагрузку. Для повышения надежности системы в таких ситуациях применяют автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) на генераторах и мощных синхронных двигателях.

Лекция 27.

Генерация и потребление реактивной мощности.

Цель лекции: показать как вырабатывается реактивная мощность на электростанциях и привести общую характеристику потребленной электроэнергии.

Синхронные генераторы на электростанциях вместе с другими источниками реактивной мощности обеспечивают и регулируют баланс реактивной мощности. При этом изменения реактивной мощности генераторов достигается изменением тока возбуждения. Уменьшая ток возбуждения можно снизить генерируемую реактивную мощность. При снижении активной мощности генератора возможно увеличение генерируемой реактивной мощности в пределах, ограничиваемых токами статора и ротора.

Резерв реактивной мощности и возможность перегрузки по ней очень важны при аварийном снижении напряжения. Все генераторы оборудованы АРВ, которые при снижении напряжения на зажимах генератора автоматически увеличивают ток возбуждения и выработку реактивной мощности, но лишь за счет уменьшения активной.

Основными потребителями реактивной мощности в электрических системах являются трансформаторы, ВЛ, асинхронные двигатели, вентильные преобразователи, сварка, электропечная нагрузка и т.д. Суммарные потери реактивной мощности в элементах сети велики и могут достигать 50% мощности, поступающей в сеть.

На промышленных предприятиях потребление реактивной мощности распределяется так: асинхронные двигатели - 65-70%; трансформаторы - 20-25%; другая нагрузка - 10%

Потери реактивной мощности складываются из потерь в линиях, трансформаторах и зарядных мощностей ВЛ. Для ВЛ 110-150 кВ суммарная генерируемая реактивная мощность равна потерям реактивной мощности в них. Баланс реактивной мощности предусматривается отдельно для каждого характерного режима сети.

4. Практические занятия

4.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий

Практические занятия проводятся для того, чтобы студенты получили навыки в расчете установившихся режимов в простых замкнутых и разомкнутых сетях, а также в их комбинациях, для закрепления теоретического материала, изложенного на лекциях. В результате проведения практических занятий студенты должны научиться составлять схемы замещения электрических сетей и определять их параметры, рассчитывать и анализировать установившиеся режимы в разомкнутых сетях, кольцевых сетях, сетях с двухсторонним питанием, сетях с несколькими номинальными напряжениями, обеспечивать желаемое напряжение на шинах низкого и среднего напряжения силовых трансформаторов.

Согласно учебных планов предусмотрено 9 практических занятий (ПЗ), перечень которых приведен ниже.

ПЗ 1. Расчет параметров схем замещения ЛЭП.

ПЗ 2. Расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов.

ПЗ 3. Составление схем замещения электрической сети. Определение приведенной и расчетной нагрузки узла.

ПЗ 4. Расчет режимов в разомкнутых сетях.

ПЗ 5. Расчет режимов в кольцевых сетях.

ПЗ 6. Расчет режимов в сетях с двухсторонним питанием.

ПЗ 7. Выбор ответвление РПН трансформаторов, автотрансформаторов, линейных регуляторов.

ПЗ 8. Расчет режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями.

ПЗ 9. Обзор задач по всем темам за семестр.

В процессе обучения студенты пользуются информационными и компьютерными технологиями. Широко применяются программные продукты MathCad, Visio, , используется банк данных кафедры, содержащий электронные варианты учебников, справочные данные, а также информацию о современном оборудовании.

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 руководит 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.

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.

4.2. Методические указания по проведению практических занятий

При подготовке к практическим занятиям целесообразно пользоваться материалами, изложенными в учебном пособии Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.Н. Дудченко. «Электрические сети в примерах и расчетах».

В рассматриваемых примерах задач даны ссылки на формулы с номерами, приведенными в данном пособии.

Литература к практическим занятиям.

1. *Неклепаев Б.Н., Крючков И.П.* Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 680с.
2. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов / Под ред. В.М. Блок. – М.: Высш. шк., 1990. – 383с.
3. *Боровиков В.А.* Электрические сети энергетических систем. – Л.: Энергия, 1977. – 392с.
4. *Блок В.М.* Электрические сети и системы. – М.: Высш. шк., 1986. – 430с.
5. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети. – М.: Высш. шк., 1989. – 592с.
6. Инструктивные материалы по компенсации реактивной мощности и качеству электрической энергии. – М.: Минэнерго СССР, 1991. – 31с.

Практическое занятие № 1.

«Расчет параметров схем замещения ЛЭП».

Цель: научиться составлять схемы замещения воздушных и кабельных линий разных классов номинального напряжения и определять их параметры.

Примеры решения типовых задач.

Пример 1.1.

Линия электропередачи 110 кВ выполнена проводом АС-70 /11 и имеет длину 40 км. Провода расположены в горизонтальной плоскости, расстояние между ними 4 м. В линии осуществлена транспозиция проводов. Определить параметры схемы замещения и реактивную мощность, генерируемую линией.

Решение.

Задача может быть решена двумя путями:

- решение с использованием справочных данных;
- аналитическое решение на основе расчетных формул.

Первый метод. Используя таблицы /1/, определяем активное сопротивление 1 км линии $r_0 = 0,428 \text{ Ом / км}$, индуктивное сопротивление $x_0 = 0,444 \text{ Ом / км}$ и емкостную проводимость $b_0 = 2,55 \cdot 10^{-6} \text{ См / км}$.

Активное сопротивление в схеме замещения определяется так:

$$r = r_0 \cdot l = 0,428 \cdot 40 = 17,12 \text{ Ом};$$

индуктивное: $x = x_0 \cdot l = 0,444 \cdot 40 = 17,76 \text{ Ом};$

емкостная проводимость:

$$B = b_0 \cdot l = 2,55 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Т. к. сечение провода 70 мм^2 , т.е. равно минимальному по условию исключения “короны”, то активная проводимость в схеме замещения не учитывается.

Второй метод. Сечение алюминиевой части провода АС-70 / 11 равно 68 мм^2 согласно /4/. Активное сопротивление единицы длины линии:

$$r_0 = \rho / F = 28,9 / 68 = 0,425 \text{ Ом / км}.$$

Активное сопротивление линии: $r = r_0 \cdot l = 0,425 \cdot 40 = 17 \text{ Ом}.$

Для расчета погонного индуктивного сопротивления определим среднегеометрическое расстояние между фазами:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}} = \sqrt[3]{4 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 10^6} = 504 \text{ см}$$

и по справочным данным /1/ найдем радиус провода $R = 5,7 \text{ см}.$

Тогда погонное индуктивное сопротивление:

$$x_0 = 0,1445 \lg \left(\frac{D_{cp}}{R} \right) + 0,0157 \mu = 0,1445 \cdot \lg \left(\frac{504}{0,57} \right) + 0,0157 = 0,44 \text{ Ом / км}.$$

Индуктивное сопротивление линии: $x = x_0 \cdot l = 0,44 \cdot 40 = 17,6 \text{ Ом}.$

Емкостная проводимость: $b_0 = \frac{7,58}{\lg \left(\frac{504}{0,57} \right)} \cdot 10^{-6} = 2,57 \cdot 10^{-6} \text{ См / км}.$

$$\frac{B}{2} = \frac{b_0 l}{2} = \frac{2,57 \cdot 10^{-6} \cdot 40}{2} = 0,51 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Активная проводимость вводится в схему замещения, если есть потери на “корону”. Потери на “корону” имеют место в том случае, когда критическое напряжение “короны” превышает рабочее напряжение линии.

При сухой погоде $m_n = 1$, $\delta = 1$, при плохой погоде $\delta = 0,9$, $m_n = 0,8$. Согласно формуле критическое напряжение “короны” определяется так:

$$U_{кф} = 48,9 m_0 m_n \delta R \lg \left(\frac{D_{cp}}{R} \right) = 48,9 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,57 \cdot \lg \left(\frac{5,04}{0,0057} \right) = 69,8 \text{ кВ}$$

и для среднего провода равно $U'_{кф} = 0,96 U_{кф} = 67 \text{ кВ}.$

Фазное напряжение линии равно $U_\phi = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5 \text{ кВ}.$

Т.к. фазное напряжение линии меньше критического, то на всем протяжении линии “короны” не будет. Можно и по табл. без расчета определить, что для провода марки АС - 70 / 11 учитывать потери на “корону” при напряжении 110 кВ не нужно.

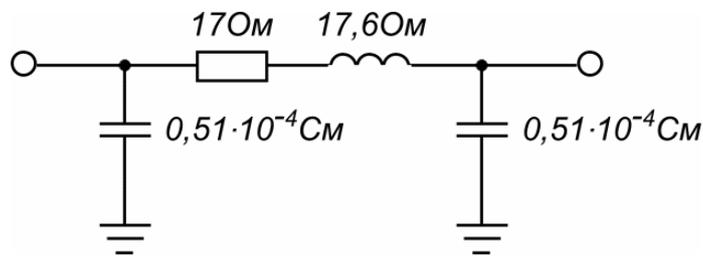


Рис. Схема замещения линии

Пример 1.2.

Электроэнергия при напряжении 6 кВ передается от подстанции завода в цех по кабелю с алюминиевыми жилами сечением $F = 10 \text{ мм}^2$ длиной $l = 6 \text{ км}$. Определить, в каком соотношении находятся индуктивные и активные сопротивления, зарядная и полная мощность линии, если допустимый по нагреву ток кабеля равен $I_{\text{доп}} = 80 \text{ А}$.

Решение

Активное сопротивление кабельной линии по выражению:

$$R = \frac{\rho}{F} l = \frac{28,9}{10} \cdot 6 = 17,2 \text{ Ом.}$$

Погонное индуктивное сопротивление трехжильного кабеля с бумажной изоляцией сечением 10 мм^2 равно $x_0 = 0,11 \text{ Ом /км}$ [1]. Тогда индуктивное сопротивление линии согласно справочным данным:

$$X = x_0 \cdot l = 0,11 \cdot 6 = 0,66 \text{ Ом.}$$

Соотношение индуктивного и активного сопротивлений равно:

$$\frac{X}{R} = \frac{0,66}{17,2} \cdot 100\% = 3,85\%.$$

Зарядная мощность кабельных линий при погонной емкостной проводимости, равной согласно [1] $g_0 = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ См /км}$, составляет:

$$Q_c = U^2 \cdot g_0 \cdot l = 6^2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} \cdot 6 = 13 \text{ квар.}$$

Предельная мощность, которая может быть передана по этой линии, равна:

$$S_{\text{пред}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{доп}} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 80 = 831 \text{ кВА.}$$

Соотношение зарядной и полной мощности равно:

$$\frac{Q_c}{S_{\text{пред}}} = \frac{13}{831} \cdot 100\% = 1,56\%.$$

Поскольку точность инженерных расчетов лежит в пределах 5 %, то, как видно из расчетов, индуктивное сопротивление и емкостную проводимость в кабельных линиях напряжением 6 - 10 кВ можно не учитывать.

Практическое занятие № 2.

«Расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов».

Цель: научиться составлять схемы замещения силовых двухобмоточных, трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов, а также определять их параметры.

Примеры решения типовых задач.

Пример 2.1.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТМН– 2500 /110.

Решение.

По каталожным данным, например /2/, определяем характеристики трансформатора:
 $U_{вн} = 110 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5 \%$; $\Delta P_k = 22 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 5 \text{ кВт}$; $I_x = 1,5 \%$; $\Delta Q_x = 37,5 \text{ квар}$.

Трансформатор типа ТМН - трехфазный двухобмоточный, с номинальным напряжением обмотки высокого напряжения меньше 220 кВ, – следовательно, схема замещения такого трансформатора Г-образная с постоянным отбором мощности.

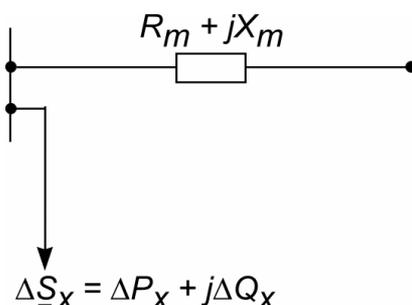


Рис. Г-образная схема замещения трансформатора

Активное сопротивление трансформатора определяется по выражению:

$$R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_{вн}^2}{S_{мном}^2} = \frac{22 \cdot 110^2 \cdot 10^3}{2500^2} = 42,6 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление находится по формуле:

$$X_m = \frac{u_{к,\%} \cdot U_{вн}^2}{100 \cdot S_{мном}} = \frac{10,5 \cdot 110^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 2500 \cdot 10^3} = 508 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость определяется по данным опыта холостого хода согласно выражению:

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} = \frac{5}{110^2 \cdot 10^3} = 4,13 \cdot 10^{-7} \text{ См,}$$

а индуктивная проводимость - согласно выражению:

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{вн}^2} = \frac{37,5}{110^2 \cdot 10^3} = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Индуктивная проводимость может быть определена и через ток холостого хода трансформатора:

$$B_m = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{мном}}{100 U_{вн}^2} = \frac{1,5 \cdot 2500}{100 \cdot 110^2 \cdot 10^3} = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Потери в стали или потери холостого хода равны: $\Delta \underline{S}_x = 5 + j37,5 \text{ кВА}$.

Пример 2.2.

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора типа ТДЦТН-63000/220, отнесенные к высокому напряжению.

Решение.

Из каталожных данных, например /3/, записываем технические характеристики трансформатора: $U_{вн} = 230 \text{ кВ}$; $S_{т ном} = 63000 \text{ кВА}$; $u_{к, в-с} = 12,5 \%$; $u_{к, в-н} = 24 \%$; $u_{к, с-н} = 10,5 \%$; $\Delta P_k = 320 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 91 \text{ кВт}$; $I_x = 1 \%$. Отношение между мощностями обмоток 100/100/100 %.

Т.к. потери мощности КЗ заданы одной величиной для всего трансформатора, определим общее активное сопротивление трансформатора:

$$R_{общ} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}^2} = \frac{320 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{63000^2} = 4,26 \text{ Ом.}$$

Тогда активное сопротивление любой обмотки равно

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = 0,5 \cdot R_{общ} = 2,13 \text{ Ом.}$$

Напряжения короткого замыкания для лучей трехфазной схемы замещения равны

$$u_{к1} = 0,5(u_{к в-с} + u_{к в-н} - u_{к с-н}) = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(u_{к в-с} + u_{к с-н} - u_{к в-н}) = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(u_{к в-н} + u_{к с-н} - u_{к в-с}) = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%.$$

Определим индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды:

$$X_{m1} = \frac{u_{к1} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{13 \cdot 230^2 \cdot 10}{63000} = 120,84 \text{ Ом,}$$

$$X_{m2} = \frac{u_{к2} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{0 \cdot 230^2 \cdot 10}{63000} = 0 \text{ Ом,}$$

$$X_{m3} = \frac{u_{к3} \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{11 \cdot 230^2 \cdot 10}{63000} = 102,25 \text{ Ом.}$$

Из расчета видно, что в трансформаторах активное сопротивление мало по сравнению с индуктивным и им можно пренебречь.

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} = \frac{91}{230^2 \cdot 10^3} = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Реактивная проводимость

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{вн}^2} = \frac{I_x \cdot S_{т ном}}{U_{вн}^2} = \frac{1,1 \cdot 63000}{100 \cdot 230^2 \cdot 10^3} = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ См.}$$

Схема замещения трансформатора представлена на рис.

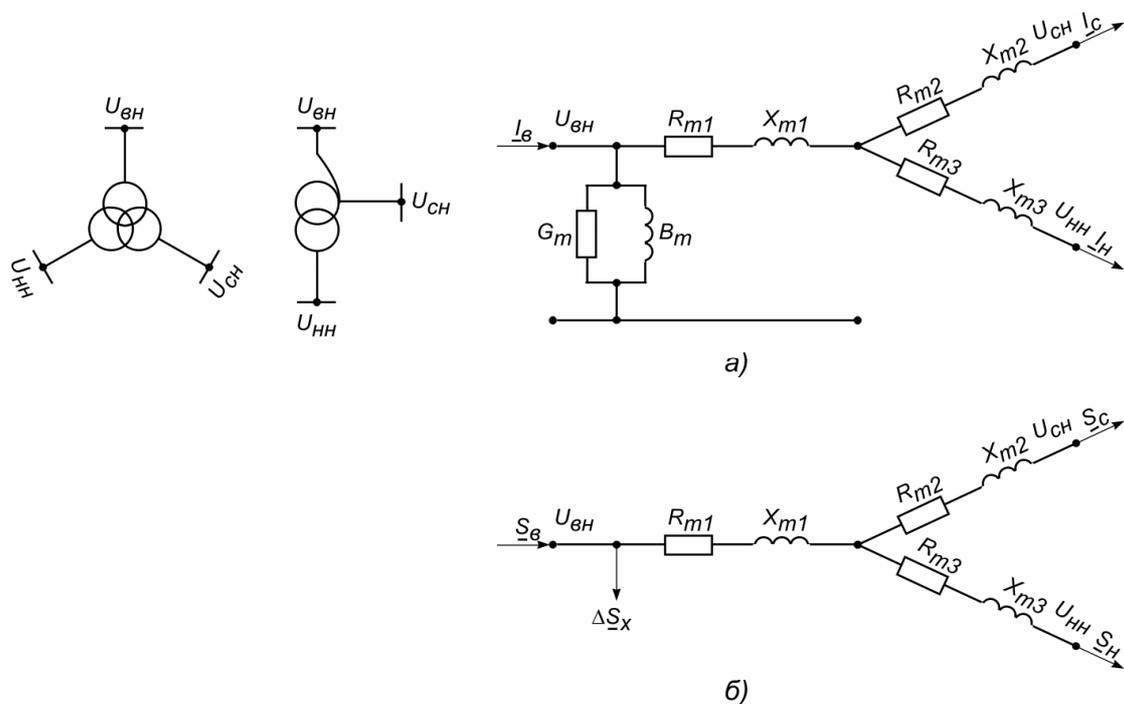


Рис. Схема замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

Пример 2.3.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТРДЦН-63000/330 с расщепленной обмоткой низкого напряжения, приведенные к стороне ВН (обмотка ВН расположена между обмотками НН). Обмотки НН включены параллельно.

Решение.

Из /2/ определим каталожные данные трансформатора:

$S_{ном} = 63000 \text{ кВА}$; $U_{1 ном} = 330 \text{ кВ}$; $U_{2 ном} = 10,5/10,5 \text{ кВ}$; $\Delta P_k = 265 \text{ кВт}$; $u_k = 11 \%$; $\Delta P_x = 120 \text{ кВт}$; $I_x = 0,7 \%$.

Схема замещения этого трансформатора соответствует рис.

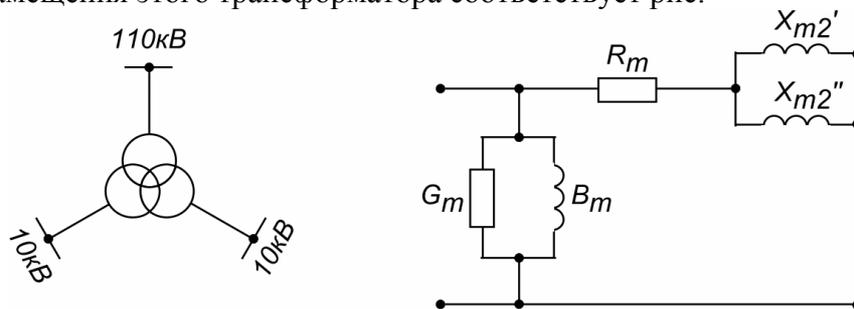


Рис. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Определим активное сопротивление обмоток

$$R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_{1 ном}^2}{S_{т ном}^2} = \frac{265 \cdot 10^3 \cdot 330^2}{63000^2} = 7,35 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора находим по u_k , т.к. это трансформатор большой мощности

$$X_m = \frac{u_{к, \%} \cdot U_{1 \text{ ном}}^2}{100 \cdot S_{т \text{ ном}}} = \frac{11 \cdot 330^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 63000} = 190 \text{ Ом.}$$

Для трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$X_2' = X_2'' = 2 \cdot X_m = 380 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{1 \text{ ном}}^2} = \frac{120}{330^2 \cdot 10^3} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Индуктивная проводимость трансформатора

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{1 \text{ ном}}^2} = \frac{I_{x, \%} \cdot S_{т \text{ ном}}}{100 \cdot U_{1 \text{ ном}}^2} = \frac{0,7 \cdot 63000}{100 \cdot 330^2 \cdot 10^3} = 4,07 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Полные потери мощности в стали трансформатора

$$\Delta S_x = \Delta P_x + j \Delta Q_x = \Delta P_x + j \frac{I_{x, \%} \cdot S_{т \text{ ном}}}{100} = 120 + j 441 \text{ кВА.}$$

Пример 2.4.

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного автотрансформатора типа АТДЦТН-200000/220/110. Составить схему замещения и определить ее параметры при условии установки на подстанции двух автотрансформаторов.

Решение.

Каталожные данные автотрансформатора: $S_{т \text{ ном}} = 200000 \text{ кВА}$; $U_{1 \text{ ном}} = 230 \text{ кВ}$; $U_{2 \text{ ном}} = 121 \text{ кВ}$; $U_{3 \text{ ном}} = 11 \text{ кВ}$; $u_{к, в-с} = 11 \%$; $u_{к, в-н} = 32 \%$; $u_{к, с-н} = 20 \%$; $\Delta P_{к, в-с} = 430 \text{ кВт}$; $\Delta P'_{к, в-н} = 360 \text{ кВт}$; $\Delta P'_{к, с-н} = 320 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 125 \text{ кВт}$; $I_x = 0,5 \%$. Соотношение мощностей обмоток 100/100/50 % /4/.

Приведем каталожные данные, отнесенные к мощности обмотки низкого напряжения $\Delta P'_{к, в-н}$, $\Delta P'_{к, с-н}$, к номинальной мощности автотрансформатора:

$$\Delta P_{к, в-н} = \frac{\Delta P'_{к, в-н}}{\alpha^2} = \frac{360}{0,5^2} = 1440 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{к, с-н} = \frac{\Delta P'_{к, с-н}}{\alpha^2} = \frac{320}{0,5^2} = 1280 \text{ кВт,}$$

$$\text{где } \alpha = \frac{S_{\text{тип}, \%}}{S_{\text{АТ ном}, \%}} = \frac{50}{100} = 0,5.$$

Определим по выражениям напряжения и потери активной мощности короткого замыкания, соответствующие лучам схемы замещения данного автотрансформатора

$$u_{к1} = 0,5(11 + 32 - 20) = 11,5\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(11 + 20 - 32) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(32 + 20 - 11) = 20,5\%,$$

$$\Delta P_{к1} = 0,5(430 + 1440 - 1280) = 295 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{к2} = 0,5(430 + 1280 - 1440) = 135 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{к3} = 0,5(1440 + 1280 - 430) = 1145 \text{ кВт.}$$

По значениям u_k и ΔP_k определим активные и индуктивные сопротивления автотрансформатора по выражениям.

$$R_{AT1} = \frac{\Delta P_{к1} \cdot U_{вн}^2}{S_{AT ном}^2} = \frac{295 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{200000^2} = 0,39 \text{ Ом},$$

$$R_{AT2} = \frac{\Delta P_{к2} \cdot U_{вн}^2}{S_{AT ном}^2} = \frac{135 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{200000^2} = 0,179 \text{ Ом},$$

$$R_{AT3} = \frac{\Delta P_{к3} \cdot U_{вн}^2}{S_{AT ном}^2} = \frac{1145 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{200000^2} = 1,51 \text{ Ом},$$

$$X_{AT1} = \frac{u_{к1} \cdot U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = \frac{11,5 \cdot 230^2 \cdot 10}{200000} = 30,41 \text{ Ом},$$

$$X_{AT2} = \frac{u_{к2} \cdot U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{AT3} = \frac{u_{к3} \cdot U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = \frac{20,5 \cdot 230^2 \cdot 10}{200000} = 54,2 \text{ Ом}.$$

Потери реактивной мощности одного автотрансформатора составляют

$$\Delta Q_x = \frac{I_{x, \%} \cdot S_{AT ном}}{100\%} = \frac{0,5 \cdot 200000}{100} = 1000 \text{ квар}.$$

Суммарные потери холостого хода равны

$$\Delta \underline{S}_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x = 125 + j1000 \text{ кВА}.$$

Активная и индуктивная проводимости определяются по выражениям:

$$G_{AT} = \frac{\Delta P_x}{U_{1 ном}^2} = \frac{125}{230^2 \cdot 10^3} = 2,36 \cdot 10^{-6} \text{ См},$$

$$B_{AT} = \frac{\Delta Q_x}{U_{1 ном}^2} = \frac{1000}{230^2 \cdot 10^3} = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

При условии установки на подстанции двух автотрансформаторов схема включения и схема замещения приведены на рис.

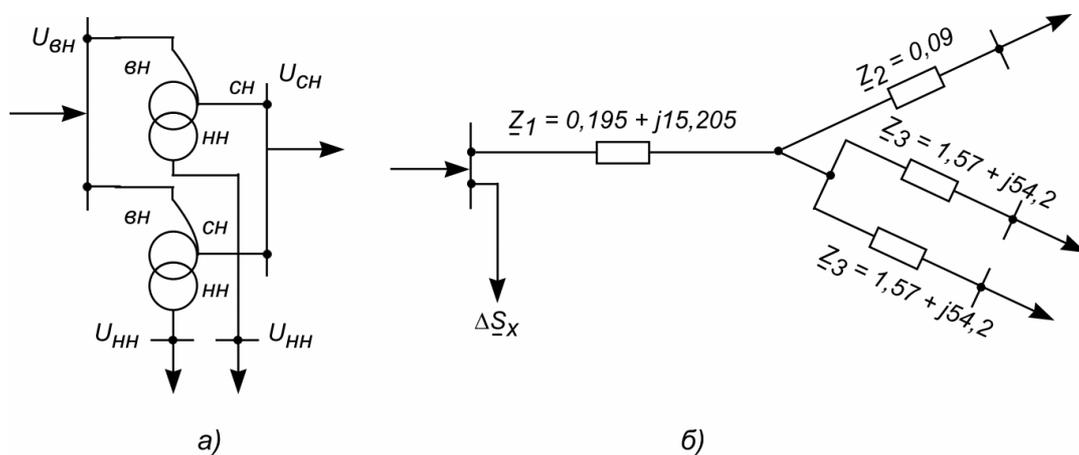


Рис. Схемы автотрансформаторов:
 а) схема включения двух трансформаторов,
 б) схема замещения.

Учитывая параллельное включение обмоток ВН и СН, определим их эквивалентные сопротивления

$$Z_1 = \frac{Z_{AT1}}{2} = \frac{(0,39 + j30,41)}{2} = 0,195 + j15,205 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = \frac{Z_{AT2}}{2} = \frac{0,179 + j0}{2} = 0,09 \text{ Ом}.$$

Т.к. обмотки НН автотрансформаторов работают каждая на свою нагрузку, то $Z_3 = Z_{AT3} = 1,51 + j54,2 \text{ Ом}$.

Суммарные потери холостого хода обоих автотрансформаторов равны

$$\Delta S_x = 2(\Delta P_x + j\Delta Q_x) = 2(125 + j1000) = 250 + j2000 \text{ кВА}.$$

Пример 2.5.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТДЦ-80000/220, приведенные к уровню высокого и низкого напряжения.

Решение.

Трансформатор типа ТДЦ-80000/220 двухобмоточный. Его характеристики определяются из /5/ и равны: $U_{вн} = 242 \text{ кВ}$; $U_{нн} = 10,5 \text{ кВ}$; $u_k = 11\%$; $\Delta P_k = 320 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 105 \text{ кВт}$; $I_x = 0,6 \%$.

Активное сопротивление обмоток:

приведенное к высокой стороне $R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}^2} = \frac{320 \cdot 242^2 \cdot 10^3}{80000^2} = 2,93 \text{ Ом},$

приведенное к низкой стороне $R_m' = \frac{\Delta P_k \cdot U_{нн}^2}{S_{т ном}^2} = \frac{320 \cdot 10,5^2 \cdot 10^3}{80000^2} = 0,0055 \text{ Ом}.$

Индуктивное сопротивление обмоток:

приведенное к высокой стороне $X_m = \frac{u_k \cdot U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{11 \cdot 242^2 \cdot 10}{80000} = 80,5 \text{ Ом},$

приведенное к низкой стороне $X_m' = \frac{u_k \cdot U_{нн}^2}{S_{т ном}} = \frac{11 \cdot 10,5^2 \cdot 10}{80000} = 0,15 \text{ Ом}.$

Поперечные проводимости, приведенные к высокой стороне

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} = \frac{105}{242^2 \cdot 10^3} = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ См},$$

$$B_m = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{т ном}}{U_{вн}^2} = \frac{0,6 \cdot 80000}{242^2 \cdot 10^3} = 8,19 \cdot 10^{-5} \text{ См},$$

приведенные к низкой стороне

$$G_m' = \frac{\Delta P_x}{U_{нн}^2} = \frac{105}{10,5^2 \cdot 10^3} = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ См},$$

$$B_m' = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{т ном}}{U_{нн}^2} = \frac{0,6 \cdot 80000}{10,5^2 \cdot 10^3} = 4,35 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Пример 2.6.

Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 417000/750/500 при номинальных параметрах одной фазы: $S_{\text{ном ф}} = 417 \text{ МВА}$; $U_{\text{вн}} = 750 / \sqrt{3} \text{ кВ}$; $U_{\text{сн}} = 500 / \sqrt{3} \text{ кВ}$; $U_{\text{нн}} = 10,65 \text{ кВ}$. Номинальные мощности обмоток относятся как 100/100/25 %. Напряжения КЗ равны: $u_{\text{к, в-с}} = 9,65 \%$; $u_{\text{к, в-н}} = 63 \%$; $u_{\text{к, с-н}} = 51 \%$. $\Delta P_{\text{к, в-с}} = 920 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 330 \text{ кВт}$; $I_x = 0,5 \%$.

Решение.

Т.к. рассматривается группа из однофазных автотрансформаторов, активные и индуктивные сопротивления обмоток ВН, СН и НН определим при рассмотрении только одной фазной группы; аналогично поступим и с поперечными проводимостями. В этом случае в выражениях для сопротивлений и проводимостей автотрансформаторов используется фазные, а не линейные напряжения.

Определим напряжения короткого замыкания каждой обмотки по выражениям:

$$\begin{aligned} u_{\text{к1}} &= 0,5(u_{\text{к в-с}} + u_{\text{к в-н}} - u_{\text{к с-н}}) = 0,5(9,65 + 63 - 51) = 10,83\%, \\ u_{\text{к2}} &= 0,5(u_{\text{к в-с}} + u_{\text{к с-н}} - u_{\text{к в-н}}) = 0,5(9,65 + 51 - 63) = 0\%, \\ u_{\text{к3}} &= 0,5(u_{\text{к в-н}} + u_{\text{к с-н}} - u_{\text{к в-с}}) = 0,5(63 + 51 - 9,65) = 52,175\%. \end{aligned}$$

Индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{u_{\text{к1}} \left(\frac{U_{\text{в ном}}}{\sqrt{3}} \right)^2}{S_{\text{ф ном}}} = \frac{10,83 \left(\frac{750}{\sqrt{3}} \right)^2}{417000} 10 = 48,7 \text{ Ом}, \\ X_2 &= 0; \quad X_3 = \frac{u_{\text{к3}} \left(\frac{U_{\text{в ном}}}{\sqrt{3}} \right)^2}{S_{\text{ф ном}}} = \frac{52,175 \left(\frac{750}{\sqrt{3}} \right)^2}{417000} 10 = 234,61 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Общее активное сопротивление трехфазной группы однофазных автотрансформаторов равно:

$$R_{\text{общ}} = \frac{\Delta P_{\text{к, в-с}} \left(\frac{U_{\text{в ном}}}{\sqrt{3}} \right)^2}{S_{\text{ф ном}}^2} = \frac{920 \left(\frac{750}{\sqrt{3}} \right)^2}{417^2} 10^{-3} = 0,99 \text{ Ом}.$$

Поскольку номинальные мощности обмоток ВН и СН одинаковы, то

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{\text{общ}}}{2} = 0,495 \text{ Ом}.$$

Номинальная мощность обмотки НН составляет 25% от номинальной мощности обмотки ВН, поэтому из выражения следует: $R_3 = 4R_1 = 0,99 \cdot 4 = 3,96 \text{ Ом}$.

Поперечная проводимость для одной фазы равна:

$$\text{активная} \quad - G = \frac{\Delta P_x}{\left(\frac{U_{\text{в ном}}}{\sqrt{3}} \right)^2} = \frac{330}{\left(\frac{750}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 10^3} = 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ См},$$

$$\text{реактивная - } B = \frac{I_x \cdot S_{\phi \text{ ном}}}{\left(\frac{U_{\phi \text{ ном}}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{0,5 \cdot 412000}{\left(\frac{750}{\sqrt{3}}\right)^2} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Практическое занятие № 3.

«Составление схем замещения электрической сети. Определение приведенной и расчетной нагрузки узла».

Цель: научиться составлять схемы замещения электрических сетей различной конфигурации и определять в узлах сети приведенную и расчетную нагрузку.

Примеры решения типовых задач.

Пример 3.1.

Для участка сети, схема замещения которого приведена на рис., составить расчетную схему замещения и определить приведенную и расчетную мощности нагрузки в узле 2. Линия W1 протяженностью 70 км выполнена проводом марки АСК-95, вторая, W2 - АСК-120, имеет протяженность 50 км. Номинальное напряжение сети - 110 кВ. На подстанции, подключенной к узлу 2, установлен трансформатор типа ТРДН-40000 /110. Мощность нагрузки составляет $24 + j18$ МВА.

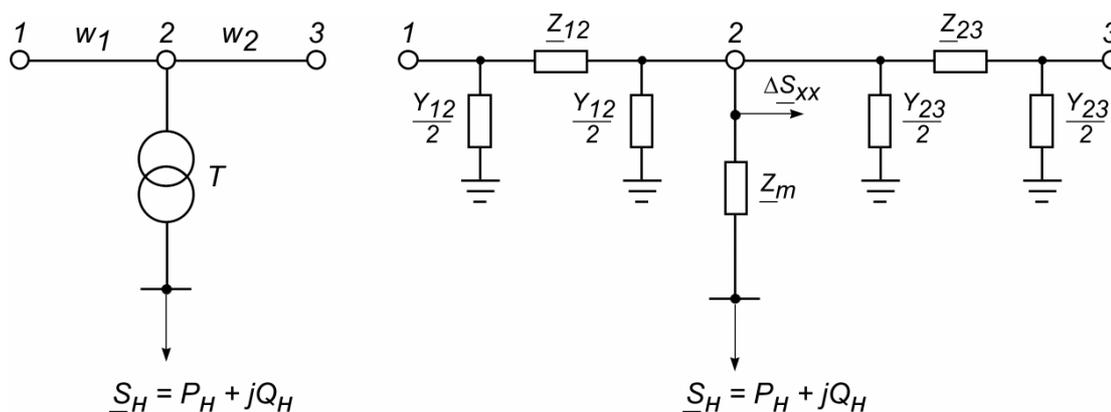


Рис. Схема замещения участка сети с двухобмоточным трансформатором

Решение.

По табл. /12, 1/ определяем погонные параметры линий.

Провод АСК-95: $r_{01} = 0,314 \text{ Ом/км}$; $x_{01} = 0,429 \text{ Ом/км}$;
 $b_{01} = 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$; $q_1 = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ Мвар/км}$.

Провод АСК-120: $r_{02} = 0,249 \text{ Ом/км}$; $x_{02} = 0,423 \text{ Ом/км}$;
 $b_{02} = 2,69 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$; $q_2 = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ Мвар/км}$.

Трансформатор типа ТРДН - 40000 /110 согласно /4/ имеет следующие технические данные:

$U_{\text{ном}} = 115 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5 \%$; $\Delta P_k = 175 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 42 \text{ кВт}$; $I_x = 0,7 \%$.

Определим параметры схемы замещения воздушных линий:

$$R_1 = r_{01} \cdot l_1 = 0,314 \cdot 70 = 22 \text{ Ом,}$$

$$X_1 = x_{01} \cdot l_1 = 0,429 \cdot 70 = 30 \text{ Ом},$$

$$R_2 = r_{02} \cdot l_2 = 0,249 \cdot 50 = 12,45 \text{ Ом},$$

$$X_2 = x_{02} \cdot l_2 = 0,423 \cdot 50 = 21,15 \text{ Ом}.$$

Зарядные мощности половины длины каждой линии:

$$Q_{c12}^H = Q_{c12}^K = \frac{q_{01} \cdot l_1}{2} = \frac{3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 70}{2} = 1125 \text{ квар},$$

$$Q_{c23}^H = Q_{c23}^K = \frac{q_{02} \cdot l_2}{2} = \frac{3,6 \cdot 10^{-2} \cdot 50}{2} = 900 \text{ квар}.$$

Трансформатор типа ТРДН - 40000 / 110 - двухобмоточный с расщепленной обмоткой, однако он работает как двухобмоточный, т.к. расщепленные обмотки соединены параллельно.

Потери активной мощности в трансформаторе

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_K \cdot S_H^2}{S_{\text{ном}}^2} + \Delta P_x = \frac{175(24^2 + 18^2)}{40^2} + 42 = 140,4 \text{ кВт}.$$

Потери реактивной мощности в трансформаторе:

$$\Delta Q_m = \frac{u_{\text{к, \%}} \cdot S_{\text{ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} + \frac{I_{\text{х, \%}} \cdot S_{\text{ном}}}{100} = \frac{10,5(24^2 + 18^2) \cdot 10^3}{100 \cdot 40} + \frac{0,7 \cdot 40 \cdot 10^3}{100} = 2642 \text{ квар}.$$

Т.о., приведенная нагрузка подстанции к высокой стороне будет равна: $\underline{S}_{np} = P_H + \Delta P_m + j(Q_H + \Delta Q_m) = 24000 + 140,4 + j(18000 + 2642) = 24140,4 + j20642 \text{ кВА}.$

Расчетная нагрузка узла включает в себя, кроме приведенной, половины зарядных мощностей примыкающих к узлу линий:

$$\underline{S}_p = \underline{S}_{np} - j(Q_{c12}^K + Q_{c23}^H) = 24140,4 + j20642 - j(1125 + 900) = 24140,4 + j18517 \text{ кВА}.$$

Схема замещения участка сети показана на рис.

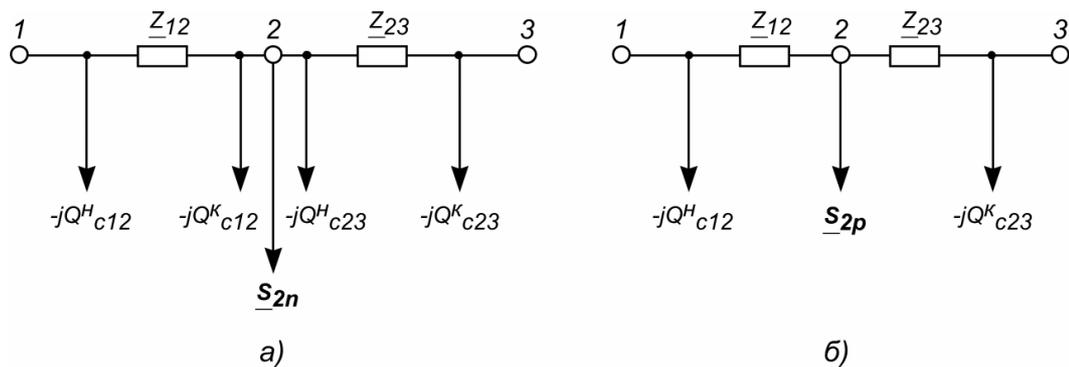


Рис. Упрощенные схемы замещения:

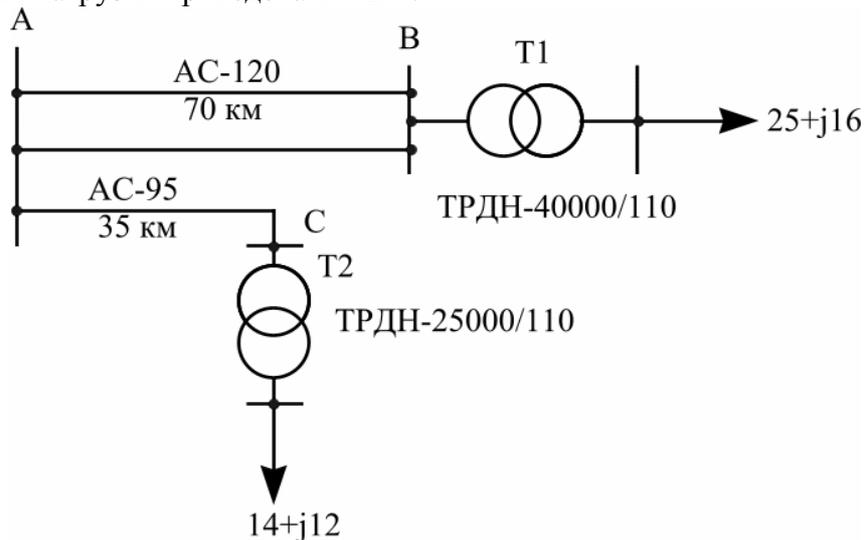
а – при использовании приведенной нагрузки узла, \underline{S}_{2n}

б – при использовании расчетной нагрузки узла, \underline{S}_{2p} .

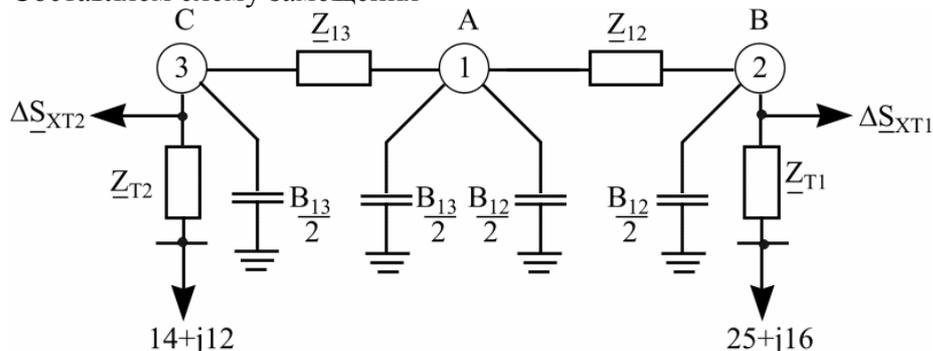
*Листинг
примеров решения задач по разделу
в программе MathCad фирмы MathSoft*

Пример 3.2.

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции В и С с источником питания А. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и определить расчетную нагрузку в узлах. Мощность нагрузки приведена в МВА.



Составляем схему замещения



Определяем параметры схемы замещения.

По справочным данным находим погонные активные сопротивления линий, а индуктивные сопротивления и емкостные проводимости рассчитываем аналитически по выражениям (6), (22)

$$Z_{12} := \left[0.27 \cdot 70 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{7.65} \right) + 0.0157 \right) \cdot 70 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$Z_{12} = 9.45 + 14.788i \quad \text{Ом}$$

$$Z_{23} := 0.33 \cdot 35 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot 35 \right]$$

$$Z_{23} = 11.55 + 14.999i \quad \text{Ом}$$

$$b_{012} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{7.65} \right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2$$

$$b_{012} = 5.385 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{013} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{6.95}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{013} = 2.653 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

Находим потери мощности в силовых трансформаторах по выражениям (72), (74), определив по справочным данным /4/ сопротивления трансформаторов $R_{T1}=1,44 \text{ Ом}$, $X_{T1}=34,8 \text{ Ом}$, $R_{T2}=2,54 \text{ Ом}$, $X_{T2}=55,90 \text{ Ом}$, а также потери мощности холостого хода: $\Delta P_{xT1}=42 \text{ кВт}$, $\Delta P_{xT2}=29 \text{ кВт}$, $\Delta Q_{xT1}=280 \text{ квар}$, $\Delta Q_{xT2}=200 \text{ квар}$.

$$\Delta P_{t1} := \frac{25^2 + 16^2}{110^2} \cdot 1.44 + 0.042$$

$$\Delta P_{t1} = 0.147 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{t1} := \frac{25^2 + 16^2}{110^2} \cdot 34.8 + 0.280$$

$$\Delta Q_{t1} = 2.814 \quad \text{Мвар}$$

$$\Delta P_{t2} := \frac{14^2 + 12^2}{110^2} \cdot 2.54 + 0.029$$

$$\Delta P_{t2} = 0.1 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{t2} := \frac{14^2 + 12^2}{110^2} \cdot 55.9 + 0.200$$

$$\Delta Q_{t2} = 1.771 \quad \text{Мвар}$$

Находим приведенную нагрузку узлов 2 и 3

$$S_{pr2} := 25 + \Delta P_{t1} + j \cdot (16 + \Delta Q_{t1})$$

$$S_{pr2} = 25.147 + 18.814i \quad \text{МВА}$$

$$S_{pr3} := 14 + \Delta P_{t2} + j \cdot (12 + \Delta Q_{t2})$$

$$S_{pr3} = 14.1 + 13.771i \quad \text{МВА}$$

Находим значения зарядных мощностей

$$Q_{c12} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{012} \cdot 70$$

$$Q_{c12} = 2.28 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c13} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{012} \cdot 35$$

$$Q_{c13} = 1.14 \quad \text{Мвар}$$

Находим расчетную нагрузку узлов 2 и 3

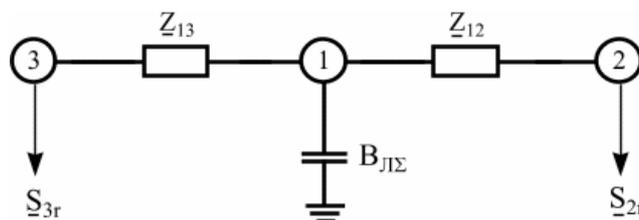
$$S_{r2} := S_{pr2} - j \cdot Q_{c12}$$

$$S_{r2} = 25.147 + 16.533i \quad \text{МВА}$$

$$S_{r3} := S_{pr3} - j \cdot Q_{c13}$$

$$S_{r3} = 14.1 + 12.631i \quad \text{МВА}$$

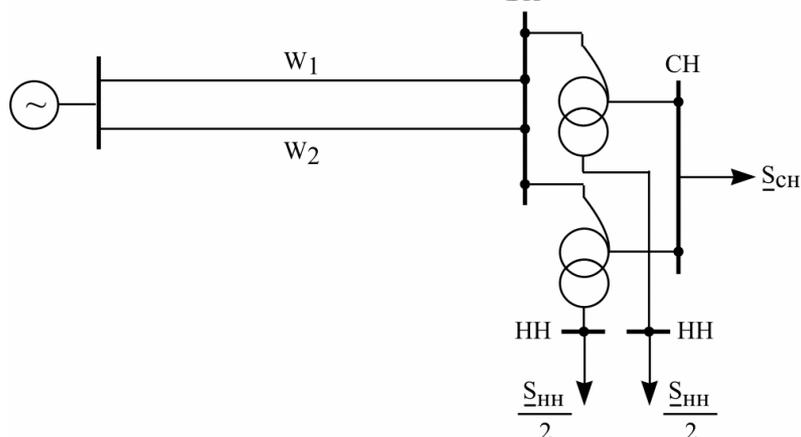
Окончательная схема замещения сети имеет вид:



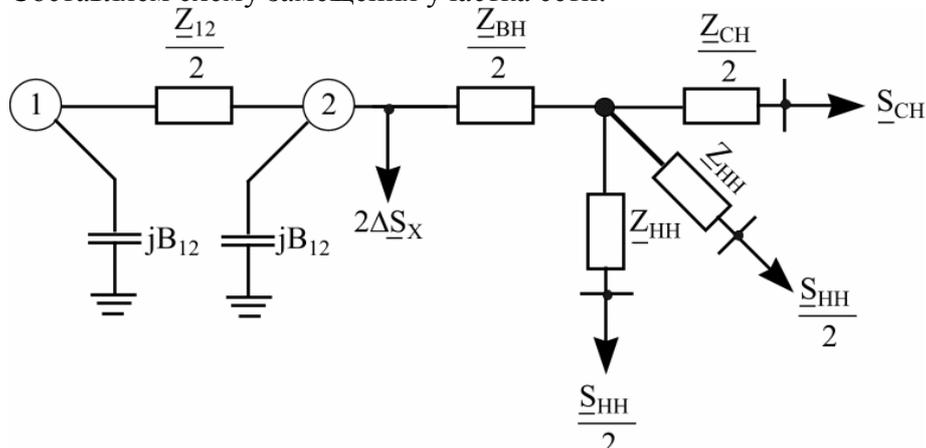
Пример 3.3.

От электростанции по линиям W1 и W2 получает питание районная подстанция, на которой установлены два автотрансформатора типа АТДЦН-125000/220/110, работающих на общую нагрузку по стороне среднего напряжения. Линии W1 и W2 выполнены проводом АС-300/39 длиной 150 км, нагрузка средней стороны составляет 100+j40 МВА, низкой стороны - 50+j15 МВА. Определить расчетную нагрузку узла и составить схему замещения участка сети.

Однолинейная схема участка сети будет иметь вид



Составляем схему замещения участка сети.



Определяем по справочным данным /5/ погонные активное и индуктивное сопротивления ($r_0=0,098$ Ом/км, $x_0=0,429$ Ом/км), емкостную проводимость линий ($b_{0W} := 2.64 \cdot 10^{-6}$ См). Тогда полное сопротивление линий

$$z_w := (0.098 \cdot 150 + j \cdot 0.429 \cdot 150) \cdot \frac{1}{2} \quad z_w = 7.35 + 32.175i \text{ Ом.}$$

Каталожные данные автотрансформатора находим по /5/:

$$\begin{aligned} U_{vn} &:= 230 \text{ кВ}; & U_{cn} &:= 121 \text{ кВ}; & U_{nn} &:= 11 \text{ кВ}; \\ U_{kvncn\%} &:= 11 \%; & U_{kvnnn\%} &:= 31 \%; & U_{kcnnn\%} &:= 19 \%; \\ \Delta P_k &:= 0.29 \text{ МВт}; & I_{x\%} &:= 0.5 \%; & \Delta Q_x &:= 0.625 \text{ Мвар}; & \Delta P_x &:= 0.085 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Сопротивления автотрансформатора согласно /2/ равны

$$\begin{aligned} R_{tvn} &:= 0.5 \text{ Ом}; & R_{tcn} &:= 0.5 \text{ Ом}; & R_{tnn} &:= 1 \text{ Ом}; \\ X_{tvn} &:= 48.6 \text{ Ом}; & X_{tcn} &:= 0 \text{ Ом}; & X_{tnn} &:= 82.5 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Рассчитываем потери мощности в обмотке среднего напряжения

$$\Delta S_{ts} := \frac{100^2 + 40^2}{220^2} \cdot \left(\frac{R_{tcn} + j \cdot X_{tcn}}{2} \right) \quad \Delta S_{ts} = 0.06 \quad \text{МВА.}$$

Определяем потери мощности в обмотке низкого напряжения при условии, что каждая обмотка питает половину нагрузки

$$\Delta S_{tn} := \frac{25^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot (R_{tnn} + j \cdot X_{tnn}) \quad \Delta S_{tn} = 0.014 + 1.161i \quad \text{МВА.}$$

Тогда мощность обмотки высокого напряжения равна

$$S_{vn} := 2 \cdot (25 + j \cdot 7.5 + \Delta S_{tn}) + 100 + j \cdot 40 + \Delta S_{ts} \quad S_{vn} = 150.088 + 57.322i \quad \text{МВА.}$$

Определяем суммарные потери мощности в автотрансформаторе

$$\Delta P_t := 2 \cdot \frac{25^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot R_{tnn} + \frac{100^2 + 40^2}{220^2} \cdot \left(\frac{R_{tcn}}{2} \right) + \frac{\text{Re}(S_{vn})^2 + \text{Im}(S_{vn})^2}{220^2} \cdot \frac{R_{tvn}}{2} + 2 \cdot \Delta P_x \quad \Delta P_t = 0.391 \quad \text{МВт,}$$

$$\Delta Q_t := 2 \cdot \frac{25^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot X_{tnn} + \frac{100^2 + 40^2}{220^2} \cdot \left(\frac{X_{tcn}}{2} \right) + \frac{\text{Re}(S_{vn})^2 + \text{Im}(S_{vn})^2}{220^2} \cdot \frac{X_{tvn}}{2} + 2 \cdot \Delta Q_x \quad \Delta Q_t = 15.452 \quad \text{Мвар.}$$

Приведенная нагрузка автотрансформатора

$$S_{pr} := 100 + j \cdot 40 + 50 + j \cdot 15 + \Delta P_t + \Delta Q_t \quad S_{pr} = 165.843 + 55i \quad \text{МВА.}$$

Зарядная мощность линии равна

$$Q_{cw} := 220^2 \cdot b_{0w} \cdot 150 \quad Q_{cw} = 19.166 \quad \text{Мвар.}$$

Расчетная нагрузка автотрансформатора

$$S_r := S_{pr} - j \cdot Q_{cw} \quad S_r = 165.843 + 35.834i \quad \text{МВА.}$$

Практическое занятие № 4.

«Расчет режимов в разомкнутых сетях».

Цель: освоить методы расчета режимов в разомкнутых сетях по данным «начала» и по данным «конца».

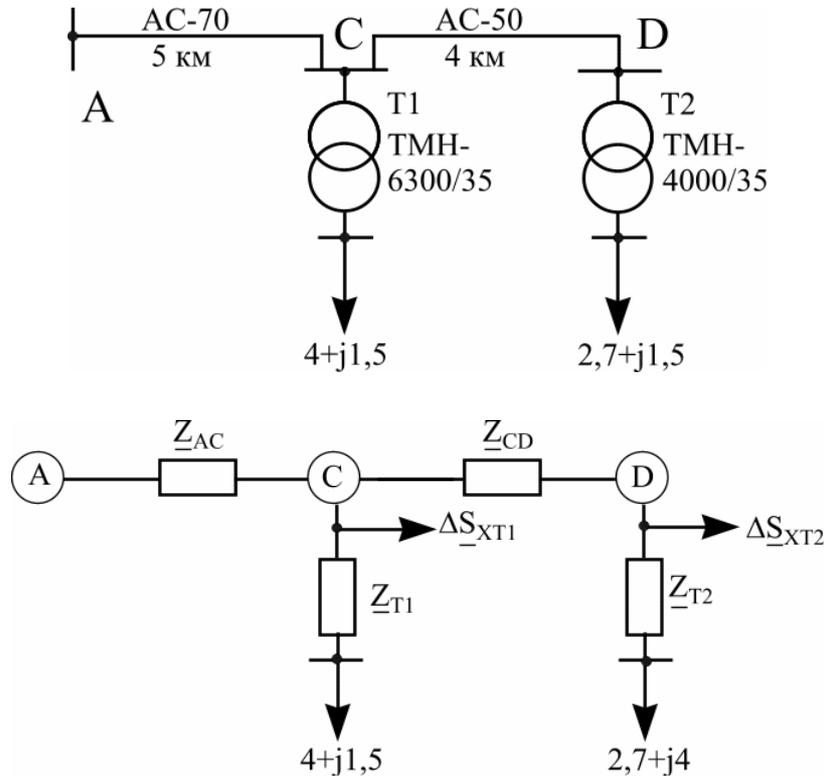
Примеры решения типовых задач.

Листинг примеров решения задач в программе MathCad фирмы MathSoft

Примечание: в листингах примеров, рассчитанных в программе MathCad, точки после формул не ставятся, поскольку это некорректно для программной среды. В ряде примеров, с использованием данной программы, символы \square , z , S , U , следует воспринимать как обозначения, соответствующие \square , \underline{Z} , \underline{S} , \underline{U} , которые приведены в теоретической части учебного пособия.

Пример 4.1.

Рассчитать установившийся режим разомкнутой сети: а) при заданном напряжении в конце сети 34,2 кВ; б) при заданном значении напряжения источника питания 37 кВ. Нагрузка дана в МВА.



Составляем схему замещения

Определяем параметры схемы замещения, т.е. находим значения сопротивлений линий:

$$z_{ac} := 0.45 \cdot 5 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{3500}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot 5 \right] \quad z_{ac} = 2.25 + 2.085i \quad \text{Ом}$$

$$z_{cd} := 0.63 \cdot 4 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{3500}{4.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot 4 \right] \quad z_{cd} = 2.52 + 1.71i \quad \text{Ом}$$

а) Расчет ведем по данным конца

Определяем потери мощности в трансформаторах T1 и T2 по выражениям (72) и (74), приведенную нагрузку узлов по выражению (71). Потери мощности в трансформаторе T1 обозначим $\delta P_c + j\delta Q_c$, в трансформаторе T2 - $\delta P_d + j\delta Q_d$. По [1] определяем параметры трансформаторов. Для трансформатора T1: $\Delta P_x = 0.008 \text{ МВт}$, $\Delta P_k = 0.0465 \text{ МВт}$, $U_{k\%} = 7.5 \%$, $I_{x\%} = 0.8 \%$. Для трансформатора T2: $\Delta P_x = 0.0056 \text{ МВт}$, $\Delta P_k = 0.0335 \text{ МВт}$, $U_{k\%} = 7.5 \%$, $I_{x\%} = 0.9 \%$.

Остальные необходимые параметры находим по формулам.

$$R_{tc} := \frac{0.0465 \cdot 35^2}{6.3^2} \quad R_{tc} = 1.435 \quad \text{Ом}$$

$$X_{tc} := \frac{7.5 \cdot 35^2}{100 \cdot 6.3} \quad X_{tc} = 14.583 \quad \text{Ом}$$

$$R_{td} := \frac{0.0335 \cdot 35^2}{4^2} \quad R_{td} = 2.565 \quad \text{Ом}$$

$$X_{td} := \frac{7.5 \cdot 35^2}{100 \cdot 4}$$

$$X_{td} = 22.969 \quad \text{Ом}$$

$$\delta Q_{xc} := \frac{0.8}{100} \cdot 6.3$$

$$\delta Q_{xc} = 0.05 \quad \text{Мвар}$$

$$\delta Q_{xd} := \frac{0.9}{100} \cdot 4$$

$$\delta Q_{xd} = 0.036 \quad \text{Мвар}$$

$$\delta P_c := \frac{4^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot R_{tc} + 0.008$$

$$\delta P_c = 0.029 \quad \text{МВт}$$

$$\delta Q_c := \frac{4^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot X_{tc} + \delta Q_{xc}$$

$$\delta Q_c = 0.268 \quad \text{Мвар}$$

$$\delta P_d := \frac{2.7^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot R_{td} + 0.0056$$

$$\delta P_d = 0.026 \quad \text{МВт}$$

$$\delta Q_d := \frac{2.7^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot X_{td} + \delta Q_{xd}$$

$$\delta Q_d = 0.215 \quad \text{Мвар}$$

Находим приведенные мощности

$$S_{prc} := 4 + \delta P_c + j \cdot (1.5 + \delta Q_c)$$

$$S_{prc} = 4.029 + 1.768i \quad \text{МВА}$$

$$S_{prd} := 2.7 + \delta P_d + j \cdot (1.5 + \delta Q_d)$$

$$S_{prd} = 2.726 + 1.715i \quad \text{МВА}$$

В сети 35 кВ не учитывают зарядную мощность ввиду ее малости. Тогда мощность в конце участка CD равна приведенной нагрузке узла D.

$$S_{cdk} := S_{prd}$$

$$S_{cdk} = 2.726 + 1.715i \quad \text{МВА}$$

Определим потери мощности на участке CD по известному напряжению узла D, равному $U_D = 34.2 \text{ кВ}$.

$$\delta S_{cd} := \frac{(\text{Re}(S_{cdk}))^2 + (\text{Im}(S_{cdk}))^2}{(34.2)^2} \cdot z_{cd}$$

$$\delta S_{cd} = 0.022 + 0.015i \quad \text{МВА}$$

Определим потерю напряжения на участке CD, пренебрегая поперечной составляющей падения напряжения

$$\delta U_{cd} := \frac{\text{Re}(S_{cdk}) \cdot \text{Re}(z_{cd}) + \text{Im}(S_{cdk}) \cdot \text{Im}(z_{cd})}{34.2}$$

$$\delta U_{cd} = 0.287 \quad \text{кВ}$$

Определим напряжение узла C

$$U_c := 34.2 + \delta U_{cd}$$

$$U_c = 34.487 \quad \text{кВ}$$

Находим поток мощности в начале участка CD

$$S_{cdn} := S_{cdk} + \delta S_{cd}$$

$$S_{cdn} = 2.748 + 1.73i \quad \text{МВА}$$

Находим поток мощности в конце участка AC и потери мощности на этом участке

$$S_{ack} := S_{cdn} + S_{prc}$$

$$S_{ack} = 6.777 + 3.498i \quad \text{МВА}$$

$$\delta S_{ac} := \frac{(\text{Re}(S_{ack}))^2 + (\text{Im}(S_{ack}))^2}{U_c^2} \cdot z_{ac}$$

$$\delta S_{ac} = 0.11 + 0.102i \quad \text{МВА}$$

Определим поток мощности в начале участка AC

$$S_{acn} := S_{ack} + \delta S_{ac}$$

$$S_{acn} = 6.887 + 3.6i \quad \text{МВА}$$

Определим потерю напряжения на участке AC

$$\delta U_{ac} := \frac{\operatorname{Re}(S_{ack}) \cdot \operatorname{Re}(z_{ac}) + \operatorname{Im}(S_{ack}) \cdot \operatorname{Im}(z_{ac})}{U_c} \quad \delta U_{ac} = 0.654 \text{ кВ}$$

Определим напряжение на источнике питания A

$$U_a := U_c + \delta U_{ac} \quad U_a = 35.14 \text{ кВ}$$

б) Расчет режима по данным начала

Находим поток мощности в конце участка CD и потери мощности на этом участке, принимая напряжение в узлах равным номинальному, 35 кВ.

$$S_{cdk} := S_{prd} \quad S_{cdk} = 2.726 + 1.715i \text{ МВА}$$

$$\delta S_{cd} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{cdk}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{cdk}))^2}{35^2} \cdot z_{cd} \quad \delta S_{cd} = 0.021 + 0.014i \text{ МВА}$$

Находим потоки мощности в начале участка CD и в конце участка AC

$$S_{cdn} := S_{cdk} + \delta S_{cd} \quad S_{cdn} = 2.747 + 1.729i \text{ МВА}$$

$$S_{ack} := S_{cdn} + S_{prc} \quad S_{ack} = 6.776 + 3.497i \text{ МВА}$$

Находим потери мощности на участке AC и поток мощности в начале участка

$$\delta S_{ac} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{ack}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{ack}))^2}{35^2} \cdot z_{ac} \quad \delta S_{ac} = 0.107 + 0.099i \text{ МВА}$$

$$S_{acn} := S_{ack} + \delta S_{ac} \quad S_{acn} = 6.883 + 3.596i \text{ МВА}$$

Находим потерю напряжения на участках AC и CD и напряжения в узлах C и D по известному напряжению центра питания

$$\delta U_{ac} := \frac{\operatorname{Re}(S_{acn}) \cdot \operatorname{Re}(z_{ac}) + \operatorname{Im}(S_{acn}) \cdot \operatorname{Im}(z_{ac})}{37} \quad \delta U_{ac} = 0.621 \text{ кВ}$$

$$U_c := 37 - \delta U_{ac} \quad U_c = 36.379 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{cd} := \frac{\operatorname{Re}(S_{cdn}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cd}) + \operatorname{Im}(S_{cdn}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cd})}{U_c} \quad \delta U_{cd} = 0.272 \text{ кВ}$$

$$U_d := U_c - \delta U_{cd} \quad U_d = 36.107 \text{ кВ}$$

Погрешность расчета не превышает 5%, поэтому вторая итерация не требуется.

Пример 4.2.

Рассчитать режим районной разомкнутой сети напряжением 110 кВ, приведенной на рисунке.

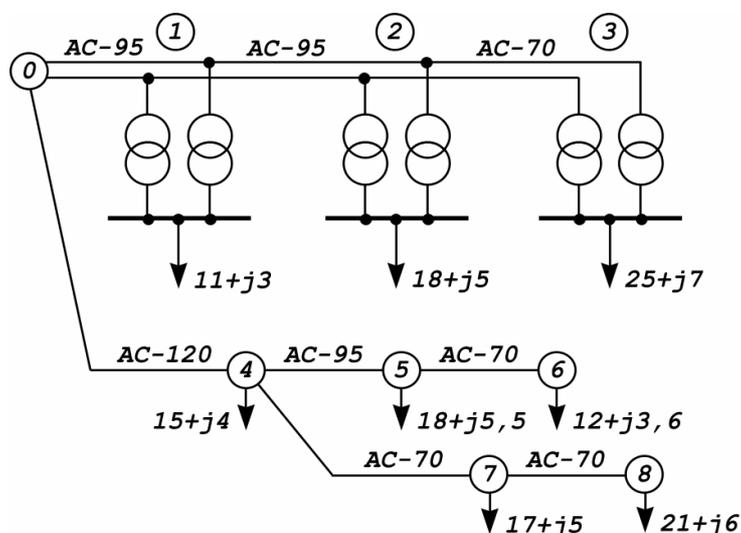
В первом случае принять напряжение источника питания равным 120 кВ. Марки и сечения проводов, нагрузки подстанций показаны на рисунке.

Во втором случае известно напряжение в узле б, которое равно 108 кВ.

Длины участков

$$l_{01} := 20 \text{ км}; \quad l_{23} := 25 \text{ км}; \quad l_{45} := 24 \text{ км}; \quad l_{47} := 19 \text{ км};$$

$$l_{04} := 32 \text{ км}; \quad l_{56} := 12 \text{ км}; \quad l_{78} := 21 \text{ км}; \quad l_{12} := 18 \text{ км}.$$



Определим индуктивные сопротивления и емкостные проводимости схем замещения участков сети. В справочных данных, например в /4/, находим погонные активные сопротивления участков в зависимости от сечения провода: $r_{01}=r_{12}=r_{45}=0.33 \text{ Ом/км}$, $r_{23}=r_{47}=r_{78}=r_{56}=0.45 \text{ Ом/км}$, $r_{04}=0.27 \text{ Ом/км}$.

Индуктивные сопротивления определяем по выражению (6), а емкостные проводимости - по выражению (22).

Сопротивления участков равны:

$$z_{01} := \left[0.33 \cdot l_{01} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{01} \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{01} = 3.3 + 4.285i \text{ Ом};$$

$$z_{12} := \left[0.33 \cdot l_{12} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{12} \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{12} = 2.97 + 3.857i \text{ Ом};$$

$$z_{23} := \left[0.45 \cdot l_{23} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{23} \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{23} = 5.625 + 5.492i \text{ Ом};$$

$$z_{04} := 0.27 \cdot l_{04} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{7.65} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{04} \right]$$

$$z_{04} = 8.64 + 13.52i \text{ Ом};$$

$$z_{45} := 0.33 \cdot l_{45} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{45} \right]$$

$$z_{45} = 7.92 + 10.285i \text{ Ом};$$

$$z_{56} := 0.45 \cdot l_{56} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{56} \right]$$

$$z_{56} = 5.4 + 5.272i \text{ Ом};$$

$$z_{47} := 0.45 \cdot l_{47} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{47} \right]$$

$$z_{47} = 8.55 + 8.348i \text{ Ом};$$

$$z_{78} := 0.45 \cdot l_{78} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{78} \right]$$

$$z_{78} = 9.45 + 9.226i \text{ Ом}.$$

Находим погонные емкостные проводимости:

$$b_{01} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{6.95} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{01} = 2.653 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{12} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{6.95}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{12} = 2.653 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{23} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{23} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{04} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{7.65}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{04} = 2.692 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{45} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{6.95}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{45} = 2.653 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{56} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{56} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{47} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{47} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{78} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{78} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Заданные значения нагрузок в узлах равны:

$$S_1 := 11 + j \cdot 3 \text{ МВА}; \quad S_3 := 25 + j \cdot 7 \text{ МВА}; \quad S_5 := 18 + j \cdot 5.5 \text{ МВА};$$

$$S_2 := 18 + j \cdot 5 \text{ МВА}; \quad S_4 := 15 + j \cdot 4 \text{ МВА}; \quad S_6 := 12 + j \cdot 3.6 \text{ МВА};$$

$$S_7 := 17 + j \cdot 5 \text{ МВА}; \quad S_8 := 21 + j \cdot 6 \text{ МВА}.$$

Так как в 1, 2 и 3 узлах типы трансформаторов неизвестны, вначале выбираем их мощность, а затем рассчитываем приведенную нагрузку в МВА.

Определяем реактивную мощность, передаваемую через трансформаторы из сети высокого напряжения, при нормативном $\text{tg } \varphi = 0,3 / 6/$

$$Q_{\text{э1}} := \text{Re}(S_1) \cdot 0.3$$

$$Q_{\text{э2}} := \text{Re}(S_2) \cdot 0.3$$

$$Q_{\text{э3}} := \text{Re}(S_3) \cdot 0.3$$

Находим расчетную мощность трансформаторов

$$S_{r1} := \frac{\sqrt{\text{Re}(S_1)^2 + Q_{\text{э1}}^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r1} = 8.203 \text{ МВА};$$

$$S_{r2} := \frac{\sqrt{\text{Re}(S_2)^2 + Q_{\text{э2}}^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r2} = 13.423 \text{ МВА};$$

$$S_{r3} := \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(S_3)^2 + Q_{\text{э}3}^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r3} = 18.643 \text{ МВА},$$

где 0,7 – коэффициент загрузки трансформатора;
2 – количество трансформаторов.

Номинальная мощность трансформатора должна быть больше или равна его расчетной мощности.

Выбираем следующие трансформаторы:

для 1 узла - ТДН 10000/110;

для 2 узла - ТДН 16000/110;

для 3 узла - ТРДН 25000/110.

Определяем их каталожные данные по /3/ и рассчитываем сопротивления по выражениям (36), (40):

$$z_{t1} := 7.95 + j \cdot 139 \text{ Ом}; \quad z_{t2} := 4.38 + j \cdot 86.7 \text{ Ом}; \quad z_{t3} := 2.54 + j \cdot 55.9 \text{ Ом}.$$

Определяем потери мощности в трансформаторах по выражениям (72), (74):

$$\Delta P_{t1} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_1)^2 + Q_{\text{э}1}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 7.95 + 0.014 \quad \Delta P_{t1} = 0.101 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_{t1} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_1)^2 + Q_{\text{э}1}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 139 + 0.09 \quad \Delta Q_{t1} = 1.605 \text{ Мвар};$$

$$\Delta P_{t2} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_2)^2 + Q_{\text{э}2}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 4.38 + 0.021 \quad \Delta P_{t2} = 0.149 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_{t2} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_2)^2 + Q_{\text{э}2}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 86.7 + 0.136 \quad \Delta Q_{t2} = 2.666 \text{ Мвар};$$

$$\Delta P_{t3} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_3)^2 + Q_{\text{э}3}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 2.54 + 0.029 \quad \Delta P_{t3} = 0.172 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_{t3} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_3)^2 + Q_{\text{э}3}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 55.9 + 0.200 \quad \Delta Q_{t3} = 3.347 \text{ Мвар}.$$

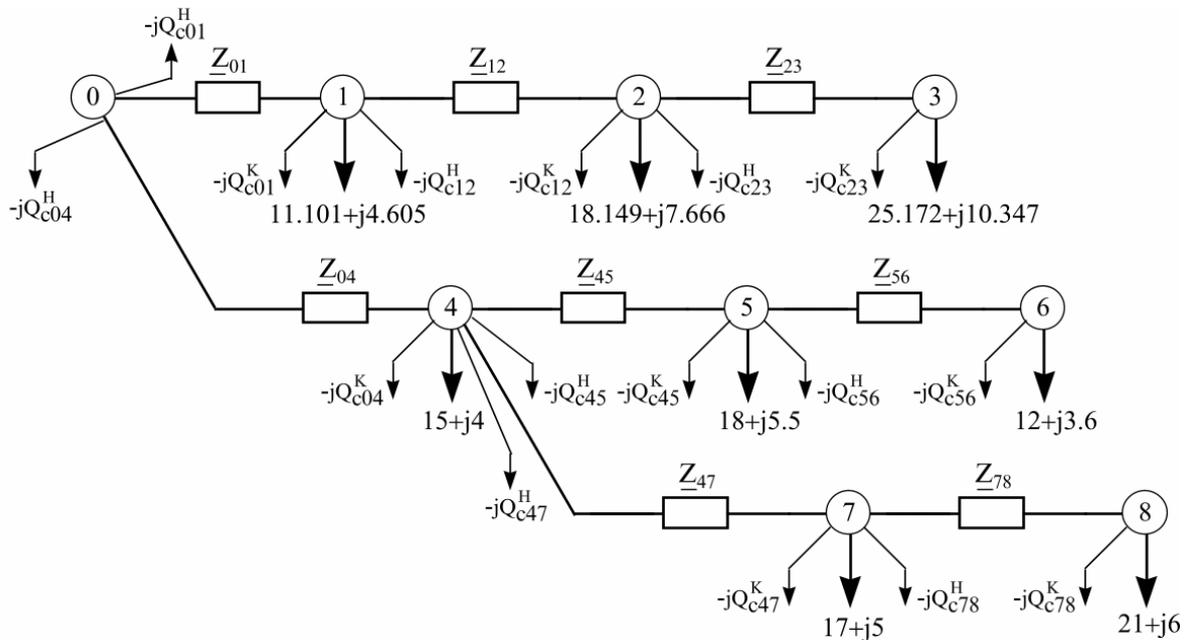
Определяем приведенные нагрузки узлов по выражению (71)

$$S_{pr1} := S_1 + \Delta P_{t1} + j \cdot \Delta Q_{t1} \quad S_{pr1} = 11.101 + 4.605i \text{ МВА};$$

$$S_{pr2} := S_2 + \Delta P_{t2} + j \cdot \Delta Q_{t2} \quad S_{pr2} = 18.149 + 7.666i \text{ МВА};$$

$$S_{pr3} := S_3 + \Delta P_{t3} + j \cdot \Delta Q_{t3} \quad S_{pr3} = 25.172 + 10.347i \text{ МВА}.$$

Схему замещения приводим к виду, показанному на рисунке.



Рассмотрим первый случай, когда известно напряжение источника питания. Расчет ведем по данным начала.

$$U_0 := 120 \text{ кВ.}$$

Находим значение зарядных мощностей в начале и конце каждой линии

$$Q_{23} := 110^2 \cdot b_{23} \cdot l_{23} \quad Q_{23} = 0.782 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{45} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{45} \cdot l_{45} \quad Q_{45} = 0.385 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{01} := 110^2 \cdot b_{01} \cdot l_{01} \quad Q_{01} = 0.642 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{04} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{04} \cdot l_{04} \quad Q_{04} = 0.521 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{56} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{56} \cdot l_{56} \quad Q_{56} = 0.188 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{12} := 110^2 \cdot b_{12} \cdot l_{12} \quad Q_{12} = 0.578 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{47} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{47} \cdot l_{47} \quad Q_{47} = 0.297 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{78} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{78} \cdot l_{78} \quad Q_{78} = 0.328 \text{ Мвар.}$$

Находим потоки мощности на каждом участке сети с учетом потерь по выражениям (106), (107), (108), (109):

$$S_{78k} := S_8 - j \cdot Q_{78} \quad S_{78k} = 21 + 5.672i \text{ МВА;}$$

$$\Delta S_{78} := \frac{\text{Re}(S_{78k})^2 + \text{Im}(S_{78k})^2}{110^2} \cdot z_{78} \quad \Delta S_{78} = 0.37 + 0.361i \text{ МВА;}$$

$$S_{78n} := S_{78k} + \Delta S_{78} \quad S_{78n} = 21.37 + 6.032i \text{ МВА;}$$

$$S_{47k} := S_{78n} + S_7 - j \cdot (Q_{78} + Q_{47}) \quad S_{47k} = 38.37 + 10.407i \text{ МВА;}$$

$$\Delta S_{47} := \frac{\operatorname{Re}(S_{47k})^2 + \operatorname{Im}(S_{47k})^2}{110^2} \cdot z_{47}$$

$$S_{47n} := S_{47k} + \Delta S_{47}$$

$$S_{56k} := S_6 - j \cdot Q_{56}$$

$$\Delta S_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{56k})^2 + \operatorname{Im}(S_{56k})^2}{110^2} \cdot z_{56}$$

$$S_{56n} := S_{56k} + \Delta S_{56}$$

$$S_{45k} := S_{56n} + S_5 - j \cdot (Q_{56} + Q_{45})$$

$$\Delta S_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{45k})^2 + \operatorname{Im}(S_{45k})^2}{110^2} \cdot z_{45}$$

$$S_{45n} := S_{45k} + \Delta S_{45}$$

$$S_{04k} := S_{45n} + S_4 + S_{47n} - j \cdot (Q_{45} + Q_{04} + Q_{47})$$

$$S_{04k} = 85.194 + 23.529i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k})^2 + \operatorname{Im}(S_{04k})^2}{110^2} \cdot z_{04}$$

$$S_{04n} := S_{04k} + \Delta S_{04}$$

$$S_{23k} := S_{pr3} - j \cdot Q_{23}$$

$$\Delta S_{23} := \frac{\operatorname{Re}(S_{23k})^2 + \operatorname{Im}(S_{23k})^2}{110^2} \cdot z_{23}$$

$$S_{23n} := S_{23k} + \Delta S_{23}$$

$$S_{12k} := S_{23n} + S_{pr2} - j \cdot (Q_{23} + Q_{12})$$

$$\Delta S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2}{110^2} \cdot z_{12}$$

$$S_{12n} := S_{12k} + \Delta S_{12}$$

$$S_{01k} := S_{12n} + S_{pr1} - j \cdot (Q_{12} + Q_{01})$$

$$\Delta S_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{01k})^2 + \operatorname{Im}(S_{01k})^2}{110^2} \cdot z_{01}$$

$$S_{01n} := S_{01k} + \Delta S_{01}$$

$$\Delta S_{47} = 1.117 + 1.09i \text{ MBA};$$

$$S_{47n} = 39.486 + 11.497i \text{ MBA};$$

$$S_{56k} = 12 + 3.412i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{56} = 0.069 + 0.068i \text{ MBA};$$

$$S_{56n} = 12.069 + 3.48i \text{ MBA};$$

$$S_{45k} = 30.069 + 8.407i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{45} = 0.638 + 0.829i \text{ MBA};$$

$$S_{45n} = 30.708 + 9.236i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{04} = 5.578 + 8.729i \text{ MBA};$$

$$S_{04n} = 90.772 + 32.258i \text{ MBA};$$

$$S_{23k} = 25.172 + 9.565i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{23} = 0.337 + 0.329i \text{ MBA};$$

$$S_{23n} = 25.509 + 9.894i \text{ MBA};$$

$$S_{12k} = 43.658 + 16.201i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{12} = 0.532 + 0.691i \text{ MBA};$$

$$S_{12n} = 44.19 + 16.892i \text{ MBA};$$

$$S_{01k} = 55.291 + 20.277i \text{ MBA};$$

$$\Delta S_{01} = 0.946 + 1.228i \text{ MBA};$$

$$S_{01n} = 56.237 + 21.506i \text{ MBA}.$$

По найденным потокам мощности находим напряжения в узлах, начиная с источника питания, по выражениям (110), (111) в кВ

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_1 = 117.686 - 1.417i \text{ кВ};$$

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 116.005 - 2.419i \quad \text{кВ};$$

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}} \right)$$

$$U_3 = 114.285 - 3.111i \quad \text{кВ};$$

$$U_4 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04}) + \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04}) - \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_4 = 109.83 - 7.905i \quad \text{кВ};$$

$$U_5 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) - \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_5 = 106.608 - 9.882i \quad \text{кВ};$$

$$U_6 := U_5 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_6 = 105.793 - 10.227i \quad \text{кВ};$$

$$U_7 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47}) + \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47}) - \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_7 = 105.752 - 9.717i \quad \text{кВ};$$

$$U_8 := U_7 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78}) + \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78})}{\overline{U_7}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78}) - \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78})}{\overline{U_7}} \right)$$

$$U_8 = 103.216 - 10.81i \quad \text{кВ}.$$

Второй случай. Известно напряжение в конце участка сети 4-6, т.е. в узле 6, и нагрузки во всех узлах, поэтому начинаем расчет режима сети с участка 4-6 и считаем по данным конца.

Расчет по данным конца

$$U_6 := 108 \text{ кВ}.$$

Определим зарядные мощности в конце линии 5-6 по выражению (94)

$$Q_{56k} := \frac{1}{2} \cdot U_6^2 \cdot b_{56} \cdot l_{56}$$

$$Q_{56k} = 0.181 \quad \text{Мвар}.$$

Определим мощность в конце участка 5-6 по выражению (95), потери мощности в линии 5-6 по выражению (96) и мощность в начале участка 5-6 по выражению (97).

$$S_{56k} := S_6 - j \cdot Q_{56k}$$

$$S_{56k} = 12 + 3.412i \quad \text{МВА};$$

$$\Delta S_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{56k})^2 + \operatorname{Im}(S_{56k})^2}{U_6^2} \cdot z_{56}$$

$$\Delta S_{56} = 0.072 + 0.07i \quad \text{МВА};$$

$$S_{56n} := S_{56k} + \Delta S_{56}$$

$$S_{56n} = 12.072 + 3.489i \quad \text{МВА}.$$

Определим напряжение в узле 5 по выражению (99), предварительно рассчитав падение напряжения на участке 5-6 по выражению (98).

$$U_{\Delta 56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{\overline{U_6}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56})}{\overline{U_6}}$$

$$U_{\Delta 56} = 0.767 + 0.415i \text{ кВ.}$$

$$U_5 = 108.767 + 0.415i \text{ кВ.}$$

$$U_5 := U_6 + U_{\Delta 56}$$

Аналогично рассчитываем участок 4-5

$$Q_{56n} := \frac{1}{2} \cdot (|U_5|)^2 \cdot b_{56} \cdot l_{56}$$

$$Q_{56n} = 0.184 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{45k} := \frac{1}{2} \cdot (|U_5|)^2 \cdot b_{45} \cdot l_{45}$$

$$Q_{45k} = 0.377 \text{ Мвар;}$$

$$S_{45k} := S_{56n} + S_5 - j \cdot (Q_{45k} + Q_{56n})$$

$$S_{45k} = 30.076 + 8.429i \text{ МВА;}$$

$$\Delta S_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{45k})^2 + \operatorname{Im}(S_{45k})^2}{U_5^2} \cdot z_{45}$$

$$\Delta S_{45} = 0.66 + 0.843i \text{ МВА;}$$

$$S_{45n} := S_{45k} + \Delta S_{45}$$

$$S_{45n} = 30.736 + 9.272i \text{ МВА;}$$

$$U_{\Delta 45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{U_5} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45})}{U_5}$$

$$U_{\Delta 45} = 2.979 + 2.242i \text{ кВ;}$$

$$U_4 = 111.745 + 2.656i \text{ кВ.}$$

$$U_4 := U_5 + U_{\Delta 45}$$

Определяем зарядные мощности линий, подходящих к узлу 4

$$Q_{04k} := \frac{1}{2} \cdot (|U_4|)^2 \cdot b_{04} \cdot l_{04}$$

$$Q_{04k} = 0.398 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{45n} := \frac{1}{2} \cdot (|U_4|)^2 \cdot b_{45} \cdot l_{45}$$

$$Q_{45n} = 0.398 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{47n} := \frac{1}{2} \cdot (|U_4|)^2 \cdot b_{47} \cdot l_{47}$$

$$Q_{47n} = 0.307 \text{ Мвар.}$$

Рассчитываем режим участка 4-8 по данным начала, рассматривая для него узел 4 как источник питания

$$U_4 = 111.745 + 2.656i \text{ кВ.}$$

Определим зарядные мощности линий в конце и начале участка 7-8, в конце участка 4-7, принимая напряжения узлов 7 и 8 равными номинальному.

$$Q_{78n} := Q_{78k} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{78} \cdot l_{78}$$

$$Q_{78k} = 0.328 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{47k} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{47} \cdot l_{47}$$

$$Q_{47k} = 0.297 \text{ Мвар.}$$

Определим потоки мощностей с учетом потерь на участках 7-8, 4-7

$$S_{78k} := S_8 - j \cdot Q_{78k}$$

$$S_{78k} = 21 + 5.672i \text{ МВА;}$$

$$\Delta S_{78} := \frac{\operatorname{Re}(S_{78k})^2 + \operatorname{Im}(S_{78k})^2}{110^2} \cdot z_{78}$$

$$\Delta S_{78} = 0.37 + 0.361i \text{ МВА;}$$

$$S_{78n} := S_{78k} + \Delta S_{78}$$

$$S_{78n} = 21.37 + 6.032i \text{ МВА;}$$

$$S_{47k} := S_{78n} + S_7 - j \cdot (Q_{78n} + Q_{47k})$$

$$S_{47k} = 38.37 + 10.407i \text{ МВА;}$$

$$\Delta S_{47} := \frac{\operatorname{Re}(S_{47k})^2 + \operatorname{Im}(S_{47k})^2}{110^2} \cdot z_{47} \quad \Delta S_{47} = 1.117 + 1.09i \quad \text{MBA};$$

$$S_{47n} := S_{47k} + \Delta S_{47} \quad S_{47n} = 39.486 + 11.497i \quad \text{MBA}.$$

Определим мощность в конце участка 0-4

$$S_{04k} := S_{45n} + S_{47n} + S_4 - j \cdot (Q_{45n} + Q_{47n} + Q_{04k})$$

$$S_{04k} = 85.222 + 23.667i \quad \text{MBA}.$$

Рассчитаем потери мощности на участке 0-4 по известному напряжению в узле 4 и потоку мощности в конце участка 0-4

$$\Delta S_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k})^2 + \operatorname{Im}(S_{04k})^2}{U_4^2} \cdot z_{04} \quad \Delta S_{04} = 5.806 + 8.199i \quad \text{MBA}.$$

Определим падение напряжения на участке 0-4 по напряжению узла 4

$$U_{\Delta 04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04}) + \operatorname{Im}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04}) - \operatorname{Im}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04})}{\overline{U_4}}$$

$$U_{\Delta 04} = 9.246 + 8.701i \quad \text{кВ}.$$

Найдем напряжение источника питания - узла 0

$$U_0 := U_4 + U_{\Delta 04} \quad U_0 = 120.991 + 11.358i \quad \text{кВ}.$$

Участок сети 0-3 рассчитаем по данным начала аналогично случаю 1

$$Q_{01} := 110^2 \cdot b_{01} \cdot l_{01} \quad Q_{01} = 0.642 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{12} := 110^2 \cdot b_{12} \cdot l_{12} \quad Q_{12} = 0.578 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{23} := 110^2 \cdot b_{23} \cdot l_{23} \quad Q_{23} = 0.782 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{23k} := S_{pr3} - j \cdot Q_{23} \quad S_{23k} = 25.172 + 9.565i \quad \text{MBA};$$

$$\Delta S_{23} := \frac{\operatorname{Re}(S_{23k})^2 + \operatorname{Im}(S_{23k})^2}{110^2} \cdot z_{23} \quad \Delta S_{23} = 0.337 + 0.329i \quad \text{MBA};$$

$$S_{23n} := S_{23k} + \Delta S_{23} \quad S_{23n} = 25.509 + 9.894i \quad \text{MBA};$$

$$S_{12k} := S_{23n} + S_{pr2} - j \cdot (Q_{23} + Q_{12}) \quad S_{12k} = 43.658 + 16.201i \quad \text{MBA};$$

$$\Delta S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2}{110^2} \cdot z_{12} \quad \Delta S_{12} = 0.532 + 0.691i \quad \text{MBA};$$

$$S_{12n} := S_{12k} + \Delta S_{12} \quad S_{12n} = 44.19 + 16.892i \quad \text{MBA};$$

$$S_{01k} := S_{12n} + S_{pr1} - j \cdot (Q_{12} + Q_{01}) \quad S_{01k} = 55.291 + 20.277i \quad \text{MBA};$$

$$\Delta S_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{01k})^2 + \operatorname{Im}(S_{01k})^2}{110^2} \cdot z_{01} \quad \Delta S_{01} = 0.946 + 1.228i \quad \text{MBA};$$

$$S_{01n} := S_{01k} + \Delta S_{01} \quad S_{01n} = 56.237 + 21.506i \quad \text{MBA};$$

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$\begin{aligned}
U_1 &= 118.847 + 9.751i \text{ кВ}; \\
U_2 &:= U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right) \\
U_2 &= 117.288 + 8.611i \text{ кВ}; \\
U_3 &:= U_2 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}} \right) \\
U_3 &= 115.663 + 7.772i \text{ кВ}; \\
U_7 &:= U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47}) + \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47}) - \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47})}{\overline{U_4}} \right) \\
U_7 &= 107.917 + 0.495i \text{ кВ}; \\
U_8 &:= U_7 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78}) + \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78})}{\overline{U_7}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78}) - \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78})}{\overline{U_7}} \right) \\
U_8 &= 105.536 - 0.814i \text{ кВ}.
\end{aligned}$$

Сравниваем напряжения в узлах 3 и 8 с номинальным и делаем вывод о нецелесообразности второй итерации

$$\frac{|U_8| - 110}{|U_8|} \cdot 100 = -4.227 \%; \quad \frac{|U_3| - 110}{|U_3|} \cdot 100 = 4.719 \%.$$

Мощность, генерируемая с шин источника питания

$$S_0 := S_{01n} + S_{04n} - j \cdot (Q_{01} + Q_{04}) \quad S_0 = 147.009 + 52.723i \text{ МВА}.$$

$$Q_{01} = Q_{01n}, \quad Q_{04} = Q_{04n}$$

Т.о., был рассчитан режим районной разомкнутой сети с использованием алгоритмов расчета по данным начала и конца.

Практическое занятие № 5.

«Расчет режимов в кольцевых сетях».

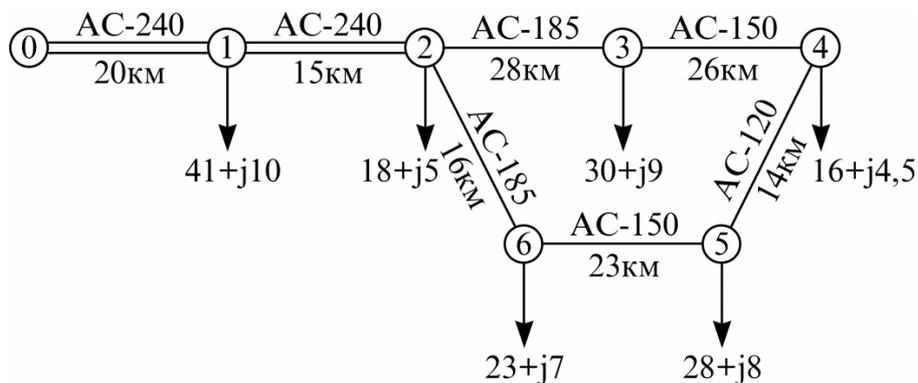
Цель: освоить методы расчета режимов в кольцевых сетях.

Примеры решения типовых задач.

Листинг
примеров решения задач в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 5.1.

Рассчитать потокораспределение в сети и напряжения в узлах сети, схема которой показана на рисунке, при известном напряжении источника питания. Исходные данные приведены на рисунке.



$U_{\text{нп}}=119,1$ кВ.

Определяем сопротивления и проводимости всех участков сети, пользуясь справочными данными /4/:

$$z_{01} := \left[0.13 \cdot 20 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 20 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{01} = 1.3 + 4.012j \quad \text{Ом};$$

$$z_{12} := \left[0.13 \cdot 15 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 15 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{12} = 0.975 + 3.009j \quad \text{Ом};$$

$$z_{23} := 0.17 \cdot 28 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{9.55} \right) + 0.0157 \right) \cdot 28 \right]$$

$$z_{23} = 4.76 + 11.441j \quad \text{Ом};$$

$$z_{34} := 0.21 \cdot 26 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{8.5} \right) + 0.0157 \right) \cdot 26 \right]$$

$$z_{34} = 5.46 + 10.813j \quad \text{Ом};$$

$$z_{45} := 0.27 \cdot 14 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{7.65} \right) + 0.0157 \right) \cdot 14 \right]$$

$$z_{45} = 3.78 + 5.915j \quad \text{Ом};$$

$$z_{56} := 0.21 \cdot 23 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{8.5} \right) + 0.0157 \right) \cdot 23 \right]$$

$$z_{56} = 4.83 + 9.566j \quad \text{Ом};$$

$$z_{62} := 0.17 \cdot 16 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{9.55} \right) + 0.0157 \right) \cdot 16 \right]$$

$$z_{62} = 2.72 + 6.537j \quad \text{Ом};$$

$$b_{001} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{001} = 2.842 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{045} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{7.65} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{045} = 2.692 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o12} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{10.75}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o12} = 2.842 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o56} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{8.5}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o56} = 2.737 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o23} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{9.55}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o23} = 2.788 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o62} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{9.55}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o62} = 2.788 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o34} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{8.5}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o34} = 2.737 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$U_0 := 119.1 \text{ кВ.}$$

Рассчитываем зарядные мощности участков сети по номинальному напряжению:

$$Q_{c01} := 110^2 \cdot b_{o01} \cdot 20$$

$$Q_{c01} = 0.688 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c12} := 110^2 \cdot b_{o12} \cdot 15$$

$$Q_{c12} = 0.516 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c23} := \frac{110^2 \cdot b_{o23} \cdot 28}{2}$$

$$Q_{c23} = 0.472 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c34} := \frac{110^2 \cdot b_{o34} \cdot 26}{2}$$

$$Q_{c34} = 0.431 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c45} := \frac{110^2 \cdot b_{o45} \cdot 14}{2}$$

$$Q_{c45} = 0.228 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c56} := \frac{110^2 \cdot b_{o56} \cdot 23}{2}$$

$$Q_{c56} = 0.381 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c62} := \frac{110^2 \cdot b_{o62} \cdot 16}{2}$$

$$Q_{c62} = 0.27 \quad \text{Мвар.}$$

Определяем расчетные нагрузки узлов:

$$S_1 := 41 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c01} - j \cdot Q_{c12}$$

$$S_1 = 41 + 8.797j \quad \text{МВА};$$

$$S_2 := 18 + j \cdot 5 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c62}$$

$$S_2 = 18 + 3.742j \quad \text{МВА};$$

$$S_3 := 30 + j \cdot 9 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34}$$

$$S_3 = 30 + 8.097j \quad \text{МВА};$$

$$S_4 := 16 + j \cdot 4.5 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c45}$$

$$S_4 = 16 + 3.841j \quad \text{МВА};$$

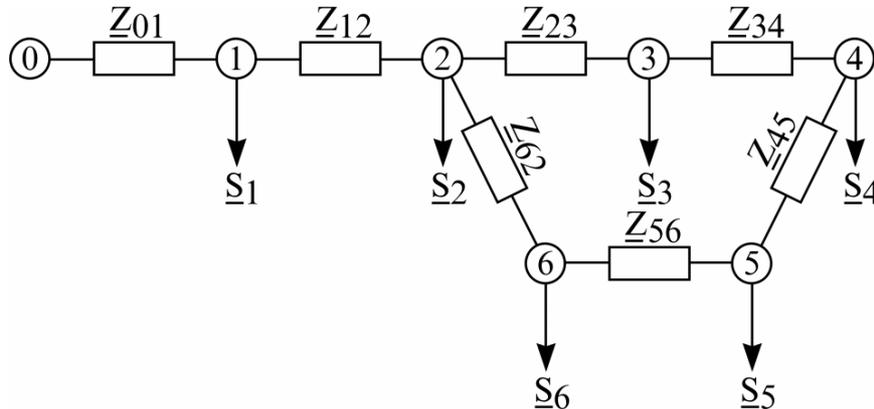
$$S_5 := 28 + j \cdot 8 - j \cdot Q_{c45} - j \cdot Q_{c56}$$

$$S_5 = 28 + 7.391j \quad \text{МВА};$$

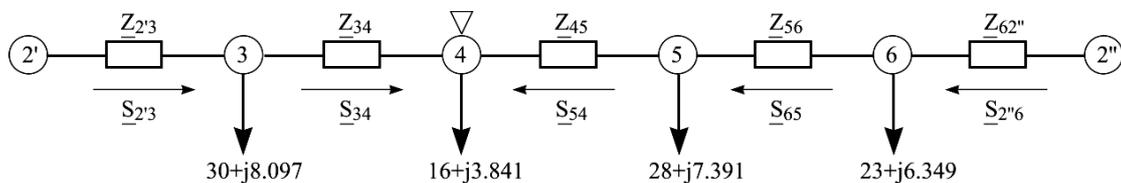
$$S_6 := 23 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{c56} - j \cdot Q_{c62}$$

$$S_6 = 23 + 6.349j \quad \text{МВА.}$$

Схема замещения сети имеет вид, показанный на рисунке. Здесь приведены расчетные нагрузки узлов.



Принимаем в качестве источника питания узел 2, по которому разрезаем кольцевую сеть. Схема замещения кольцевой сети имеет вид:



Определим потоки мощности на головных участках, для чего вначале рассчитаем сопротивления. При определении сопротивлений учтено, что $z_{2'3} = z_{23}$ и $z_{2''6} = z_{26}$.

$$z_{2'2''} := z_{23} + z_{34} + z_{45} + z_{56} + z_{62}$$

$$z_{32''} := z_{34} + z_{45} + z_{56} + z_{62}$$

$$z_{62'} := z_{56} + z_{45} + z_{34} + z_{23}$$

$$z_{42''} := z_{45} + z_{56} + z_{62}$$

$$z_{52'} := z_{45} + z_{34} + z_{23}$$

$$z_{52''} := z_{56} + z_{62}$$

$$z_{42'} := z_{34} + z_{23}$$

$$z_{62''} := z_{62}$$

$$z_{32'} := z_{23}$$

Потоки мощности на головных участках (сопряжение показывается черточкой сверху):

$$S_{2'3} := \frac{\overline{S_3 \cdot z_{32''}} + \overline{S_4 \cdot z_{42''}} + \overline{S_5 \cdot z_{52''}} + \overline{S_6 \cdot z_{62''}}}{z_{2'2''}}$$

$$S_{2'3} = 43.852 + 11.856j \text{ МВА};$$

$$S_{2''6} := \frac{\overline{S_6 \cdot z_{62'}} + \overline{S_5 \cdot z_{52'}} + \overline{S_4 \cdot z_{42'}} + \overline{S_3 \cdot z_{32'}}}{z_{2'2''}}$$

$$S_{2''6} = 53.148 + 13.823j \text{ МВА.}$$

Находим потоки мощности на остальных участках сети

$$S_{34} := S_{2'3} - S_3$$

$$S_{34} = 13.852 + 3.759j \text{ МВА};$$

$$S_{45} := S_{34} - S_4$$

$$S_{45} = -2.148 - 0.083j \text{ МВА};$$

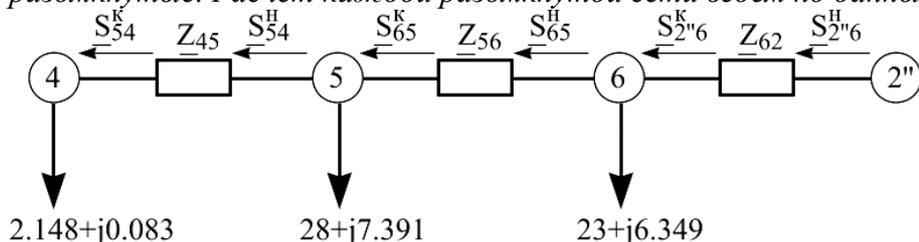
$$S_{65} := S_{2''6} - S_6$$

$$S_{65} = 30.148 + 7.474j \text{ МВА};$$

$$S_{54} := S_{65} - S_5$$

$$S_{54} = 2.148 + 0.083j \text{ МВА.}$$

Точка 4 - точка потокоораздела, по которой разрезаем кольцевую сеть на две разомкнутые. Расчет каждой разомкнутой сети ведем по данным начала.



Потери мощности на участке сети 4-5:

активные

$$dP_{54} := \frac{\operatorname{Re}((S_{45})^2) + \operatorname{Im}((S_{45})^2)}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) \quad dP_{54} = 1.443 \cdot 10^{-3} \text{ МВт};$$

реактивные

$$dQ_{54} := \frac{\operatorname{Re}((S_{45})^2) + \operatorname{Im}((S_{45})^2)}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) \quad dQ_{54} = 2.258 \cdot 10^{-3} \text{ Мвар};$$

$$S_{54n} := S_{54} + dP_{54} + j \cdot dQ_{54} \quad S_{54n} = 2.149 + 0.085j \text{ МВА.}$$

Определяем мощность в конце участка 5-6 и потери мощности на нем:

$$S_{65k} := S_{54n} + S_5 \quad S_{65k} = 30.149 + 7.476j \text{ МВА};$$

$$dP_{65} := \frac{\operatorname{Re}((S_{65k})^2) + \operatorname{Im}((S_{65k})^2)}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) \quad dP_{65} = 0.385 \text{ МВт};$$

$$dQ_{65} := \frac{\operatorname{Re}((S_{65k})^2) + \operatorname{Im}((S_{65k})^2)}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) \quad dQ_{65} = 0.763 \text{ Мвар.}$$

Мощность в начале участка 5-6

$$S_{65n} := S_{65k} + dP_{65} + j \cdot dQ_{65} \quad S_{65n} = 30.534 + 8.239j \text{ МВА.}$$

Далее расчет ведем аналогично.

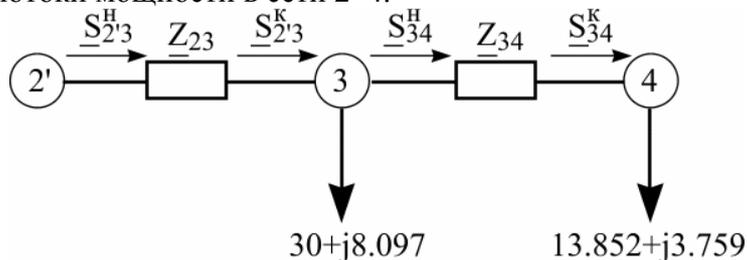
$$S_{2''6k} := S_{65n} + S_6 \quad S_{2''6k} = 53.534 + 14.588j \text{ МВА};$$

$$dP_{2''6} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2''6k})^2) + \operatorname{Im}((S_{2''6k})^2)}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{62}) \quad dP_{2''6} = 0.692 \text{ МВт};$$

$$dQ_{2''6} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2''6k})^2) + \operatorname{Im}((S_{2''6k})^2)}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{62}) \quad dQ_{2''6} = 1.663 \text{ Мвар};$$

$$S_{2''6n} := S_{2''6k} + dP_{2''6} + j \cdot dQ_{2''6} \quad S_{2''6n} = 54.226 + 16.252j \text{ МВА.}$$

Определим потоки мощности в сети 2'-4.



$$dP_{34} := \frac{\operatorname{Re}((S_{34}))^2 + \operatorname{Im}((S_{34}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) \quad dP_{34} = 0.093 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{34} := \frac{\operatorname{Re}((S_{34}))^2 + \operatorname{Im}((S_{34}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) \quad dQ_{34} = 0.184 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{34n} := S_{34} + dP_{34} + j \cdot dQ_{34} \quad S_{34n} = 13.945 + 3.943j \quad \text{МВА};$$

$$S_{2'3k} := S_{34n} + S_3 \quad S_{2'3k} = 43.945 + 12.04j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{2'3} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2'3k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{2'3k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) \quad dP_{2'3} = 0.817 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{2'3} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2'3k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{2'3k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) \quad dQ_{2'3} = 1.963 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{2'3n} := S_{2'3k} + dP_{2'3} + j \cdot dQ_{2'3} \quad S_{2'3n} = 44.762 + 14.003j \quad \text{МВА};$$

Рассчитаем потоки мощности на участке сети 0-2.

$$S_{12k} := S_{2'3n} + S_{2''6n} + S_2 \quad S_{12k} = 116.172 + 32.034j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{12} := \frac{\operatorname{Re}((S_{12k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{12k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) \quad dP_{12} = 1.17 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{12} := \frac{\operatorname{Re}((S_{12k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{12k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) \quad dQ_{12} = 3.611 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{12n} := S_{12k} + dP_{12} + j \cdot dQ_{12} \quad S_{12n} = 117.342 + 35.645j \quad \text{МВА};$$

$$S_{01k} := S_{12n} + S_1 \quad S_{01k} = 158.342 + 44.441j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{01} := \frac{\operatorname{Re}((S_{01k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{01k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) \quad dP_{01} = 2.906 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{01} := \frac{\operatorname{Re}((S_{01k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{01k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) \quad dQ_{01} = 8.967 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{01n} := S_{01k} + dP_{01} + j \cdot dQ_{01} \quad S_{01n} = 161.248 + 53.409j \quad \text{МВА};$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы по известному напряжению источника питания и потоку мощности в начале головного участка. Т.к. в сети номинального напряжения 110 кВ поперечная составляющая падения напряжения мала, в инженерных расчетах ею можно пренебречь и учесть только продольную составляющую.

$$U_0 = 119.1 \quad \text{кВ};$$

$$U_1 := U_0 - \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{U_0} \quad U_1 = 115.541 \quad \text{кВ};$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{U_1} \quad U_2 = 113.623 \quad \text{кВ};$$

$$U_3 := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{2'3n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{2'3n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{U_2} \quad U_3 = 110.337 \text{ кВ};$$

$$U_4 := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{U_3} \quad U_4 = 109.261 \text{ кВ};$$

$$U_6 := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{2''6n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{62}) + \operatorname{Im}(S_{2''6n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{62})}{U_2} \quad U_6 = 111.389 \text{ кВ};$$

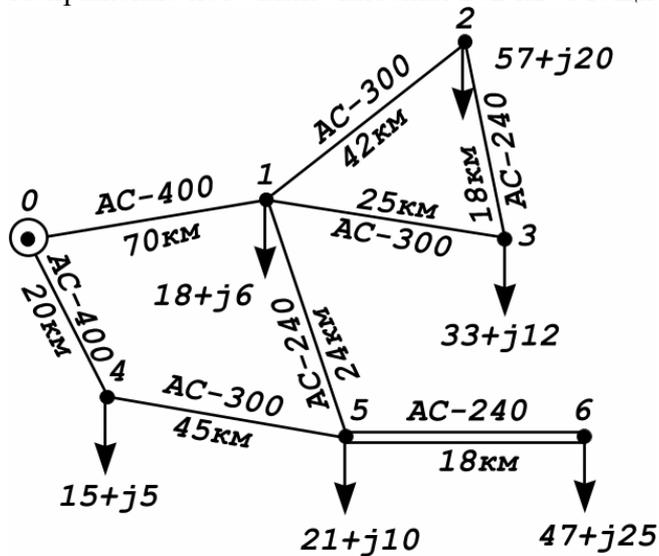
$$U_5 := U_6 - \frac{\operatorname{Re}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{U_6} \quad U_5 = 109.358 \text{ кВ};$$

$$U_4 := U_5 - \frac{\operatorname{Re}(S_{54n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{54n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{U_5} \quad U_4 = 109.279 \text{ кВ}.$$

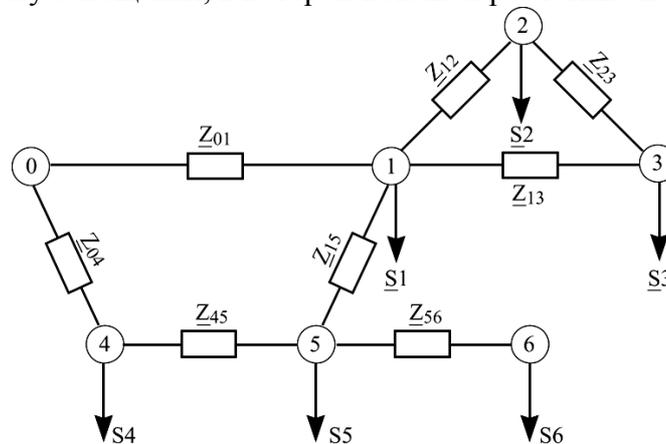
Сравнивая напряжения в точке потокоораздела, полученные с двух сторон, между собой и с номинальным напряжением сети, делаем вывод, что вторая итерация не нужна.

Пример 5.2.

Рассчитать установившийся режим в сети, схема которой приведена на рисунке. Напряжение источника питания 242 кВ. Мощности нагрузок узлов заданы в МВА.



Составляем схему замещения, в которой покажем расчетные нагрузки узлов.



Определяем параметры схемы замещения.

Находим значения сопротивлений и проводимостей по справочным данным /4/:

$$z_{01} := 0.078 \cdot 70 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 70 \right]$$

$$z_{01} = 5.46 + 28.431i \quad \text{Ом};$$

$$z_{12} := 0.105 \cdot 42 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 42 \right]$$

$$z_{12} = 4.41 + 17.402i \quad \text{Ом};$$

$$z_{13} := 0.105 \cdot 25 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 25 \right]$$

$$z_{13} = 2.625 + 10.358i \quad \text{Ом};$$

$$z_{23} := 0.13 \cdot 18 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 18 \right]$$

$$z_{23} = 2.34 + 7.601i \quad \text{Ом};$$

$$z_{04} := 0.078 \cdot 20 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 20 \right]$$

$$z_{04} = 1.56 + 8.123i \quad \text{Ом};$$

$$z_{45} := 0.105 \cdot 45 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 45 \right]$$

$$z_{45} = 4.725 + 18.645i \quad \text{Ом};$$

$$z_{15} := 0.13 \cdot 24 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 24 \right]$$

$$z_{15} = 3.12 + 10.135i \quad \text{Ом};$$

$$z_{56} := \left[0.13 \cdot 18 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 18 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{56} = 1.17 + 3.801i \quad \text{Ом};$$

$$b_{o01} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o01} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o04} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o04} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o12} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{12.2} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o12} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o45} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{12.2} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o45} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o13} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{12.2}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o13} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o15} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{10.75}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o15} = 2.694 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o23} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{10.75}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o23} = 2.694 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{o56} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{10.75}\right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2$$

$$b_{o56} = 5.388 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$U_0 := 242 \text{ кВ.}$$

Принимаем напряжения в узлах равными номинальному и рассчитываем зарядные мощности линий.

$$Q_{c01} := \frac{220^2 \cdot b_{o01} \cdot 70}{2}$$

$$Q_{c01} = 4.752 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 42}{2}$$

$$Q_{c12} = 2.851 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c13} := \frac{220^2 \cdot b_{o13} \cdot 25}{2}$$

$$Q_{c13} = 1.662 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 18}{2}$$

$$Q_{c23} = 1.173 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c04} := \frac{220^2 \cdot b_{o04} \cdot 20}{2}$$

$$Q_{c04} = 1.358 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c45} := \frac{220^2 \cdot b_{o45} \cdot 45}{2}$$

$$Q_{c45} = 2.992 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 24}{2}$$

$$Q_{c15} = 1.565 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c56} := \frac{220^2 \cdot b_{o56} \cdot 18}{2}$$

$$Q_{c56} = 2.347 \quad \text{Мвар.}$$

Находим расчетные мощности узлов нагрузки.

$$S_2 := 57 + j \cdot 20 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23}$$

$$S_2 = 57 + 15.975i \quad \text{МВА};$$

$$S_3 := 33 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c13}$$

$$S_3 = 33 + 9.164i \quad \text{МВА};$$

$$S_4 := 15 + j \cdot 5 - j \cdot Q_{c04} - j \cdot Q_{c45}$$

$$S_4 = 15 + 0.65i \quad \text{МВА};$$

$$S_6 := 47 + j \cdot 25 - j \cdot Q_{c56}$$

$$S_6 = 47 + 22.653i \quad \text{МВА.}$$

Определяем потери мощности на участке 5-6 и мощность в начале участка.

$$\Delta S_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_6)^2 + \operatorname{Im}(S_6)^2}{220^2} \cdot z_{56}$$

$$\Delta S_{56} = 0.066 + 0.214i \text{ МВА};$$

$$S_{56n} := S_6 + \Delta S_{56}$$

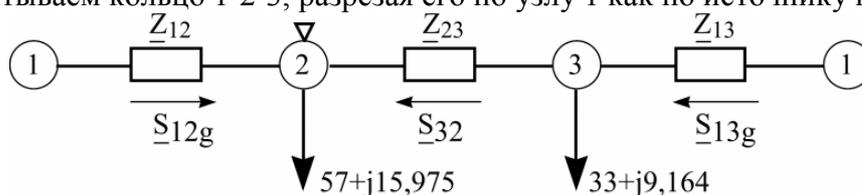
$$S_{56n} = 47.066 + 22.867i \text{ МВА.}$$

Определяем суммарную нагрузку узла 5.

$$S_{5'} := 21 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c45} - j \cdot Q_{c56} - j \cdot Q_{c15} + S_6 + \Delta S_{56}$$

$$S_{5'} = 68.066 + 25.963i \text{ МВА.}$$

Рассчитываем кольцо 1-2-3, разрезая его по узлу 1 как по источнику питания.



Находим потоки мощности на головных участках.

$$S_{12g} := \frac{S_2 \cdot (\overline{z_{23}} + \overline{z_{13}}) + S_3 \cdot \overline{z_{13}}}{\overline{z_{12}} + \overline{z_{23}} + \overline{z_{13}}}$$

$$S_{12g} = 38.612 + 11.014i \text{ МВА}$$

$$S_{13g} := \frac{S_3 \cdot (\overline{z_{23}} + \overline{z_{12}}) + S_2 \cdot \overline{z_{12}}}{\overline{z_{12}} + \overline{z_{23}} + \overline{z_{13}}}$$

$$S_{13g} = 51.388 + 14.125i \text{ МВА}$$

Определяем потоки мощности на остальных участках кольца.

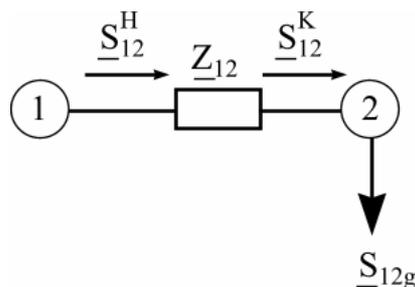
$$S_{23} := S_{12g} - S_2$$

$$S_{23} = -18.388 - 4.961i \text{ МВА}$$

$$S_{32} := S_{13g} - S_3$$

$$S_{32} = 18.388 + 4.961i \text{ МВА}$$

Точка потоко раздела - узел 2. Разрезаем сеть по узлу 2. Рассчитываем разомкнутую сеть 1-2.



Определяем потери мощности на участке 1-2.

$$\Delta S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12g})^2 + \operatorname{Im}(S_{12g})^2}{220^2} \cdot z_{12}$$

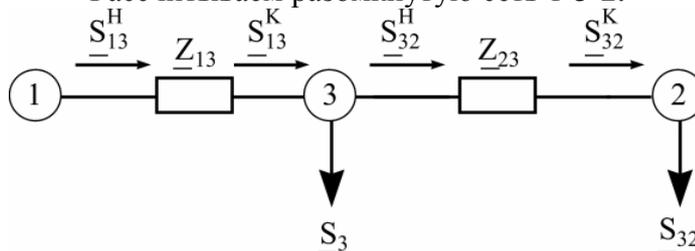
$$\Delta S_{12} = 0.147 + 0.58i \text{ МВА}$$

Мощность в начале участка 1-2:

$$S_{12n} := S_{12g} + \Delta S_{12}$$

$$S_{12n} = 38.759 + 11.594i \text{ МВА}$$

Рассчитываем разомкнутую сеть 1-3-2.



Определяем потери мощности на участке 2-3.

$$\Delta S_{32} := \frac{\operatorname{Re}(S_{32})^2 + \operatorname{Im}(S_{32})^2}{220^2} \cdot z_{23} \quad \Delta S_{32} = 0.018 + 0.057i \quad \text{MBA}$$

Определяем поток мощности в начале участка 2-3

$$S_{32n} := S_{32} + \Delta S_{32} \quad S_{32n} = 18.405 + 5.018i \quad \text{MBA}$$

Определяем поток мощности в конце участка 3-1

$$S_{13k} := S_{32n} + S_3 \quad S_{13k} = 51.405 + 14.182i \quad \text{MBA}$$

Определяем потери мощности на участке 3-1

$$\Delta S_{13} := \frac{\operatorname{Re}(S_{13k})^2 + \operatorname{Im}(S_{13k})^2}{220^2} \cdot z_{13} \quad \Delta S_{13} = 0.154 + 0.609i \quad \text{MBA}$$

Определяем поток мощности в начале участка 3-1

$$S_{13n} := S_{13k} + \Delta S_{13} \quad S_{13n} = 51.559 + 14.791i \quad \text{MBA}$$

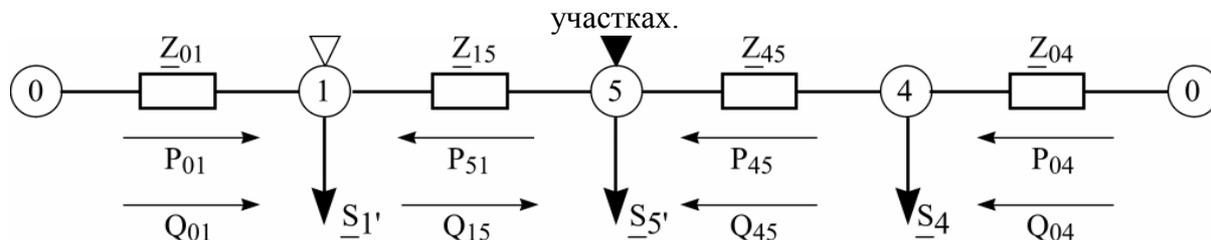
Находим суммарную нагрузку первого узла

$$S_{1'} := 18 + j \cdot 6 + S_{12n} + S_{13n} - j \cdot (Q_{c01} + Q_{c12} + Q_{c13} + Q_{c15})$$

$$S_{1'} = 108.319 + 21.554i \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем кольцо 0-1-5-4-0.

Разрезаем кольцо по источнику питания и определяем потоки мощности на головных участках.



$$S_{01g} := \frac{S_{1'} \cdot (\overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}) + S_{5'} \cdot (\overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}) + S_4 \cdot (\overline{z_{04}})}{z_{01} + z_{15} + z_{45} + z_{04}}$$

$$S_{01g} = 90.939 + 24.701i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04g} := \frac{S_4 \cdot (\overline{z_{45}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{01}}) + S_{5'} \cdot (\overline{z_{15}} + \overline{z_{01}}) + S_{1'} \cdot (\overline{z_{01}})}{z_{01} + z_{15} + z_{45} + z_{04}}$$

$$S_{04g} = 100.445 + 23.466i \quad \text{MBA}$$

Определяем потоки мощности на остальных участках кольца

$$S_{15} := S_{01g} - S_{1'} \quad S_{15} = -17.379 + 3.147i \quad \text{MBA}$$

$$S_{45} := S_{04g} - S_4 \quad S_{45} = 85.445 + 22.816i \quad \text{MBA}$$

$$S_{51} := S_{45} - S_{5'} \quad S_{51} = 17.379 - 3.147i \quad \text{MBA}$$

В сети имеются две точки потокораздела: по активной мощности и по реактивной. Разрезаем сеть на две разомкнутые по точкам потокораздела, вырезая участок 1-5.

Находим потери мощности на участке 1-5

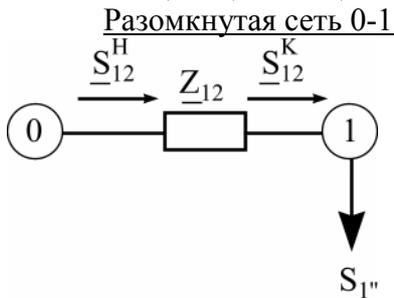
$$\Delta S_{15} := \frac{\operatorname{Re}(S_{15})^2 + \operatorname{Im}(S_{15})^2}{220^2} \cdot z_{15} \quad \Delta S_{15} = 0.02 + 0.065i \quad \text{MBA}$$

Определим нагрузки узлов 1 и 5 при разделении кольцевой сети на две разомкнутые.

$$S_{1''} := \operatorname{Re}(S_{01g}) + j \cdot (\operatorname{Im}(\Delta S_{15}) + \operatorname{Im}(S_{01g}))$$

$$S_{1''} = 90.939 + 24.766i \quad \text{MBA}$$

$$S_{5''} := \operatorname{Re}(S_{45}) + \operatorname{Re}(\Delta S_{15}) + j \cdot \operatorname{Im}(S_{45}) \quad S_{5''} = 85.465 + 22.816i \quad \text{MBA}$$

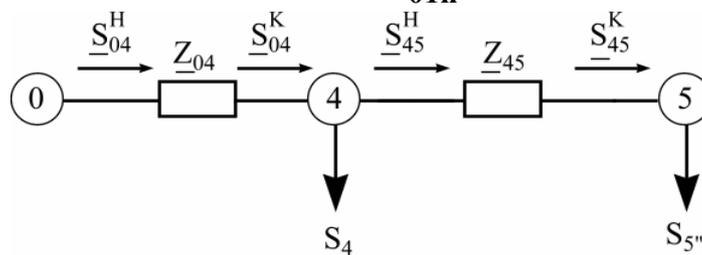


Находим потери мощности на участке 0-1.

$$\Delta S_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{1''})^2 + \operatorname{Im}(S_{1''})^2}{220^2} \cdot z_{01} \quad \Delta S_{01} = 1.002 + 5.218i \quad \text{MBA}$$

Определяем поток мощности в начале участка 0-1.

$$S_{01n} := S_{1''} + \Delta S_{01} \quad S_{01n} = 91.942 + 29.984i \quad \text{MBA}$$



Находим потоки мощности на участке 0-5.

$$\Delta S_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{5''})^2 + \operatorname{Im}(S_{5''})^2}{220^2} \cdot z_{45} \quad \Delta S_{45} = 0.764 + 3.014i \quad \text{MBA}$$

$$S_{45n} := S_{5''} + \Delta S_{45} \quad S_{45n} = 86.229 + 25.831i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04k} := S_{45n} + S_4 \quad S_{04k} = 101.229 + 26.481i \quad \text{MBA}$$

$$\Delta S_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k})^2 + \operatorname{Im}(S_{04k})^2}{220^2} \cdot z_{04} \quad \Delta S_{04} = 0.353 + 1.838i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04n} := S_{04k} + \Delta S_{04} \quad S_{04n} = 101.582 + 28.318i \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы кольца 0-1-5-4-0 по известному напряжению источника питания.

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{U_0} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01})}{U_0} \right)$$

$$U_1 = 236.403 - 10.125i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04}) + \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04}) - \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_4 = 240.395 - 3.227i \quad \text{кВ}$$

$$U_5 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) - \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_5 = 236.614 - 9.357i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_5 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_6 = 235.99 - 9.975i \quad \text{кВ}$$

Сравним напряжения в первом узле, полученные с двух сторон.

$$U_{1'} := U_5 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{51}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{51}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{51}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) - \operatorname{Im}(S_{51}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_{1'} = 236.489 - 10.138i \quad \text{кВ}$$

$$\frac{|U_1| - |U_{1'}|}{|U_1|} \cdot 100 = -0.036 \quad \%$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы кольца 1-2-3-1.

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 234.717 - 12.69i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{13}) + \operatorname{Im}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{13})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{13}) - \operatorname{Im}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{13})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_3 = 235.095 - 12.164i \quad \text{кВ}$$

$$U_{2'} := U_3 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_3}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_3}} \right)$$

$$U_{2'} = 234.722 - 12.69i \quad \text{кВ}$$

$$\varepsilon := \frac{U_{2'} - U_2}{U_{2'}} \cdot 100 \quad \quad \quad |\varepsilon| = 2.441 \cdot 10^{-3} \quad \%$$

Напряжения в узле 2, рассчитанные с двух сторон, совпали, что свидетельствует о правильности расчета. Сравним полученные значения напряжения узла 2 с номинальным и определим погрешность расчета.

$$\varepsilon := \frac{|U_2| - 220}{|U_2|} \cdot 100 \quad \quad \quad \varepsilon = 6.407 \quad \%$$

Необходима вторая итерация. Принимаем в узлах значения напряжений, рассчитанные на первой итерации, для определения потоков мощности и полностью повторяем приведенный алгоритм.

Практическое занятие № 6.

«Расчет режимов в сетях с двухсторонним питанием».

Цель: освоить методы расчета режимов в сетях с двухсторонним питанием.

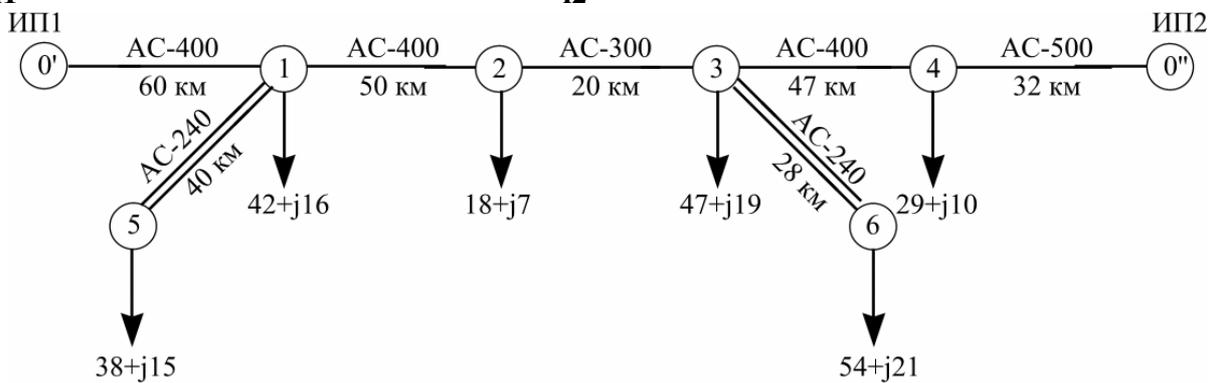
Примеры решения типовых задач.

Листинг примеров решения задач в программе MathCad фирмы MathSoft Пример 6.1.

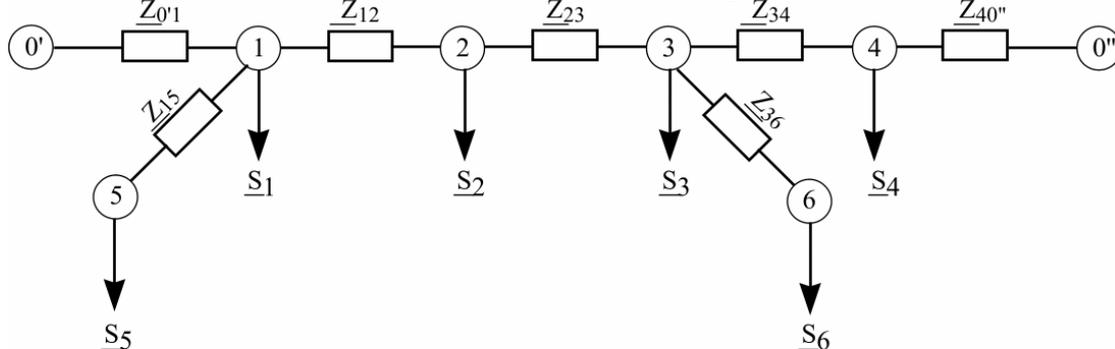
Рассчитать установившийся режим в сети, схема которой приведена на рисунке. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжения источников питания: первого $236 \cdot e^{j \cdot 18}$ кВ, второго $240 \cdot e^{j \cdot 20}$ кВ.

$$U_{i1} := 236 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 18} \text{ кВ}$$

$$U_{i2} := 240 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 20} \text{ кВ}$$



Составляем схему замещения, в которой показаны расчетные нагрузки узлов.



Находим параметры схемы замещения.

Сопротивления участков сети определим по погонным параметрам /1/:

$$z_{0'1} := 0.075 \cdot 60 + j \cdot 0.42 \cdot 60$$

$$z_{0'1} = 4.5 + 25.2i \text{ Ом}$$

$$z_{12} := 0.075 \cdot 50 + j \cdot 0.42 \cdot 50$$

$$z_{12} = 3.75 + 21i \text{ Ом}$$

$$z_{23} := 0.098 \cdot 20 + j \cdot 0.429 \cdot 20$$

$$z_{23} = 1.96 + 8.58i \text{ Ом}$$

$$z_{34} := 0.075 \cdot 47 + j \cdot 0.42 \cdot 47$$

$$z_{34} = 3.525 + 19.74i \text{ Ом}$$

$$z_{15} := \frac{1}{2} \cdot (0.121 \cdot 40 + j \cdot 0.406 \cdot 40)$$

$$z_{15} = 2.42 + 8.12i \text{ Ом}$$

$$z_{36} := \frac{1}{2} \cdot (0.121 \cdot 28 + j \cdot 0.409 \cdot 28)$$

$$z_{36} = 1.694 + 5.726i \text{ Ом}$$

$$z_{40''} := 0.06 \cdot 32 + j \cdot 0.413 \cdot 32$$

$$z_{40''} = 1.92 + 13.216i \text{ Ом}$$

Емкостные проводимости участков сети также определим по справочным данным /1/.

$$\begin{aligned}
b_{o0'1} &:= 2.7 \cdot 10^{-6} \text{См} & b_{o12} &:= 2.7 \cdot 10^{-6} \text{См} & b_{o23} &:= 2.64 \cdot 10^{-6} \text{См} \\
b_{o34} &:= 2.7 \cdot 10^{-6} \text{См} & b_{o15} &:= 2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \text{См} & b_{o36} &:= 2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \text{См} \\
b_{o40''} &:= 2.74 \cdot 10^{-6} \text{См}
\end{aligned}$$

Находим зарядные мощности, принимая напряжения в узлах равными номинальному.

$$\begin{aligned}
Q_{c0'1} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o0'1} \cdot 60}{2} & Q_{c0'1} &= 3.92 \text{ Мвар} \\
Q_{c12} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 50}{2} & Q_{c12} &= 3.267 \text{ Мвар} \\
Q_{c23} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 20}{2} & Q_{c23} &= 1.278 \text{ Мвар} \\
Q_{c34} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o34} \cdot 47}{2} & Q_{c34} &= 3.071 \text{ Мвар} \\
Q_{c36} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o36} \cdot 28}{2} & Q_{c36} &= 3.524 \text{ Мвар} \\
Q_{c15} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 40}{2} & Q_{c15} &= 5.034 \text{ Мвар} \\
Q_{c40''} &:= \frac{220^2 \cdot b_{o40''} \cdot 32}{2} & Q_{c40''} &= 2.122 \text{ Мвар}
\end{aligned}$$

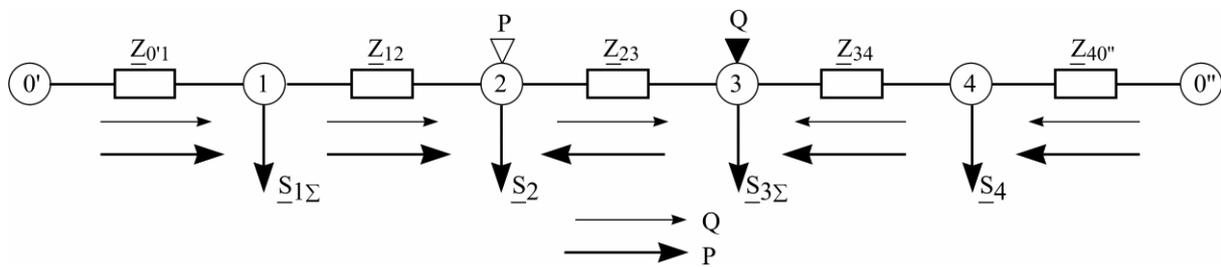
Находим расчетные мощности нагрузок узлов.

$$\begin{aligned}
S_1 &:= 42 + j \cdot 16 - j \cdot Q_{c0'1} - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c15} & S_1 &= 42 + 3.779i \text{ МВА} \\
S_2 &:= 18 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} & S_2 &= 18 + 2.455i \text{ МВА} \\
S_3 &:= 47 + j \cdot 19 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c36} & S_3 &= 47 + 11.128i \text{ МВА} \\
S_4 &:= 29 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c40''} & S_4 &= 29 + 4.807i \text{ МВА} \\
S_5 &:= 38 + j \cdot 15 - j \cdot Q_{c15} & S_5 &= 38 + 9.966i \text{ МВА} \\
S_6 &:= 54 + j \cdot 21 - j \cdot Q_{c36} & S_6 &= 54 + 17.476i \text{ МВА}
\end{aligned}$$

Определяем потери мощности на участках 1-5 и 3-6 и находим суммарную нагрузку первого и третьего узлов сети.

$$\begin{aligned}
\delta S_{15} &:= \frac{(\operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_5))^2}{220^2} \cdot (z_{15}) & \delta S_{15} &= 0.077 + 0.259i \text{ МВА} \\
S_{1\Sigma} &:= S_1 + S_5 + \delta S_{15} & S_{1\Sigma} &= 80.077 + 14.004i \text{ МВА} \\
\delta S_{36} &:= \frac{(\operatorname{Re}(S_6))^2 + (\operatorname{Im}(S_6))^2}{220^2} \cdot (z_{36}) & \delta S_{36} &= 0.113 + 0.381i \text{ МВА} \\
S_{3\Sigma} &:= S_3 + S_6 + \delta S_{36} & S_{3\Sigma} &= 101.113 + 28.985i \text{ МВА}
\end{aligned}$$

Схема замещения примет вид:



Находим потоки мощности на головных участках, определив предварительно суммарные сопротивления участков сети.

$$z_{0'0''} := z_{0'1} + z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{40'} := z_{34} + z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \quad z_{10''} := z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{30'} := z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \quad z_{20''} := z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{20'} := z_{12} + z_{0'1} \quad z_{30''} := z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{10'} := z_{0'1} \quad z_{40''} := z_{40''}$$

$$S_{0'1} := \frac{\overline{S_{1\Sigma}} \cdot \overline{z_{10''}} + \overline{S_2} \cdot \overline{z_{20''}} + \overline{S_{3\Sigma}} \cdot \overline{z_{30''}} + \overline{S_4} \cdot \overline{z_{40''}}}{\overline{z_{0'0''}}}$$

$$S_{0''1} = 107.998 + 22.096i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4} := \frac{\overline{S_4} \cdot \overline{z_{40'}} + \overline{S_{3\Sigma}} \cdot \overline{z_{30'}} + \overline{S_2} \cdot \overline{z_{20'}} + \overline{S_{1\Sigma}} \cdot \overline{z_{10'}}}{\overline{z_{0'0''}}}$$

$$S_{0'4} = 120.192 + 28.156i \quad \text{MBA}$$

Находим уравнительную мощность, протекающую в сети из-за неравенства напряжений источников питания.

$$S_{ur} := \frac{\overline{U_{i2}} - \overline{U_{i1}}}{\overline{z_{0'0''}}} \cdot 220$$

$$S_{ur} = 22.719 - 1.354i \quad \text{MBA}$$

Определяем фактическую мощность на головных участках сети.

$$S_{0'1f} := S_{0'1} - S_{ur} \quad S_{0''1f} = 85.279 + 23.449i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} + S_{ur} \quad S_{0'4f} = 142.911 + 26.803i \quad \text{MBA}$$

Ищем точку потокораздела.

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1\Sigma} \quad S_{12} = 5.202 + 9.445i \quad \text{MBA}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_2 \quad S_{23} = -12.798 + 6.99i \quad \text{MBA}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3\Sigma} \quad S_{34} = -113.911 - 21.995i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_4 \quad S_{43} = 113.911 + 21.995i \quad \text{MBA}$$

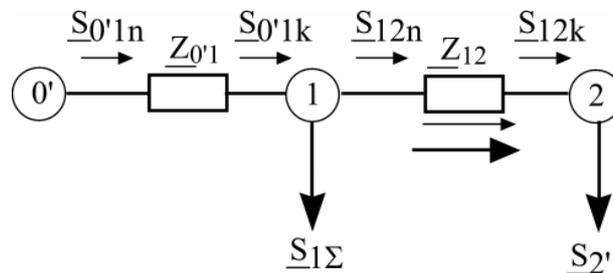
$$S_{32} := S_{43} - S_{3\Sigma} \quad S_{32} = 12.798 - 6.99i \quad \text{MBA}$$

В схеме сети две точки потокораздела: по активной мощности узел 2, по реактивной - узел 3.

Определим потери мощности на участке сети между точками потокораздела.

$$\delta S_{23} := \frac{(\text{Re}(S_{23}))^2 + (\text{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot (z_{23}) \quad \delta S_{23} = 8.612 \cdot 10^{-3} + 0.038i \quad \text{MBA}$$

Разрезаем сеть по точкам потокораздела и определяем нагрузку в конце последнего участка каждой разомкнутой сети.



$$S_{2'} := \text{Re}(S_{12}) + j \cdot (\text{Im}(S_{12}) + \text{Im}(\delta S_{23})) \quad S_{2'} = 5.202 + 9.483i \quad \text{MBA}$$

$$S_{3'} := \text{Re}(S_{43}) + \text{Re}(\delta S_{23}) + j \cdot \text{Im}(S_{43}) \quad S_{3'} = 113.92 + 21.995i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0'-1-2.

$$\delta S_{12} := \frac{(\text{Re}(S_{2'}))^2 + (\text{Im}(S_{2'}))^2}{220^2} \cdot (z_{12}) \quad \delta S_{12} = 9.064 \cdot 10^{-3} + 0.051i \quad \text{MBA}$$

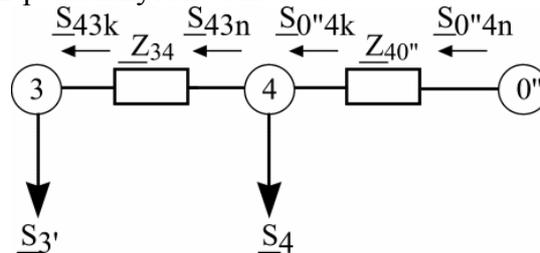
$$S_{12n} := S_{2'} + \delta S_{12} \quad S_{12n} = 5.211 + 9.534i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1k} := S_{12n} + S_{1\Sigma} \quad S_{0'1k} = 85.288 + 23.538i \quad \text{MBA}$$

$$\delta S_{0'1} := \frac{(\text{Re}(S_{0'1k}))^2 + (\text{Im}(S_{0'1k}))^2}{220^2} \cdot (z_{0'1}) \quad \delta S_{0'1} = 0.728 + 4.076i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1n} := S_{0'1k} + \delta S_{0'1} \quad S_{0'1n} = 86.016 + 27.614i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0''-4-3.



$$\delta S_{43} := \frac{(\text{Re}(S_{3'}))^2 + (\text{Im}(S_{3'}))^2}{220^2} \cdot (z_{34}) \quad \delta S_{43} = 0.98 + 5.49i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + \delta S_{43} \quad S_{43n} = 114.9 + 27.486i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_4 \quad S_{0''4k} = 143.9 + 32.293i \quad \text{MBA}$$

$$\delta S_{0''4} := \frac{(\text{Re}(S_{0''4k}))^2 + (\text{Im}(S_{0''4k}))^2}{220^2} \cdot (z_{40''}) \quad \delta S_{0''4} = 0.863 + 5.939i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + \delta S_{0''4} \quad S_{0''4n} = 144.763 + 38.232i \quad \text{MBA}$$

Находим напряжения во всех узлах схемы.

$$U_1 := U_{i1} - \frac{\text{Re}(S_{0'1n}) \cdot \text{Re}(z_{0'1}) + \text{Im}(S_{0'1n}) \cdot \text{Im}(z_{0'1})}{U_{i1}} - j \cdot \frac{\text{Re}(S_{0'1n}) \cdot \text{Im}(z_{0'1}) - \text{Im}(S_{0'1n}) \cdot \text{Re}(z_{0'1})}{U_{i1}}$$

$$U_1 = 222.761 + 63.276i \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 221.935 + 62.71i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''}) + \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''}) - \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$U_4 = 225.081 + 73.766i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$U_3 = 224.135 + 63.808i \quad \text{кВ}$$

$$S_{32n} := S_{32} + \operatorname{Re}(\delta S_{23}) \quad S_{32n} = 12.807 - 6.99i \quad \text{МВА}$$

$$U_{2'} := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_3}}$$

$$U_{2'} = 224.424 + 63.339i \quad \text{кВ}$$

$$\varepsilon := \frac{|U_2| - |U_{2'}|}{|U_2|} \cdot 100 \quad \varepsilon = -1.113 \quad \%$$

Потоки мощности в начале участков 1-5 и 3-6.

$$S_{15n} := S_5 + \delta S_{15} \quad S_{15n} = 38.077 + 10.225i \quad \text{МВА}$$

$$S_{36n} := S_6 + \delta S_{36} \quad S_{36n} = 54.113 + 17.858i \quad \text{МВА}$$

$$U_5 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) - \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_1}}$$

$$U_5 = 213.005 + 94.85i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36}) + \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36}) - \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36})}{\overline{U_3}}$$

$$U_6 = 223.663 + 62.427i \quad \text{кВ}$$

$$\varepsilon := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|} \quad \varepsilon = 0.056 \quad \%$$

$$\varepsilon := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|} \quad \varepsilon = 0.053 \quad \%$$

На этом примере можно рассмотреть, как влияет разница напряжений на источниках питания на результат расчета, в частности на расположение точек потокораздела в схеме. Уменьшим модуль напряжения и угол на источнике 1 и рассчитаем схему заново, оставив неизменными все ее параметры.

$$U_{i1} := 230 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 15} \quad \text{кВ} \quad U_{i2} := 242 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 20} \quad \text{кВ}$$

До нахождения уравнивающей мощности и точек потокораздела расчет будет полностью аналогичен приведенному выше расчету этого примера, поэтому здесь он не приводится.

Находим уравнивающую мощность, протекающую в сети из-за неравенства напряжений источников питания.

$$S_{ur} := \frac{\overline{U_{i2}} - \overline{U_{i1}}}{z_{0'0''}} \cdot 220$$

$$S_{ur} = 58.751 + 2.663i \quad \text{MBA}$$

Определяем фактическую мощность на головных участках сети

$$S_{0'1f} := S_{0'1} - S_{ur}$$

$$S_{0'1f} = 49.247 + 19.433i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} + S_{ur}$$

$$S_{0''4f} = 178.943 + 30.819i \quad \text{MBA}$$

Ищем точку потокораздела

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1\Sigma}$$

$$S_{12} = -30.83 + 5.429i \quad \text{MBA}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_2$$

$$S_{23} = -48.83 + 2.973i \quad \text{MBA}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3\Sigma}$$

$$S_{34} = -149.943 - 26.012i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_4$$

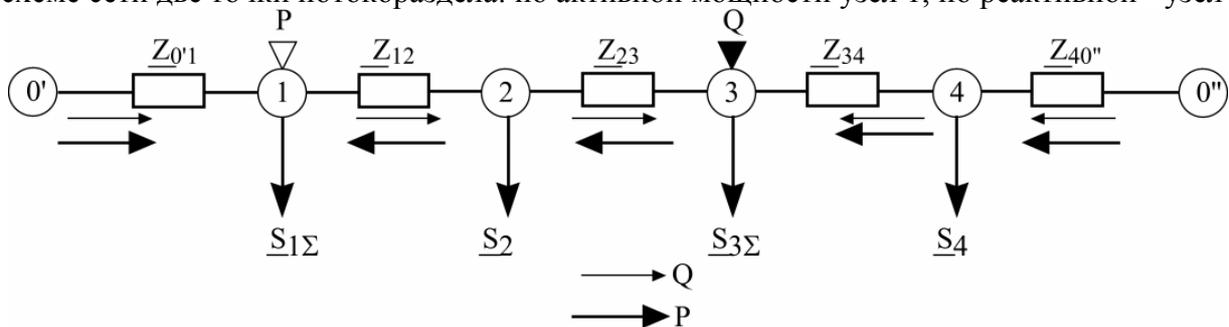
$$S_{43} = 149.943 + 26.012i \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_{3\Sigma}$$

$$S_{32} = 48.83 - 2.973i \quad \text{MBA}$$

Схема замещения в этом случае имеет вид.

В схеме сети две точки потокораздела: по активной мощности узел 1, по реактивной - узел 3.



Определим потери мощности на участках сети между точками потокораздела.

$$\delta S_{12} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{12}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{12}))^2}{220^2} \cdot (z_{12}) \quad \delta S_{12} = 0.076 + 0.425i \quad \text{MBA}$$

$$\delta S_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot (z_{23}) \quad \delta S_{23} = 0.097 + 0.424i \quad \text{MBA}$$

Разрезаем сеть по точкам потокораздела и определяем нагрузку в конце последнего участка каждой разомкнутой сети.

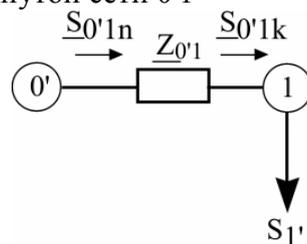
$$S_{1'} := \operatorname{Re}(S_{0'1f}) + j \cdot (\operatorname{Im}(S_{0'1f}) + \operatorname{Im}(\delta S_{12}) + \operatorname{Im}(\delta S_{23}))$$

$$S_{1'} = 49.247 + 20.282i \quad \text{MBA}$$

$$S_{3'} := \operatorname{Re}(S_{43}) + \operatorname{Re}(\delta S_{23}) + \operatorname{Re}(\delta S_{12}) + j \cdot \operatorname{Im}(S_{43})$$

$$S_{3'} = 150.116 + 26.012i \quad \text{MBA}$$

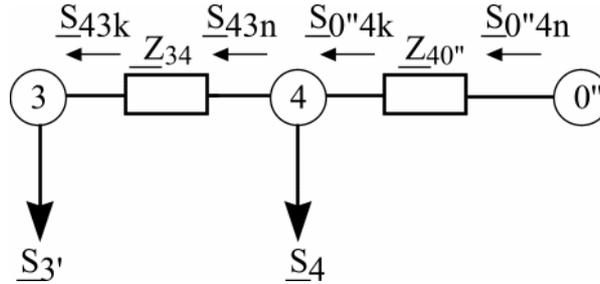
Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0'1



$$\delta S_{0'1} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{1'})^2 + (\operatorname{Im}(S_{1'}))^2)}{220^2} \cdot (z_{0'1}) \quad \delta S_{0'1} = 0.264 + 1.477i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1n} := S_{1'} + \delta S_{0'1} \quad S_{0'1n} = 49.511 + 21.759i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0''-4-3



$$\delta S_{43} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{3'})^2 + (\operatorname{Im}(S_{3'}))^2)}{220^2} \cdot (z_{34}) \quad \delta S_{43} = 1.69 + 9.467i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + \delta S_{43} \quad S_{43n} = 151.806 + 35.479i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_4 \quad S_{0''4k} = 180.806 + 40.286i \quad \text{MBA}$$

$$\delta S_{0''4} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0''4k})^2 + (\operatorname{Im}(S_{0''4k}))^2)}{220^2} \cdot (z_{40''}) \quad \delta S_{0''4} = 1.361 + 9.37i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + \delta S_{0''4} \quad S_{0''4n} = 182.167 + 49.656i \quad \text{MBA}$$

Находим напряжения во всех узлах схемы

$$U_1 := U_{i1} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1}) + \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1}) - \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}}$$

$$U_1 = 220.218 + 53.832i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''}) + \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''}) - \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$U_4 = 226.767 + 72.369i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$U_3 = 225.49 + 59.298i \quad \text{кВ}$$

Уточним потоки мощности на "вырезанных" участках сети 1-2 и 2-3.

$$S_{32n} := S_{32} + \operatorname{Re}(\delta S_{23}) + \operatorname{Re}(\delta S_{12}) \quad S_{32n} = 49.003 - 2.973i \quad \text{MBA}$$

$$S_{12n} := S_{12} + \operatorname{Im}(\delta S_{23}) + \operatorname{Im}(\delta S_{12}) \quad S_{12n} = -29.981 + 5.429i \quad \text{MBA}$$

$$U_{2'} := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_3}}$$

$$U_{2'} = 227.87 + 49.058i \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 219.531 + 56.615i \text{ кВ}$$

$$|U_{2'}| = 233.091 \text{ кВ}$$

$$|U_2| = 226.714 \text{ кВ}$$

$$\left| \frac{U_2 - U_{2'}}{U_2} \cdot 100 \right| = 4.964 \%$$

Т.к. разница между напряжениями не превышает 5%, вторая итерация не нужна.

Потоки мощности в начале участков 1-5 и 3-6

$$S_{15n} := S_5 + \delta S_{15}$$

$$S_{15n} = 38.077 + 10.225i \text{ МВА}$$

$$S_{36n} := S_6 + \delta S_{36}$$

$$S_{36n} = 54.113 + 17.858i \text{ МВА}$$

$$U_5 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_1}} - j \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) - \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_1}}$$

$$U_5 = 211.454 + 86.432i \text{ кВ}$$

$$U_6 := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36}) + \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36})}{\overline{U_3}} - j \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36}) - \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36})}{\overline{U_3}}$$

$$U_6 = 224.991 + 57.927i \text{ кВ}$$

$$\varepsilon := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|}$$

$$\varepsilon = 0.037 \%$$

$$\varepsilon := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|}$$

$$\varepsilon = 0.053 \%$$

Из расчета видно, что при большой разнице напряжений источников питания между точками потокораздела могут находиться несколько участков сети.

Пример 6.2.

Рассчитать установившийся режим в сети с двухсторонним питанием. В узлах показаны приведенные нагрузки в МВА. Напряжение источника питания $0'$ равно $227 \cdot e^{j \cdot 18}$

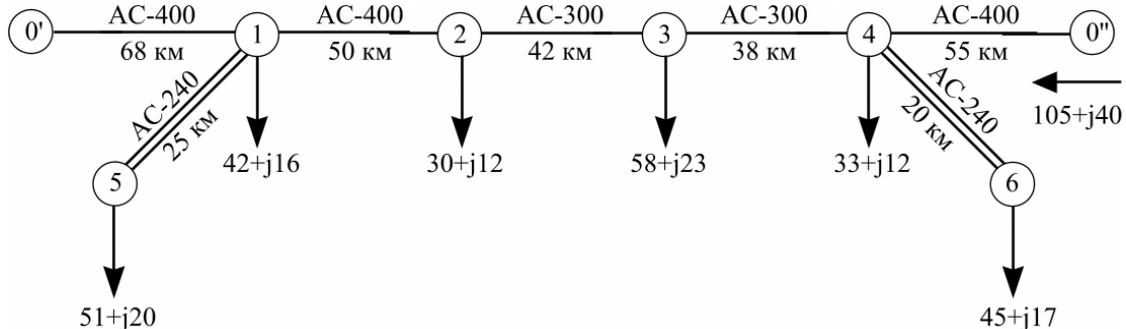
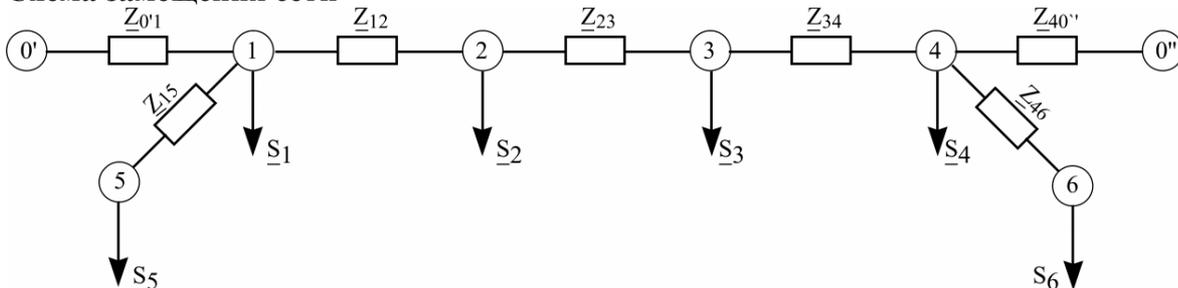


Схема замещения сети



где S_i – расчетные нагрузки узлов.

$$U_{i1} := 227 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 18} \text{ кВ}$$

Находим параметры схемы замещения по справочным данным /14/.

$$z_{0'1} := 0.078 \cdot 68 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 68 \right]$$

$$z_{0'1} = 5.304 + 27.618j \quad \text{Ом}$$

$$z_{12} := 0.078 \cdot 50 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 50 \right]$$

$$z_{12} = 3.9 + 20.308j \quad \text{Ом}$$

$$z_{23} := 0.105 \cdot 42 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 42 \right]$$

$$z_{23} = 4.41 + 17.402j \quad \text{Ом}$$

$$z_{34} := 0.105 \cdot 38 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 38 \right]$$

$$z_{34} = 3.99 + 15.745j \quad \text{Ом}$$

$$z_{15} := \frac{1}{2} \cdot \left[0.13 \cdot 25 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 25 \right] \right]$$

$$z_{15} = 1.625 + 5.278j \quad \text{Ом}$$

$$z_{46} := \frac{1}{2} \cdot \left[0.13 \cdot 20 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 20 \right] \right]$$

$$z_{46} = 1.3 + 4.223j \quad \text{Ом}$$

$$z_{40''} := 0.078 \cdot 55 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 55 \right]$$

$$z_{40''} = 4.29 + 22.338j \quad \text{Ом}$$

$$b_{o0'1} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{o0'1} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o15} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2 \quad b_{o15} = 5.388 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o12} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{o12} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o46} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2 \quad b_{o46} = 5.388 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o23} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{12.2} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{o23} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o40''} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{13.9}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o40''} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o34} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{12.2}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o34} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

Находим зарядные мощности линий.

$$Q_{c0'1} := \frac{220^2 \cdot b_{o0'1} \cdot 68}{2}$$

$$Q_{c0'1} = 4.616 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 50}{2}$$

$$Q_{c12} = 3.394 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 42}{2}$$

$$Q_{c23} = 2.793 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c34} := \frac{220^2 \cdot b_{o34} \cdot 38}{2}$$

$$Q_{c34} = 2.527 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c46} := \frac{220^2 \cdot b_{o46} \cdot 20}{2}$$

$$Q_{c46} = 2.608 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 25}{2}$$

$$Q_{c15} = 3.26 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c40''} := \frac{220^2 \cdot b_{o40''} \cdot 55}{2}$$

$$Q_{c40''} = 3.734 \quad \text{Мвар}$$

Находим расчетные мощности нагрузок узлов.

$$S_1 := 42 + j \cdot 16 - j \cdot Q_{c0'1} - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c15}$$

$$S_1 = 42 + 4.73j \quad \text{МВА}$$

$$S_2 := 30 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23}$$

$$S_2 = 30 + 5.813j \quad \text{МВА}$$

$$S_3 := 58 + j \cdot 23 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34}$$

$$S_3 = 58 + 17.681j \quad \text{МВА}$$

$$S_4 := 33 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c40''} - j \cdot Q_{c46}$$

$$S_4 = 33 + 3.132j \quad \text{МВА}$$

$$S_5 := 51 + j \cdot 20 - j \cdot Q_{c15}$$

$$S_5 = 51 + 16.74j \quad \text{МВА}$$

$$S_6 := 45 + j \cdot 17 - j \cdot Q_{c46}$$

$$S_6 = 45 + 14.392j \quad \text{МВА}$$

Находим суммарные мощности в первом и четвертом узлах.

Потери мощности на участке 1-5.

$$\delta P_{15} := \frac{(\operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_5))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{15})$$

$$\delta P_{15} = 0.097 \quad \text{МВт}$$

$$\delta Q_{15} := \frac{(\operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_5))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{15})$$

$$\delta Q_{15} = 0.314 \quad \text{Мвар}$$

Суммарная мощность узла 1.

$$S_{1\Sigma} := S_1 + S_5 + \delta P_{15} + j \cdot \delta Q_{15}$$

$$S_{1\Sigma} = 93.097 + 21.784j \text{ МВА}$$

Потери

мощности на участке 4-6.

$$\delta P_{46} := \frac{(\operatorname{Re}(S_6))^2 + (\operatorname{Im}(S_6))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{46})$$

$$\delta P_{46} = 0.06 \text{ МВт}$$

$$\delta Q_{46} := \frac{(\operatorname{Re}(S_6))^2 + (\operatorname{Im}(S_6))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{46})$$

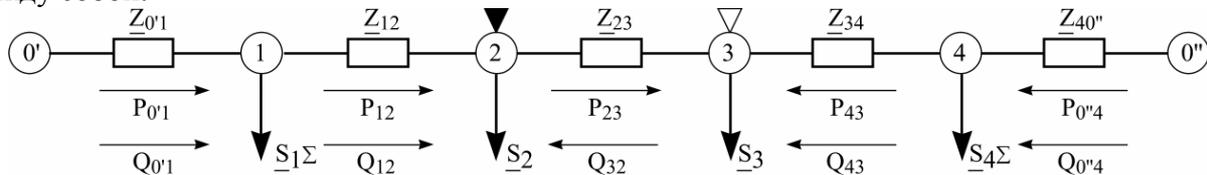
$$\delta Q_{46} = 0.195 \text{ Мвар}$$

Суммарная мощность узла 4.

$$S_{4\Sigma} := S_4 + S_6 + \delta P_{46} + j \cdot \delta Q_{46}$$

$$S_{4\Sigma} = 78.06 + 17.719j \text{ МВА}$$

Находим мощности на головных участках, считая напряжения источников питания равными между собой.



$$z_{0'0''} := z_{0'1} + z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{40'} := z_{34} + z_{23} + z_{12} + z_{0'1}$$

$$z_{10''} := z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{30'} := z_{23} + z_{12} + z_{0'1}$$

$$z_{20''} := z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{20'} := z_{12} + z_{0'1}$$

$$z_{30''} := z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{10'} := z_{0'1}$$

$$z_{40''} := z_{40''}$$

$$S_{0'1} := \frac{S_{1\Sigma} \cdot z_{10''} + S_2 \cdot z_{20''} + S_3 \cdot z_{30''} + S_{4\Sigma} \cdot z_{40''}}{z_{0'0''}}$$

$$S_{0'1} = 122.54 + 29.979j \text{ МВА}$$

$$S_{0''4} := \frac{S_{4\Sigma} \cdot z_{40'} + S_3 \cdot z_{30'} + S_2 \cdot z_{20'} + S_{1\Sigma} \cdot z_{10'}}{z_{0'0''}}$$

$$S_{0''4} = 136.617 + 33.017j \text{ МВА}$$

Находим напряжение на втором источнике питания.

Определим уравнительную мощность.

$$S_{ur} := S_{0''4} - (105 + j \cdot 40)$$

$$S_{ur} = 31.617 - 6.983j \text{ МВА}$$

Из выражения (128) находим напряжение второго источника питания.

$$U_{i2} := \frac{-1}{220} \cdot \left(S_{ur} - \frac{220}{z_{0'0''}} \cdot U_{i1} \right) \cdot z_{0'0''}$$

$$U_{i2} = 216.026 - 54.59j \text{ кВ}$$

$$|U_{i2}| = 222.816 \text{ кВ}$$

Находим фактические мощности на головных участках.

$$S_{0'1f} := S_{0'1} + S_{ur}$$

$$S_{0'1f} = 154.157 + 22.996j \text{ МВА}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} - S_{ur}$$

$$S_{0''4f} = 105 + 40j \text{ МВА}$$

Находим точки потоко раздела.

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1\Sigma}$$

$$S_{12} = 61.06 + 1.212j \quad \text{MBA}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_2$$

$$S_{23} = 31.06 - 4.601j \quad \text{MBA}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_3$$

$$S_{34} = -26.94 - 22.281j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_{4\Sigma}$$

$$S_{43} = 26.94 + 22.281j \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_3$$

$$S_{32} = -31.06 + 4.601j \quad \text{MBA}$$

Точки потокораздела: по активной мощности - узел 3, по реактивной мощности - узел 2. Разрезаем сеть с двухсторонним питанием по точкам потокораздела 2 и 3.

Потери мощности на участке 2-3

$$\delta P_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{23})$$

$$\delta P_{23} = 0.09 \quad \text{МВт}$$

$$\delta Q_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{23})$$

$$\delta Q_{23} = 0.354 \quad \text{Мвар}$$

Нагрузки конечных узлов разомкнутых сетей: 0'-1-2 и 0''-4-3.

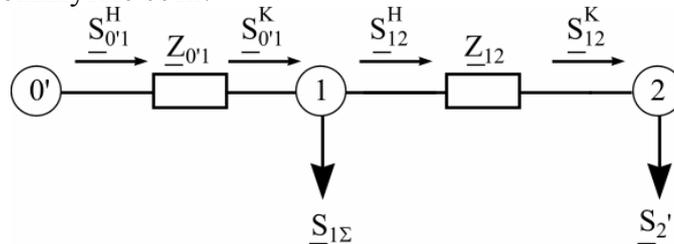
$$S_{3'} := \operatorname{Re}(S_{43}) + j \cdot (\operatorname{Im}(S_{43}) + \delta Q_{23})$$

$$S_{3'} = 26.94 + 22.636j \quad \text{MBA}$$

$$S_{2'} := \operatorname{Re}(S_{12}) + \delta P_{23} + j \cdot \operatorname{Im}(S_{12})$$

$$S_{2'} = 61.15 + 1.212j \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем две разомкнутые сети.



Находим потоки мощности на всех участках схемы сети 0'-1-2.

$$\delta S_{12} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{2'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{2'}))^2}{220^2} \cdot (z_{12})$$

$$\delta S_{12} = 0.301 + 1.57j \quad \text{MBA}$$

$$S_{12n} := S_{2'} + \delta S_{12}$$

$$S_{12n} = 61.451 + 2.782j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1k} := S_{12n} + S_{1\Sigma}$$

$$S_{0'1k} = 154.548 + 24.566j \quad \text{MBA}$$

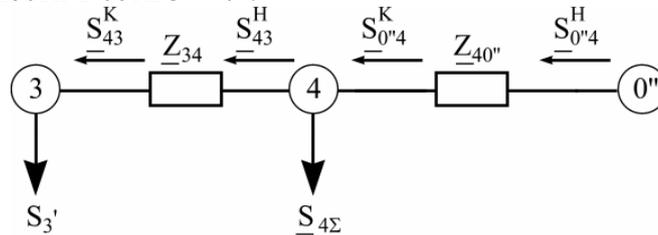
$$\delta S_{0'1} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0'1k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0'1k}))^2}{220^2} \cdot (z_{0'1})$$

$$\delta S_{0'1} = 2.684 + 13.974j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1n} := S_{0'1k} + \delta S_{0'1}$$

$$S_{0'1n} = 157.232 + 38.54j \quad \text{MBA}$$

Находим потоки мощности в сети 3-4-0''.



$$\delta S_{43} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{3'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{3'}))^2}{220^2} \cdot (z_{34}) \quad \delta S_{43} = 0.102 + 0.403j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + \delta S_{43} \quad S_{43n} = 27.042 + 23.039j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_{4\Sigma} \quad S_{0''4k} = 105.102 + 40.757j \quad \text{MBA}$$

$$\delta S_{0''4} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0''4k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0''4k}))^2}{220^2} \cdot (z_{40''}) \quad \delta S_{0''4} = 1.126 + 5.865j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + \delta S_{0''4} \quad S_{0''4n} = 106.228 + 46.622j \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы по известным напряжениям источников питания.

$$U_1 := U_{i1} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1}) + \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1}) - \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}}$$

$$U_1 = 213.569 + 50.226j \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 213.546 + 44.428j \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''}) + \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''}) - \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$U_4 = 207.122 - 62.399j \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$U_3 = 204.593 - 63.249j \quad \text{кВ}$$

$$S_{23n} := S_{23} + \delta P_{23} \quad S_{23n} = 31.15 - 4.601j \quad \text{MBA}$$

$$U_{3'} := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}}$$

$$U_{3'} = 213.814 + 41.85j \quad \text{кВ}$$

$$\varepsilon_3 := \frac{|U_3| - |U_{3'}|}{|U_3|} \cdot 100 \quad \varepsilon_3 = -1.739 \quad \%$$

Находим мощность и напряжения в 5 и 6 узлах.

$$S_{15n} := S_{0'1k} - S_1 - S_{12n} \quad S_{15n} = 51.097 + 17.054i \quad \text{MBA}$$

$$S_{46n} := S_{0''4k} - S_4 - S_{34n} \quad S_{46n} = 45.06 + 14.586i \quad \text{MBA}$$

$$U_5 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_1}}$$

$$U_5 = 213.112 + 48.726i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{46}) + \operatorname{Im}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{46})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{46}) + \operatorname{Im}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{46})}{\overline{U_4}}$$

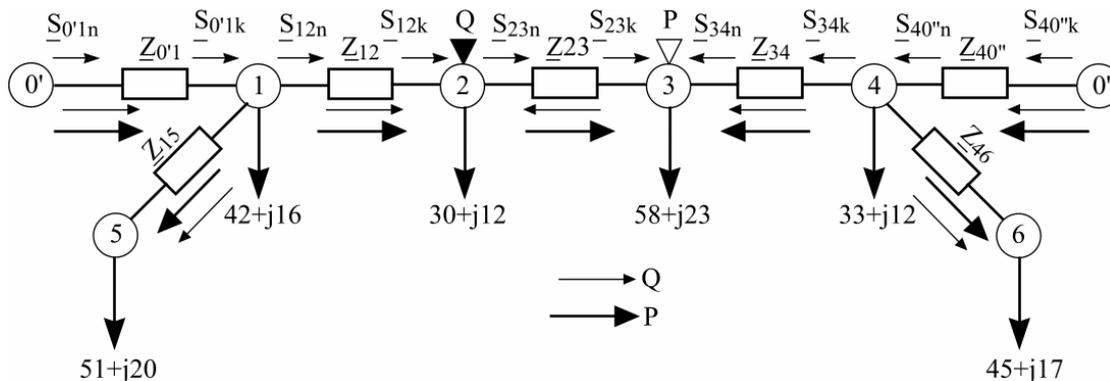
$$U_6 = 206.869 + 61.313i \quad \text{кВ}$$

$$\varepsilon_5 := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|} \cdot 100$$

$$\varepsilon_6 := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|} \cdot 100$$

$$\varepsilon_5 = -0.635 \%$$

$$\varepsilon_6 = -1.963 \%$$



Практическое занятие № 7.

«Выбор ответвлений РПН трансформаторов, автотрансформаторов, линейных регуляторов».

Цель: научиться обеспечивать желаемое напряжение на стороне НН и СН трансформаторов, автотрансформаторов.

Примеры решения типовых задач.

Пример 7.1.

Определить напряжение низкой стороны трансформатора ТРДН-25000/110 двухтрансформаторной подстанции №8, если приведенная нагрузка рассматриваемого узла равна $28,145 + j9,388$ МВА, напряжение на его высокой стороне равно 113,54 кВ.

По справочным данным определяем параметры схемы замещения силового трансформатора: $Z_{tr} = 2,54 + j55,9$ Ом; $S_{h8} = 0,027 + j0,175$ МВА.

Потеря напряжения в трансформаторе:

$$\Delta U_t := \frac{\operatorname{Re}(S_{pr8}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{tr}) + \operatorname{Im}(S_{pr8}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{tr})}{U_8} \quad \Delta U_t = 6.217 \text{ кВ}$$

Напряжение низкой стороны, приведенное к высокой:

$$U_{ННВН} := U_8 - \Delta U_t \quad U_{ННВН} = 107.323 \text{ кВ}$$

Номинальные напряжения высшей и низшей сторон трансформатора:

$$U_{nn} := 10.5 \text{ кВ} \quad U_{vn} := 115 \text{ кВ}$$

Номинальный коэффициент трансформации:

$$k_{vnn} := \frac{U_{vn}}{U_{nn}} \quad k_{vnn} = 11.524$$

Определение желаемого коэффициента трансформации.

$$k_{vnjel} := \frac{U_{ННВН}}{10.1}$$

$$k_{vnjel} = 10.626$$

Желаемый номер отпайки (151):

$$n_{vnjel} := \left(\frac{k_{vnjel}}{k_{vnn}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.0178}$$

$$n_{vnjel} = -4.377$$

округляется до ближайшего стандартного, равного -4.

Фактическое напряжение на шинах НН трансформатора узла 8 (158):

$$U_{vnf} := \frac{U_{ННВН}}{k_{vnn} \cdot (1 - 4 \cdot 0.0178)}$$

$$U_{vnf} = 10.027 \text{ кВ}$$

Практическое занятие № 8.

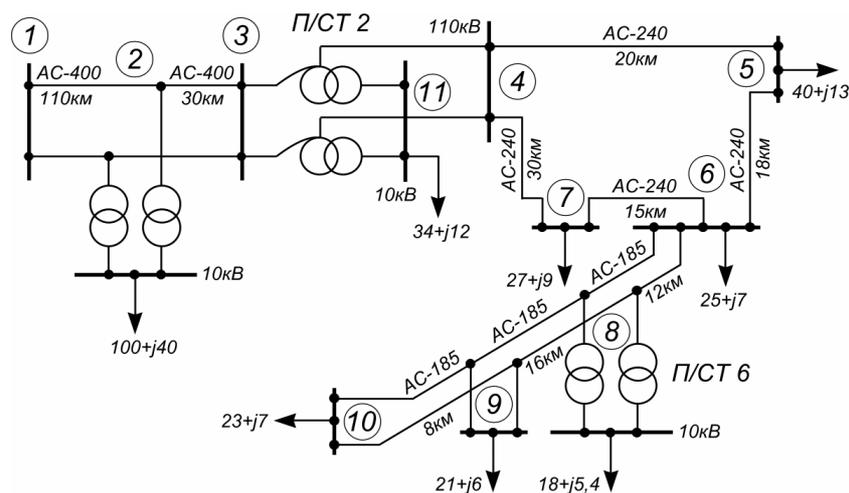
«Расчет режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями».

Цель: освоить методы расчета режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями и поддержания заданного (желаемого) напряжения узла.

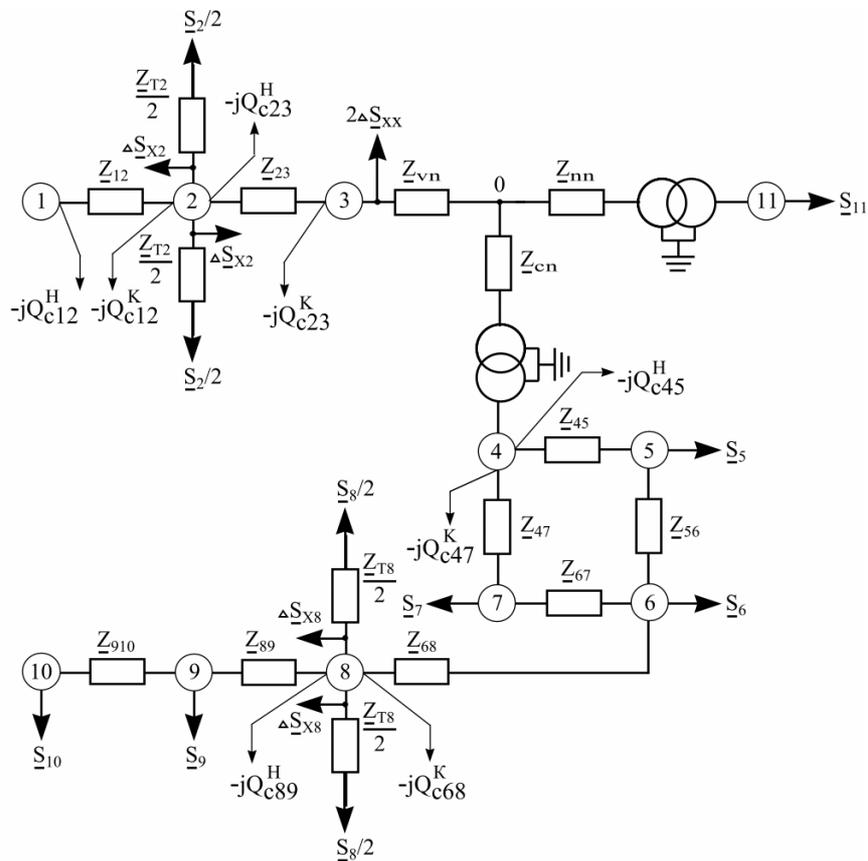
Примеры решения типовых задач.

Пример 8.1.

Рассчитать установившийся режим в сети двух номинальных напряжений, схема которой приведена на рисунке. Выбрать номера ответвлений РПН и линейных регуляторов для поддержания уровней напряжения на шинах подстанции 2 – 118 кВ и 10,5 кВ; подстанции 6 - 10,5кВ. $U_1 := 241$ кВ.



Составляем схему замещения.



Примечание: в узлах 5, 6, 7, 9, 10 показана расчетная мощность нагрузки.
Находим сопротивления и проводимости линий по справочным данным /5/.

$$z_{12} := \frac{0.075 \cdot 110 + j \cdot 0.42 \cdot 110}{2}$$

$$z_{12} = 4.125 + 23.1i \quad \text{Ом}$$

$$z_{23} := \frac{0.075 \cdot 30 + j \cdot 0.42 \cdot 30}{2}$$

$$z_{23} = 1.125 + 6.3i \quad \text{Ом}$$

$$z_{45} := 0.121 \cdot 20 + j \cdot 0.405 \cdot 20$$

$$z_{45} = 2.42 + 8.1i \quad \text{Ом}$$

$$z_{56} := 0.121 \cdot 18 + j \cdot 0.405 \cdot 18$$

$$z_{56} = 2.178 + 7.29i \quad \text{Ом}$$

$$z_{67} := 0.121 \cdot 15 + j \cdot 0.405 \cdot 15$$

$$z_{67} = 1.815 + 6.075i \quad \text{Ом}$$

$$z_{47} := 0.121 \cdot 30 + j \cdot 0.405 \cdot 30$$

$$z_{47} = 3.63 + 12.15i \quad \text{Ом}$$

$$z_{68} := \frac{0.162 \cdot 12 + j \cdot 0.413 \cdot 12}{2}$$

$$z_{68} = 0.972 + 2.478i \quad \text{Ом}$$

$$z_{89} := \frac{0.162 \cdot 16 + j \cdot 0.413 \cdot 16}{2}$$

$$z_{89} = 1.296 + 3.304i \quad \text{Ом}$$

$$z_{910} := \frac{0.162 \cdot 8 + j \cdot 0.413 \cdot 8}{2}$$

$$z_{910} = 0.648 + 1.652i \quad \text{Ом}$$

$$b_{o12} := 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См}$$

$$b_{o23} := 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См}$$

$$b_{o45} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$b_{o56} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$b_{o67} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$b_{o47} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$b_{o68} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См}$$

$$b_{o89} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См}$$

$$b_{o910} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См}$$

Находим зарядные мощности.

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 110}{2}$$

$$Q_{c12} = 14.375 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 30}{2}$$

$$Q_{c23} = 3.92 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c45} := \frac{110^2 \cdot b_{o45} \cdot 20}{2}$$

$$Q_{c45} = 0.34 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c56} := \frac{110^2 \cdot b_{o56} \cdot 18}{2}$$

$$Q_{c56} = 0.306 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c67} := \frac{110^2 \cdot b_{o67} \cdot 15}{2}$$

$$Q_{c67} = 0.255 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c47} := \frac{110^2 \cdot b_{o47} \cdot 30}{2}$$

$$Q_{c47} = 0.51 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c68} := \frac{110^2 \cdot b_{o68} \cdot 12}{2}$$

$$Q_{c68} = 0.399 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c89} := \frac{110^2 \cdot b_{o89} \cdot 16}{2}$$

$$Q_{c89} = 0.532 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c910} := \frac{110^2 \cdot b_{o910} \cdot 8}{2}$$

$$Q_{c910} = 0.266 \quad \text{Мвар}$$

Определяем расчетную мощность трансформаторов подстанции узла 8.

$$S_{trash8} := \frac{\sqrt{18^2 + 5.4^2}}{2 \cdot 0.7}$$

$$S_{trash8} = 13.423 \quad \text{МВА.}$$

Выбираем трансформатор типа ТДН-16000/110, справочные данные которого приведены в /2/.

Определяем потери мощности в трансформаторе.

$$\Delta P_{tr8} := \frac{\left(\frac{18}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4}{2}\right)^2}{110^2} \cdot 4.38 + 0.019$$

$$\Delta P_{tr8} = 0.051 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{tr8} := \frac{\left(\frac{18}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4}{2}\right)^2}{110^2} \cdot 86.7 + 0.112$$

$$\Delta Q_{tr8} = 0.745 \quad \text{Мвар}$$

Рассчитаем приведенную нагрузку узла 8.

$$S_{pr8} := 18 + j \cdot 5.4 + 2 \cdot (\Delta P_{tr8} + j \cdot \Delta Q_{tr8})$$

$$S_{pr8} = 18.102 + 6.889j \quad \text{МВА}$$

Определяем расчетную мощность трансформаторов подстанции узла 2.

$$S_{trash2} := \frac{\sqrt{100^2 + 40^2}}{2 \cdot 0.7}$$

$$S_{trash2} = 76.931 \quad \text{МВА.}$$

В узле 2 ставим трансформатор ТДЦ-80000/220. Справочные данные по нему принимаем по /2/.

$$\Delta P_{tr2} := \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 + \left(\frac{40}{2}\right)^2}{220^2} \cdot 2.64 + 0.105 \quad \Delta P_{tr2} = 0.263 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{tr2} := \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 + \left(\frac{40}{2}\right)^2}{220^2} \cdot 72.8 + 0.480 \quad \Delta Q_{tr2} = 4.842 \quad \text{Мвар}$$

Определим приведенную нагрузку 2 узла.

$$S_{pr2} := 100 + j \cdot 40 + (\Delta P_{tr2} + j \cdot \Delta Q_{tr2}) \cdot 2 \quad S_{pr2} = 100.526 + 49.684i \quad \text{MBA}$$

Расчетные нагрузки узлов:

$$S_2 := S_{pr2} - j \cdot (Q_{c12} + Q_{c23}) \quad S_2 = 100.526 + 31.389i \quad \text{MBA}$$

$$S_5 := 40 + j \cdot 13 - j \cdot (Q_{c56} + Q_{c45}) \quad S_5 = 40 + 12.354i \quad \text{MBA}$$

$$S_6 := 25 + j \cdot 7 - j \cdot (Q_{c56} + Q_{c67} + Q_{c68}) \quad S_6 = 25 + 6.04i \quad \text{MBA}$$

$$S_7 := 27 + j \cdot 9 - j \cdot (Q_{c47} + Q_{c67}) \quad S_7 = 27 + 8.235i \quad \text{MBA}$$

$$S_8 := S_{pr8} - j \cdot (Q_{c68} + Q_{c89}) \quad S_8 = 18.102 + 5.958i \quad \text{MBA}$$

$$S_9 := 21 + j \cdot 6 - j \cdot (Q_{c89} + Q_{c910}) \quad S_9 = 21 + 5.201i \quad \text{MBA}$$

$$S_{10} := 23 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{c910} \quad S_{10} = 23 + 6.734i \quad \text{MBA}$$

Находим потоки мощности в разомкнутой сети 6-8-9-10.

$$\Delta S_{910} := \frac{\text{Re}(S_{10})^2 + \text{Im}(S_{10})^2}{110^2} \cdot z_{910} \quad \Delta S_{910} = 0.031 + 0.078i \quad \text{MBA}$$

$$S_{910n} := S_{10} + \Delta S_{910} \quad S_{910n} = 23.031 + 6.812i \quad \text{MBA}$$

$$S_{89k} := S_{910n} + S_9 \quad S_{89k} = 44.031 + 12.014i \quad \text{MBA}$$

$$\Delta S_{89} := \frac{\text{Re}(S_{89k})^2 + \text{Im}(S_{89k})^2}{110^2} \cdot z_{89} \quad \Delta S_{89} = 0.223 + 0.569i \quad \text{MBA}$$

$$S_{89n} := S_{89k} + \Delta S_{89} \quad S_{89n} = 44.254 + 12.582i \quad \text{MBA}$$

$$S_{68k} := S_{89n} + S_8 \quad S_{68k} = 62.356 + 18.54i \quad \text{MBA}$$

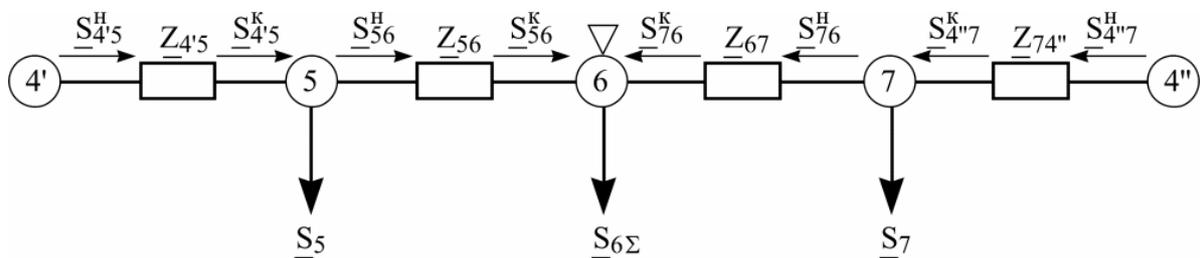
$$\Delta S_{68} := \frac{\text{Re}(S_{68k})^2 + \text{Im}(S_{68k})^2}{110^2} \cdot z_{68} \quad \Delta S_{68} = 0.34 + 0.867i \quad \text{MBA}$$

$$S_{68n} := S_{68k} + \Delta S_{68} \quad S_{68n} = 62.696 + 19.407i \quad \text{MBA}$$

Суммарная нагрузка узла 6.

$$S_{6\Sigma} := S_{68n} + S_6 \quad S_{6\Sigma} = 87.696 + 25.446i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце 4'-5-6-7-4".



Находим потоки мощности на головных участках.

Определим сопротивления всех участков схемы для расчета потоков мощности на головных участках:

$$\begin{aligned} z_{74''} &:= z_{47} & z_{54'} &:= z_{45} \\ z_{64''} &:= z_{67} + z_{47} & z_{64'} &:= z_{56} + z_{45} \\ z_{54''} &:= z_{56} + z_{67} + z_{47} & z_{74'} &:= z_{67} + z_{56} + z_{45} \\ z_{4'4''} &:= z_{45} + z_{56} + z_{67} + z_{47} \end{aligned}$$

$$S_{4'5} := \frac{S_5 \cdot z_{54''} + S_{6\Sigma} \cdot z_{64''} + S_7 \cdot z_{74''}}{z_{4'4''}} \quad S_{4'5} = 87.666 + 26.15i \quad \text{MVA}$$

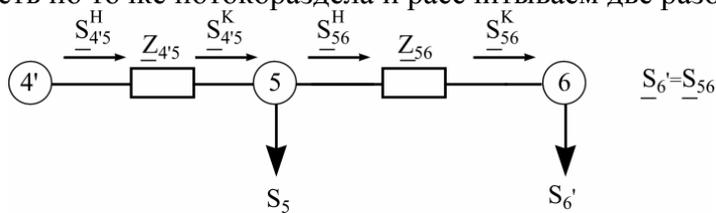
$$S_{4''7} := \frac{S_7 \cdot z_{74'} + S_{6\Sigma} \cdot z_{64'} + S_5 \cdot z_{54'}}{z_{4'4''}} \quad S_{4''7} = 67.029 + 19.885i \quad \text{MVA}$$

Находим точку потокораздела:

$$\begin{aligned} S_{56} &:= S_{4'5} - S_5 & S_{56} &= 47.666 + 13.796i \quad \text{MVA} \\ S_{67} &:= S_{56} - S_{6\Sigma} & S_{67} &= -40.029 - 11.65i \quad \text{MVA} \\ S_{76} &:= S_{4''7} - S_7 & S_{76} &= 40.029 + 11.65i \quad \text{MVA} \end{aligned}$$

Точка потокораздела 6.

Разрезаем сеть по точке потокораздела и рассчитываем две разомкнутые сети.



Сеть 4'-5-6:

$$\Delta S_{56} := \frac{\text{Re}(S_{56})^2 + \text{Im}(S_{56})^2}{110^2} \cdot z_{56} \quad \Delta S_{56} = 0.443 + 1.484i \quad \text{MVA}$$

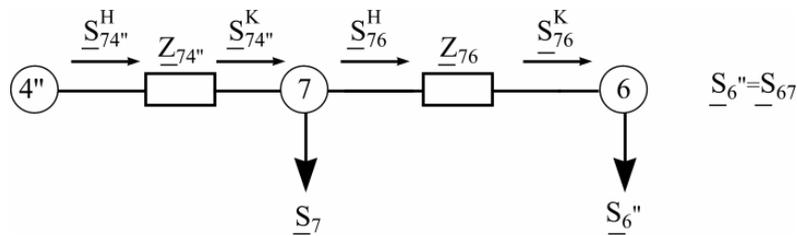
$$S_{56n} := S_{56} + \Delta S_{56} \quad S_{56n} = 48.11 + 15.279i \quad \text{MVA}$$

$$S_{4'5k} := S_{56n} + S_5 \quad S_{4'5k} = 88.11 + 27.633i \quad \text{MVA}$$

$$\Delta S_{4'5} := \frac{\text{Re}(S_{4'5k})^2 + \text{Im}(S_{4'5k})^2}{110^2} \cdot z_{45} \quad \Delta S_{4'5} = 1.705 + 5.708i \quad \text{MVA}$$

$$S_{4'5n} := S_{4'5k} + \Delta S_{4'5} \quad S_{4'5n} = 89.815 + 33.341i \quad \text{MVA}$$

Сеть 4''-7-8



$$\Delta S_{76} := \frac{\operatorname{Re}(S_{76})^2 + \operatorname{Im}(S_{76})^2}{110^2} \cdot z_{67}$$

$$\Delta S_{76} = 0.261 + 0.873i \quad \text{MBA}$$

$$S_{76n} := S_{76} + \Delta S_{76}$$

$$S_{76n} = 40.29 + 12.523i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4''7k} := S_{76n} + S_7$$

$$S_{4''7k} = 67.29 + 20.758i \quad \text{MBA}$$

$$\Delta S_{4''7} := \frac{\operatorname{Re}(S_{4''7k})^2 + \operatorname{Im}(S_{4''7k})^2}{110^2} \cdot z_{47}$$

$$\Delta S_{4''7} = 1.488 + 4.979i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4''7n} := S_{4''7k} + \Delta S_{4''7}$$

$$S_{4''7n} = 68.778 + 25.737i \quad \text{MBA}$$

Суммарная нагрузка узла 4:

$$S_4 := S_{4'5n} + S_{4''7n} - j \cdot (Q_{c45} + Q_{c47})$$

$$S_4 = 158.593 + 58.229i \quad \text{MBA}$$

Суммарная нагрузка автотрансформатора:

$$S'_{\text{rash}} := S_4 + 34 + j \cdot 12$$

$$S'_{\text{rash}} = 192.593 + 70.229i \quad \text{MBA}$$

$$S_{\text{rash}} := \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(S'_{\text{rash}})^2 + \operatorname{Im}(S'_{\text{rash}})^2}}{2 \cdot 0.7}$$

$$S_{\text{rash}} = 146.427 \quad \text{MBA}$$

Выбираем трансформатор АТДЦТН-200000/220/110.

По справочным /4/ данным находим сопротивления обмоток автотрансформатора.

$$z_{nn} := 1.15 + j \cdot 54$$

$$z_{nn} = 1.15 + 54i \quad \text{Ом}$$

$$z_{cn} := \frac{0.2 + j \cdot 0}{2}$$

$$z_{cn} = 0.1 \quad \text{Ом}$$

$$z_{vn} := \frac{0.39 + j \cdot 30.4}{2}$$

$$z_{vn} = 0.195 + 15.2i \quad \text{Ом}$$

Находим потери мощности в обмотках низшего напряжения автотрансформаторов:

$$\Delta S'_{nn} := \frac{\left(\frac{34}{2}\right)^2 + \left(\frac{12}{2}\right)^2}{220^2} \cdot z_{nn}$$

$$\Delta S'_{nn} = 7.722 \cdot 10^{-3} + 0.363i \quad \text{MBA}$$

$$\Delta S_{nn} := 2 \cdot \Delta S'_{nn}$$

$$\Delta S_{nn} = 0.015 + 0.725i \quad \text{MBA}$$

Находим потери мощности в обмотках среднего напряжения автотрансформаторов:

$$\Delta S_{cn} := \frac{\operatorname{Re}(S_4)^2 + \operatorname{Im}(S_4)^2}{220^2} \cdot z_{cn}$$

$$\Delta S_{cn} = 0.059 \quad \text{MBA}$$

Потоки мощности, входящие в обмотки НН и СН:

$$S_{011n} := 34 + j \cdot 12 + \Delta S_{nn}$$

$$S_{011n} = 34.015 + 12.725i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04n} := S_4 + \Delta S_{cn}$$

$$S_{04n} = 158.622 + 58.229i \quad \text{MBA}$$

Поток мощности, выходящий из обмотки ВН:

$$S_{30k} := S_{011n} + S_{04n}$$

$$S_{30k} = 192.638 + 70.954i \text{ MBA}$$

Потери мощности в обмотках ВН:

$$\Delta S_{vn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{30k})^2 + \operatorname{Im}(S_{30k})^2}{220^2} \cdot z_{vn}$$

$$\Delta S_{vn} = 0.17 + 13.239i \text{ MBA}$$

$$\Delta S_{xx} := 2 \cdot (0.125 + j \cdot 1)$$

$$\Delta S_{xx} = 0.25 + 2i \text{ MBA}$$

Находим расчетную нагрузку узла 3:

$$S_{30n} := S_{30k} + \Delta S_{vn}$$

$$S_{30n} = 192.837 + 84.193i \text{ MBA}$$

$$S_3 := S_{30n} + \Delta S_{xx} - j \cdot Q_{c23}$$

$$S_3 = 193.087 + 82.272i \text{ MBA}$$

Находим потоки мощности в разомкнутой сети 1-2-3:

$$\Delta S_{23} := \frac{\operatorname{Re}(S_3)^2 + \operatorname{Im}(S_3)^2}{220^2} \cdot z_{23}$$

$$\Delta S_{23} = 1.024 + 5.734i \text{ MBA}$$

$$S_{23n} := S_3 + \Delta S_{23}$$

$$S_{23n} = 194.111 + 88.006i \text{ MBA}$$

$$S_{12k} := S_{23n} + S_2$$

$$S_{12k} = 294.637 + 119.395i \text{ MBA}$$

$$\Delta S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2}{220^2} \cdot z_{12}$$

$$\Delta S_{12} = 8.614 + 48.236i \text{ MBA}$$

$$S_{12n} := S_{12k} + \Delta S_{12}$$

$$S_{12n} = 303.251 + 167.631i \text{ MBA}$$

Определяем напряжения в узлах сети 220 кВ:

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 219.742 - 26.198i \text{ кВ}$$

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}} \right)$$

$$U_3 = 215.673 - 30.827i \text{ кВ}$$

$$|U_3| = 217.865 \text{ кВ}$$

Рассчитываем падения напряжения в обмотках автотрансформаторов и напряжения средней и низкой сторон, приведенные к высшей стороне.

$$\Delta U_{vn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{vn}) + \operatorname{Im}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{vn})}{\overline{U_3}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{vn}) - \operatorname{Im}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{vn})}{\overline{U_3}}$$

$$\Delta U_{vn} = 7.879 + 12.388i \text{ кВ}$$

$$U_0 := U_3 - \Delta U_{vn}$$

$$U_0 = 207.794 - 43.215i \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{cn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cn}) + \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cn})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cn}) - \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cn})}{\overline{U_0}}$$

$$\Delta U_{cn} = 0.068 - 0.042i \text{ кВ}$$

Напряжение средней стороны, приведенное к высшей стороне

$$U_{CHBH} := U_0 - \Delta U_{cn}$$

$$U_{CHBH} = 207.727 - 43.173i \text{ кВ}$$

$$|U_{CHBH}| = 212.166 \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{nn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{nn}) + \operatorname{Im}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{nn})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{nn}) - \operatorname{Im}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{nn})}{\overline{U_0}}$$

$$\Delta U_{nn} = 5.098 + 7.709i \quad \text{кВ}$$

Напряжение низкой стороны, приведенное к высшей стороне

$$U_{\text{ННВН}} := U_0 - \Delta U_{nn}$$

$$U_{\text{ННВН}} = 202.696 - 50.924i \quad \text{кВ}$$

$$|U_{\text{ННВН}}| = 210.434 \quad \text{кВ}$$

$k_{VCn} := \frac{230}{121}$ - номинальный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на среднюю.

Действительное напряжение на стороне СН:

$$U_{\text{СН}} := \frac{U_{\text{СНВН}}}{k_{VCn}} \quad U_{\text{СН}} = 109.282 - 22.713i \quad \text{кВ} \quad |U_{\text{СН}}| = 111.618 \quad \text{кВ}$$

$k_{VNn} := \frac{230}{11}$ - номинальный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на низшую.

Действительное напряжение на стороне НН:

$$U_{\text{НН}} := \frac{U_{\text{ННВН}}}{k_{VNn}} \quad U_{\text{НН}} = 9.694 - 2.436i \quad \text{кВ} \quad |U_{\text{НН}}| = 9.995 \quad \text{кВ}$$

Так как действительные напряжения обмоток СН и НН не равны желаемым, определим номера ответвлений РПН и линейного регулятора. В автотрансформаторе устройство РПН установлено в нейтрали. Диапазон регулирования равен $\pm 8 \times 1,5$ %. Определяем желаемый номер отпайки РПН для обеспечения напряжения средней стороны, равного 118 кВ. Для чего найдем желаемый коэффициент трансформации по (157).

$$k_{VCjel} := \frac{|U_{\text{СНВН}}|}{118} \quad k_{VCjel} = 1.798$$

Тогда по (178)

$$n_{pjel} := \frac{1 - \frac{k_{VCjel}}{k_{VCn}}}{(k_{VCjel} - 1) \cdot 0.015} \quad n_{pjel} = 4.519$$

Округляем полученный номер отпайки РПН до ближайшего целого

$$n_p := 5$$

Находим напряжение средней стороны автотрансформатора после регулирования напряжения:

$$U_{\text{СНf}} := \frac{U_{\text{СНВН}} \left(\frac{1}{k_{VCn}} + n_p \cdot 0.015 \right)}{1 + n_p \cdot 0.015} \quad |U_{\text{СНf}}| = 118.633 \quad \text{кВ}$$

Т.к. устройство РПН установлено в нейтрали автотрансформатора, то действительное напряжение на шинах НН определяется с учетом изменения $U_{\text{ВН}}$ за счет переключения на другой номер отпайки РПН, т.е.

$$U_{\text{ННf}} := \frac{U_{\text{ННВН}}}{k_{VNn} \cdot (1 + n_p \cdot 0.015)} \quad |U_{\text{ННf}}| = 9.298 \quad \text{кВ.}$$

Выбираем номер ответвления линейного регулятора, установленного со стороны НН автотрансформатора для поддержания требуемого напряжения на шинах НН. Выбираем линейный регулятор по мощности нагрузки обмотки НН автотрансформатора.

$$S_{\text{rashnn}} := \sqrt{34^2 + 12^2} \qquad S_{\text{rashnn}} = 36.056 \text{ МВА}$$

Принимаем к установке линейный регулятор ЛТДН – 40000/10 со следующими данными $S_{\text{ном}}=40$ МВА, $U_{\text{ном}}=11$ кВ с диапазоном регулирования $\pm 10 \times 1,5 \% / 2 /$.

Номер ответвления линейного регулятора рассчитывается по выражению

$$n_{\text{LRjel}} := \left(\frac{10.5 - |U_{\text{HHf}}|}{11} \right) \cdot \frac{1}{0.015} \qquad n_{\text{LRjel}} = 7.285$$

Принимаем стандартное ответвление линейного регулятора $n_{\text{LR}} := 7$

Действительное напряжение на шинах НН найдем по выражению (182).

$$U_{\text{HHd}} := U_{\text{HHf}} + n_{\text{LR}} \cdot 0.015 \cdot U_{\text{HH}} \qquad |U_{\text{HHd}}| = 10.453 \text{ кВ}$$

где U_{HH} – номинальное напряжение линейного регулятора.

Рассчитываем напряжения в узлах сети 110 кВ.

$$U_5 := U_{\text{CHf}} - \left(\frac{\text{Re}(S_{4'5n}) \cdot \text{Re}(z_{45}) + \text{Im}(S_{4'5n}) \cdot \text{Im}(z_{45})}{U_{\text{CHf}}} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{4'5n}) \cdot \text{Im}(z_{45}) - \text{Im}(S_{4'5n}) \cdot \text{Re}(z_{45})}{U_{\text{CHf}}} \right)$$

$$U_5 = 111.018 - 28.643i \text{ кВ} \qquad |U_5| = 114.654 \text{ кВ}$$

$$U_{6'} := U_5 - \left(\frac{\text{Re}(S_{56n}) \cdot \text{Re}(z_{56}) + \text{Im}(S_{56n}) \cdot \text{Im}(z_{56})}{U_5} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{56n}) \cdot \text{Im}(z_{56}) - \text{Im}(S_{56n}) \cdot \text{Re}(z_{56})}{U_5} \right)$$

$$U_{6'} = 108.501 - 30.852i \text{ кВ}$$

$$U_7 := U_{\text{CHf}} - \left(\frac{\text{Re}(S_{4''7n}) \cdot \text{Re}(z_{47}) + \text{Im}(S_{4''7n}) \cdot \text{Im}(z_{47})}{U_{\text{CHf}}} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{4''7n}) \cdot \text{Im}(z_{47}) - \text{Im}(S_{4''7n}) \cdot \text{Re}(z_{47})}{U_{\text{CHf}}} \right)$$

$$U_7 = 110.236 - 29.301i \text{ кВ}$$

$$U_{6''} := U_7 - \left(\frac{\text{Re}(S_{76n}) \cdot \text{Re}(z_{67}) + \text{Im}(S_{76n}) \cdot \text{Im}(z_{67})}{U_7} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{76n}) \cdot \text{Im}(z_{67}) + \text{Im}(S_{76n}) \cdot \text{Re}(z_{67})}{U_7} \right)$$

$$U_{6''} = 108.37 - 31.232i \text{ кВ}$$

Напряжения в узле 6, рассчитанные с двух сторон, практически совпали.

$$U_8 := U_{6'} - \left(\frac{\text{Re}(S_{68n}) \cdot \text{Re}(z_{68}) + \text{Im}(S_{68n}) \cdot \text{Im}(z_{68})}{U_{6'}} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{68n}) \cdot \text{Im}(z_{68}) + \text{Im}(S_{68n}) \cdot \text{Re}(z_{68})}{U_{6'}} \right)$$

$$U_8 = 107.149 - 32.074i \text{ кВ}$$

$$U_9 := U_8 - \left(\frac{\text{Re}(S_{89n}) \cdot \text{Re}(z_{89}) + \text{Im}(S_{89n}) \cdot \text{Im}(z_{89})}{U_8} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{89n}) \cdot \text{Im}(z_{89}) + \text{Im}(S_{89n}) \cdot \text{Re}(z_{89})}{U_8} \right)$$

$$U_9 = 105.885 - 33.212i \text{ кВ}$$

$$U_{10} := U_9 - \left(\frac{\text{Re}(S_{910n}) \cdot \text{Re}(z_{910}) + \text{Im}(S_{910n}) \cdot \text{Im}(z_{910})}{U_9} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{910n}) \cdot \text{Im}(z_{910}) + \text{Im}(S_{910n}) \cdot \text{Re}(z_{910})}{U_9} \right)$$

$$U_{10} = 105.545 - 33.507i \text{ кВ}$$

Выбор номера отпайки РПН двухобмоточного трансформатора в узле 8.

Определим напряжение низшей стороны, приведенное к высшей стороне:

$$S_{8pr} := \frac{S_{pr8} - 2 \cdot (0.019 + j \cdot 0.112)}{2}$$

$$U_{ННВН8} := U_8 - \frac{\operatorname{Re}(S_{8pr}) \cdot 4.38 + \operatorname{Im}(S_{8pr}) \cdot 86.7}{\overline{U_8}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{8pr}) \cdot 86.7 + \operatorname{Im}(S_{8pr}) \cdot 4.38}{\overline{U_8}}$$

$$U_{ННВН8} = 102.29 - 38.064i \quad \text{кВ} \quad \left| U_{ННВН8} \right| = 109.143 \quad \text{кВ}$$

Определяем напряжения на шинах НН трансформатора:

$$k_{tVNn} := \frac{121}{11}$$

$$U_{NN} := \frac{|U_{ННВН8}|}{k_{tVNn}} \quad U_{NN} = 9.922 \quad \text{кВ}$$

Т.к. полученное напряжение не соответствует желаемому, находим желаемый коэффициент трансформации:

$$k_{tvnjel} := \frac{|U_{ННВН8}|}{10.5} \quad k_{tvnjel} = 10.395$$

Определяем желаемый номер отпайки РПН:

$$n := \left(\frac{k_{tvnjel}}{k_{tvnn}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.0178} \quad n = -3.092$$

Полученный номер отпайки РПН округляем до ближайшего целого

$$n_{ct} := -3$$

Находим фактическое напряжение на шинах НН после регулирования напряжения и сравниваем с желаемым:

$$U_{ННf8} := \frac{U_{ННВН8}}{k_{tvnn} \cdot (1 + n_{ct} \cdot 0.0178)} \quad \left| U_{ННf8} \right| = 10.482 \quad \text{кВ}$$

Фактическое напряжение практически совпало с желаемым, - следовательно, расчет проведен верно.

Практическое занятие № 9.

«Обзор задач по всем темам за семестр».

Цель: подвести итог в получении практических навыков по расчету режимов в разомкнутых и простых замкнутых сетях.

Данное занятие посвящается систематизации и обобщению полученных знаний по изучаемой дисциплине. Рекомендуется выполнить самостоятельную работу по комплексной оценке знаний студентов.

5. Самостоятельная работа студентов

5.1. График самостоятельной работы студентов

Номер и наименование темы	Номер лекции (Л), ПЗ	Содержание самостоятельной работы	Номер литературы	Объем в часах	Формы контроля СРС	Сроки контроля (номер учебной недели)
1	2	3	4	5	6	7
1. Общие сведения об энергетических системах	Л1	История развития ТЭК России. Состав ОЭС «Восток». Первичные источники для разных типов электростанций	3,1	1	Блиц-опрос на лекции	1
	Л2	Характеристика промышленных, городских, с/х потребителей. По реальным схемам ОЭС Востока дать классификацию сетей.	1,2,23	0,5	Блиц-опрос на лекции Самостоятельная работа	2
	Л3	Характеристика оборудования подстанций (ПС). Типовые схемы ПС и область их применения.	23 1,23	1	Блиц-опрос на лекции	3
2. Конструкция линий электрических сетей	Л4	Конструктивное исполнение многопроволочных проводов различных марок (соотношения между стальной и алюминиевой частью для нормальных, облегченных и усиленных проводов). Область применения различных марок и сечений проводов. Среднегеометрические расстояния между фазами в зависимости от номинального напряжения	1,2,6	1	Блиц-опрос на лекции	4
	Л5	Конструктивное исполнение изоляторов различных типов. Число изоляторов в гирляндах разных классов номинального напряжения. Полимерные изоляторы.	6	1	Блиц-опрос на лекции. Коллоквиум. Реферат	4
	Л6	Конструктивное исполнение кабелей из сшитого полиэтилена, ГНЛ	7,8	1	Реферат. Блиц-опрос на лекции.	5
	Л7	Маркировка кабельной арматуры. Способы прокладки кабелей.	7	1	Блиц-опрос на лекции.	6
3. Схемы замещения линий, трансформаторов, АТ	Л8	Анализ зависимости активного сопротивления проводов ВЛ от температуры. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	6,1	0,5	Блиц-опрос на лекции. Защита индивидуального задания	6
	ПЗ 1		4	1		2
	Л9	Провести сравнительный анализ схем замещения силового трансформатора, используемых для расчета режимов и используемых в электромеханике. Показать почему не учитывается электромагнитная связь между обмотками и как осуществляется приведение обмотки НН к ВН	1,6	1	Блиц-опрос на лекции.	7
	Л10	Распределение токов в АТ. Характеристики АТ. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	4,6	1	Защита индивидуального задания	8
	ПЗ 2		4	1		4

1	2	3	4	5	6	7
4. Модели электрических нагрузок узлов электрических сетей при расчетах режимов	Л11	Векторные диаграммы СМ. Зависимости активной мощности АД от скольжения и скольжения от подведенного напряжения. «Опрокидывание» двигателя. Механический момент АД.	6	1	Блиц-опрос на лекции.	8
	Л12	Для предложенных схем и режимов выбрать способ задания нагрузки. Задания нагрузок и генераторов в ПВК SDO-6.	2,6	1	Блиц-опрос на лекции Самостоятельная работа	9
5. Расчет режимов разомкнутых электрических сетей	Л13	Схемы электрических систем. Линейные и нелинейные уравнения установившегося режима.	6	1	Блиц-опрос на лекции	10
	ПЗ 3	Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	4	2	Защита индивидуального задания	6
	Л14	Расчет режима линии электропередачи при заданном токе нагрузки. Векторная диаграмма токов и напряжений.	1,2 4,6	1	Блиц-опрос на лекции Самостоятельная работа	10
	Л15 ПЗ 4	Расчет режима линии электропередачи при заданном напряжении в начале линии. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	1,2,6 4	1 2	Блиц-опрос на лекции Защита индивидуального задания	11 8
6. Расчет режимов в замкнутых электрических сетях	Л16	Вывод формулы потока мощности на головном участке сети при заданных мощностях или токах нагрузки.	2,6	0,5	Блиц-опрос на лекции	12
	ПЗ 5	Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.		2	Защита индивидуального задания	10
	Л17 ПЗ 6	Вывод формулы уравнивающей мощности. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	2,6	0,5 2	Блиц-опрос на лекции Защита индивидуального задания	12 12
7. Расчет режимов в электрических сетях нескольких номинальных напряжений	Л18	Расчет режима в сети путем ее приведения к одному базисному напряжению	1,6	1	Блиц-опрос на лекции	13
	Л19 ПЗ 7	Определение желаемого напряжения на стороне СН трансформатора. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	2,6	1	Блиц-опрос на лекции Защита индивидуального задания	14 14
	Л20 ПЗ 8	Технические средства регулирования напряжения, их конструктивные особенности и характеристики. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания.	6,2	2 2	Блиц-опрос на лекции Защита индивидуального задания	14 16
8. Особенности расчета режимов	Л21	Особенности расчета режимов разомкнутых местных сетей.	2,6	1	Блиц-опрос на лекции	15
	Л22 ПЗ 9	Вывод формулы для расчета потерь мощности и потерь напряжения в линии с равномерно распределенной нагрузкой. Подготовка к практическому занятию, выполнение домашнего задания	6	1 2	Коллоквиум Защита индивидуального задания	16 18

1	2	3	4	5	6	7
9. Линии СВН	Л23	Вставки постоянного тока	1,2,5,6	1	Блиц-опрос на лекции	16
10. Балансы активной и реактивной мощности в энергосистемах	Л24	Коэффициенты статизма. Характеристики регуляторов скорости турбины.	6,2	1	Блиц-опрос на лекции	17
	Л25	Оптимальное распределение активных мощностей	6,2	1	Блиц-опрос на лекции	17
	Л26	Регулирующий эффект нагрузки	6,2	1	Блиц-опрос на лекции	18
	Л27	Выработка реактивной мощности на электростанции	6,2	1	Блиц-опрос на лекции	18

5.2. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ.

При изучении дисциплины предусмотрено выполнение семи индивидуальных домашних заданий для студентов очной формы обучения и одной контрольной работы для студентов заочной и сокращенной заочной форм обучения.

Тематика индивидуальных домашних заданий совпадает с тематикой практических занятий. Прежде чем приступить к выполнению домашних заданий необходимо изучить соответствующих теоретический материал и разобраться с решением аналогичных задач, рассмотренных на практических занятиях или в литературе. Примеры решения задач по всем темам приведены в [4] и в п. 4.2 данного УМКД.

В таблице 5.1 систематизирована рекомендуемая литература, которая поможет успешно справиться с индивидуальным домашним заданием. Там же показаны в учебных неделях сроки защиты заданий. Индивидуальные домашние задания выполняются с помощью ПВК MathCad, SDO-6, RASTR и графического редактора Visio.

Контрольная работа для студентов заочной и сокращенной заочной форм обучения предусматривает выполнение трех задач на следующие темы: определение расчетной нагрузки узла, расчет режимов разомкнутых сетей, расчет режимов замкнутых сетей.

Примеры решения таких задач показаны в п.4.2 данного УМКД и в [4].

5.3. Комплекты домашних заданий, контрольных работ.

Комплекты домашних заданий выполнены по темам, каждая из которых содержит 15-25 задач. Задачи варьируются случайным образом при выдаче студентам.

Ниже приводятся примеры индивидуальных домашних заданий.

Полный комплект заданий находится у лектора.

Тема 1

№1

Линия 110 кВ выполнена проводом АС-70 /11. Расположение проводов на опоре горизонтальное. Расстояние между фазами 4 м. Длина линии 70 км. Определить, во сколько раз изменятся параметры схемы замещения линии при замене провода марки АС-70 /11 на АС-150 /24.

№2

ЛЭП выполнена проводом марки АСК-95 /16. Полное ее сопротивление равно 14 Ом. Среднегеометрическое расстояние между проводами фаз составляет 4,5 м. Определить длину линии. Параметры схемы замещения найти по справочным данным и рассчитать аналитически. Напряжение линии 110 кВ.

№3

Линия 110 кВ протяженностью 90 км выполнена проводом АС-95/16. Расстояние между фазами 4 м. Изменятся ли параметры схемы замещения, если горизонтальную подвеску проводов на опоре заменить на подвеску по вершинам равностороннего треугольника? Рассчитать параметры схемы замещения аналитически и сравнить со справочными данными.

№4

Одноцепная ЛЭП - 110 кВ протяженностью 60 км выполнена на металлических двухцепных опорах проводом марки АС-150 /24. Компоновка проводов на опоре - по вершинам равностороннего треугольника. Как изменятся параметры схемы замещения ЛЭП - 110 кВ, если будет подведена вторая цепь, аналогичная первой? Рассчитать параметры схемы замещения в обоих случаях. Расстояние между фазами - 5 м.

№5

Как изменится схема замещения линии и ее параметры, если первоначально была ЛЭП - 110 кВ, выполненная на металлических опорах с горизонтальной подвеской проводов, длиной 115 км, а затем ее изменили на ЛЭП -220 кВ с аналогичной подвеской проводов? Марка провода в обоих случаях - АСКП-240 /39. Расстояние между фазами при напряжении 110 кВ - 4 м, напряжении 220 кВ - 7 м.

№6

ЛЭП - 330 кВ выполнена проводом марки АС-400 /64 и имеет протяженность 180 км. Изменятся ли параметры схемы ее замещения, если каждую фазу выполнить двумя проводами марки АС-240 /39? Расстояние между проводами при расщеплении - 400 мм. Расстояние между фазами - 8 м.

№7

ЛЭП - 330 кВ выполнена проводами марки АСК-300 /48 с расщеплением фазы на два провода. Расстояние между проводами в расщеплении 400 мм, а длина линии - 340 км. Определить параметры схемы замещения. Расстояние между фазами - 8 м.

№8

ЛЭП - 500 кВ выполнена проводом марки АСК-400 /64 с расщеплением проводов в фазе на три. Расстояние между проводами в расщеплении - 600 мм. Длина линии 400 км. Составить схему замещения таким образом, чтобы можно было определить параметры режима ее работы в начале, конце и середине линии. Определить параметры схемы замещения с учетом "короны". Подвеска проводов - горизонтальная. Расстояние между фазами-11 м.

№9

Как изменится схема замещения линии и параметры участка линии, если ЛЭП - 35 кВ заменить на ЛЭП - 110 кВ? Марка проводов в обоих случаях остается неизменной – АСК - 120 /19. Расстояние между фазами в ЛЭП - 35 кВ составляет 3,2 м, а у ЛЭП - 110 кВ – 4,5 м. Подвеска проводов на опоре - треугольником.

№10

Две линии 10 кВ связывают потребителя с источником. Длина линии равна 15 км. Одна из них выполнена проводом АС-50 /8, расстояние между фазами составляет 1,5 м, а расположение проводов на опоре - по вершинам равностороннего треугольника. Вторая линия выполнена кабелем с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией сечением 50 мм². Составить схемы замещения линий и рассчитать их параметры. Произвести анализ полученных результатов.

№11

ВЛ - 10 кВ, длина которой 10 км, выполнена проводом АС-35/6,2. Среднегеометрическое расстояние между фазами составляет 1,4 м. Как изменятся параметры схемы замещения линии, если провод марки АС-35/6,2 заменить на провод марки ПМС-35?

№12

Рассчитать параметры схемы замещения ВЛ - 10 кВ, выполненной проводом ПМС-35. Расстояние между фазами 1,5 м, провода расположены по вершинам равностороннего треугольника. Ток равен 30 А. Изменятся ли параметры схемы замещения, если ток станет равен 70 А?

№13

Промышленное предприятие получает питание от районной подстанции по воздушной и кабельной линиям 10 кВ. Длина обеих линий одинакова и составляет 10 км. ВЛ выполнена проводом АС-70 / 11 со среднегеометрическим расстоянием между проводами 1,2 м. Кабельная линия выполнена кабелем марки ААШВ-70. Определить параметры схемы замещения. Что произойдет с ними, если напряжение изменится и будет равным 35 кВ?

№14

Предприятие связано с источником электроэнергии воздушной линией 35 кВ, выполненной проводом марки АС-120/19, протяженностью 20 км. Во сколько раз изменится полное сопротивление линии, если ее заменить кабелем ОАБ с сечением жил 120 мм²? Рассчитать аналитически параметры схемы замещения воздушной линии при расстоянии между фазами, равном 3,2 м.

№15

Воздушная двухцепная линия длиной 100 км питает районную электрическую сеть 220 кВ. Линия выполнена проводом марки АС - 400/51. Составить схему замещения линии и найти параметры схемы замещения. Как изменится схема замещения и ее параметры, если линию выполнить одноцепной? Расстояние между фазами - 7 м.

№16

Воздушная линия электропередачи напряжением 500 кВ длиной 220 км связывает две электростанции. Составить для нее схему замещения и определить ее параметры, если линия выполнена проводом АСК-500 /64, число проводов в фазе - три. Расстояние между проводами в расщеплении 500 мм. Расстояние между фазами - 11 м. Подвеска проводов горизонтальная.

Тема 2

№1

Трансформатор типа ТМ – 6300 /110 имеет потери реактивной мощности в режиме холостого хода (х.х.) $\Delta Q_x = 63$ квар. Чему равна реактивная составляющая тока холостого хода? Определить параметры схемы замещения трансформатора.

№2

При испытаниях трансформатора типа ТМ – 2500 /110 оказалось, что потери реактивной мощности в опыте холостого хода составили 37,5 квар, а ток холостого хода - 1,5 %. Определить параметры схемы замещения трансформатора, а также активную составляющую тока холостого хода. Сравнить со справочными данными.

№3

Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора типа ТМН - 1600/35. Определить, сколько процентов реактивной составляющей напряжения короткого замыкания приходится на долю активной составляющей.

№4

Определить, во сколько раз активная составляющая напряжения короткого замыкания меньше реактивной у трансформатора ТМ-4000/10. Определить параметры схемы замещения двух отдельно работающих трансформаторов.

№5

Во сколько раз реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора типа ТД - 10000 /110 больше активной, если ток холостого хода $I_x = 1 \%$, а $\Delta Q_x = 100$ квар. Определить параметры схемы замещения трансформатора.

№6

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТД-10000/35 и долю активной составляющей тока холостого хода в процентах от его величины по данным опыта холостого хода: $I_x = 0,8\%$; $\Delta Q_x = 80$ квар, $\Delta P_x = 14,5$ кВт.

№7

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДНС-16000/35 и ТРДНС-25000/35 и рассчитать их параметры. В чем отличие схем замещения?

№8

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДН-25000/110 и ТРДН 25000/110 и рассчитать их параметры. Обмотки низкого напряжения трансформатора типа ТРДН - 25000 /110 включены отдельно.

№9

Построить схему замещения и определить ее параметры для силового трансформатора типа ТРДЦНК - 80000 /110 при параллельной работе обмоток низкого напряжения (НН).

Как изменятся параметры схемы замещения трансформатора при отдельной работе обмоток НН ?

№10

На подстанции установлены два трансформатора типа ТМТН-6300/110, работающие на общую нагрузку. Построить эквивалентную схему замещения подстанции и рассчитать ее параметры.

№11

Для связи потребителя с источником на подстанции установлен трансформатор типа ТДТН – 10000 / 110, у которого $U_{вн} = 115$ кВ; $U_{сн} = 38,5$ кВ; $U_{нн} = 11$ кВ. Определить параметры его схемы замещения, приведенные к стороне высокого напряжения, а затем - к стороне низкого напряжения.

№12

Привести схему замещения и рассчитать ее параметры для двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДЦТН - 80000/110/35/10.

№13

Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора типа ТДТН – 40000/220/35/6 кВ, приведенные к высокой стороне и к средней стороне трансформатора.

№14

Рассчитать параметры схемы замещения двух параллельно работающих автотрансформаторов АТДЦТН - 250000 /220 /110.

№15

Начертить схему замещения и определить ее параметры для силового трансформатора типа ТДТН - 25000 /220 при соотношении мощностей его обмоток 100 /100 /67 %. Как изменятся параметры схемы замещения, если соотношение мощностей обмоток трансформатора составит 100 /100 /100 %?

№16

Привести схему замещения для двух параллельно работающих автотрансформаторов типа АТДЦТН - 250000 /330 /150 и определить ее параметры.

№17

Определить параметры схемы замещения двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДЦ - 125000 /220 и показать их значения на схеме замещения.

№18

Составить схему замещения и определить ее параметры для автотрансформатора АТДЦТН - 200000 /220 /110, принимая за базисное высшее напряжение автотрансформатора.

№19

Как изменятся параметры схемы замещения, если в качестве базисного значения сначала принять высшее напряжение трансформатора, а затем – низшее? Показать на примере трансформатора ТРДНС – 63000/220.

№20

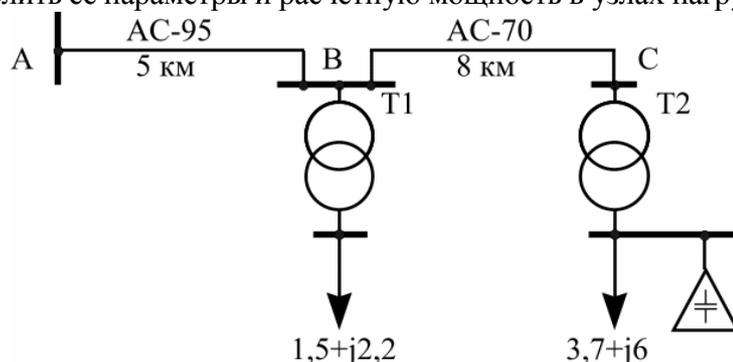
Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 167000 /500 /220.

Тема 3

№1

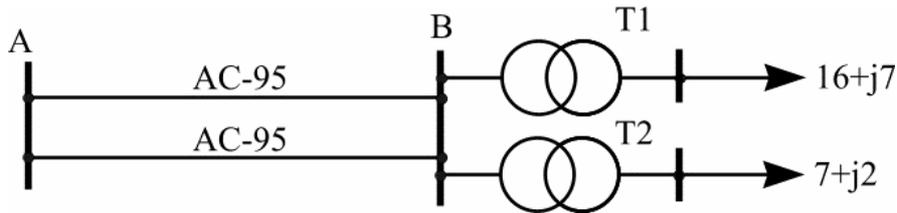
Схема сети 35 кВ приведена на рисунке. На подстанции В установлен трансформатор типа ТМН-4000/35. Нагрузка в МВА показана на рисунке. На подстанции С установлен трансформатор типа ТМН-6300/35. Длины участков линий указаны в километрах, марки проводов приведены на схеме.

На подстанции С установлена батарея конденсаторов $Q_{\text{БК}}=4,5$ Мвар. Построить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетную мощность в узлах нагрузки.



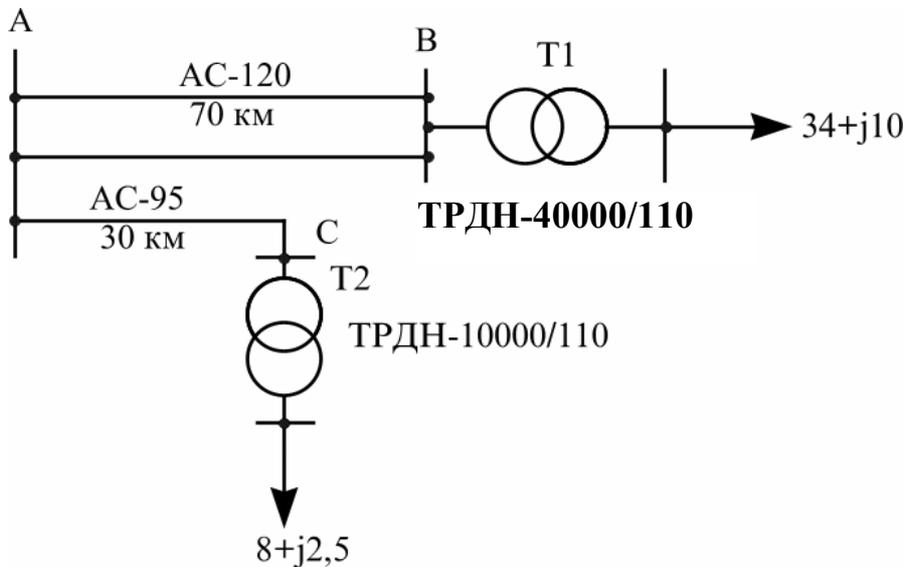
№2

Подстанция, на которой установлены трансформаторы типа ТРДН-25000/35 (Т1) и типа ТДН-10000/35 (Т2), получает питание по двухцепной ЛЭП протяженностью 7 км. Нагрузка в МВА показана на рисунке. Построить схему замещения сети 35 кВ и рассчитать ее параметры, а также рассчитать мощность нагрузок в узлах.



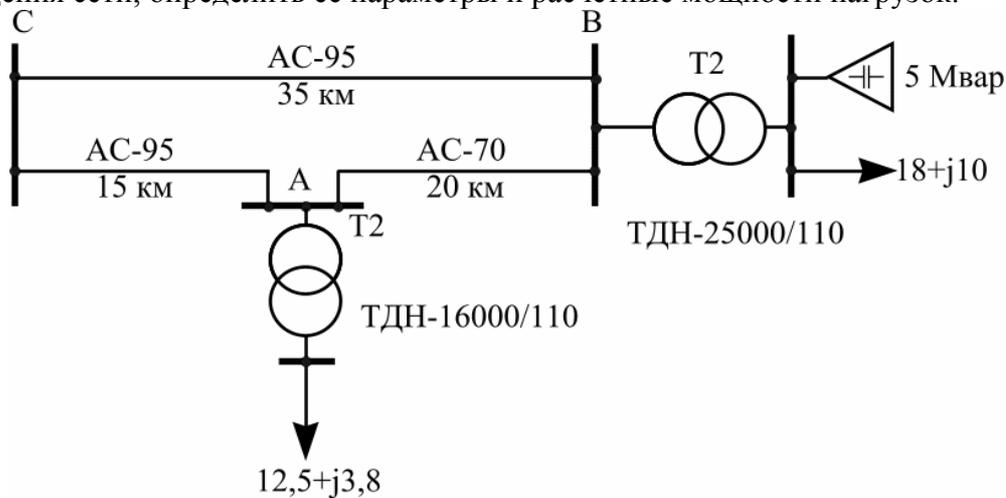
№3

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции В и С с источником питания А. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и определить расчетную нагрузку в узлах.



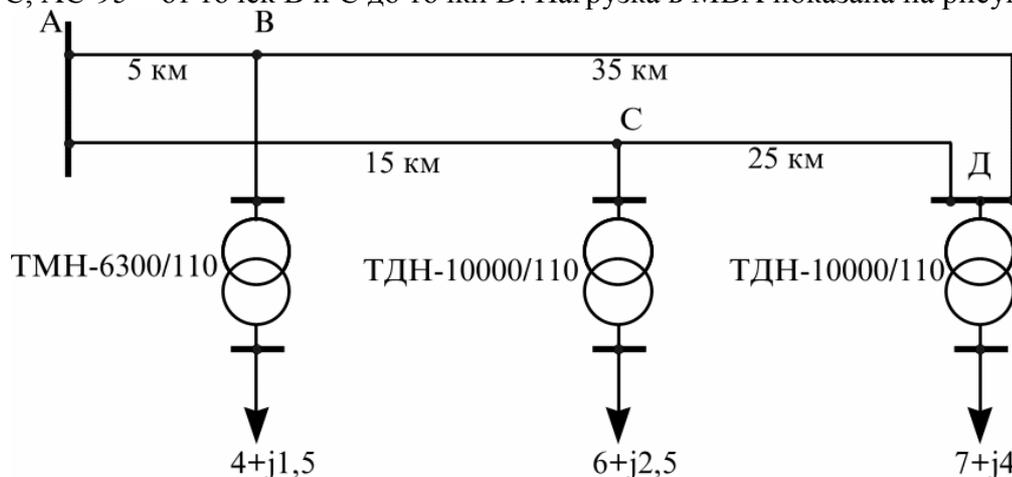
№4

Две подстанции получают энергию от источника питания С по кольцевой сети 110 кВ. На подстанции В установлена батарея конденсаторов мощностью 5 Мвар. Построить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетные мощности нагрузок.



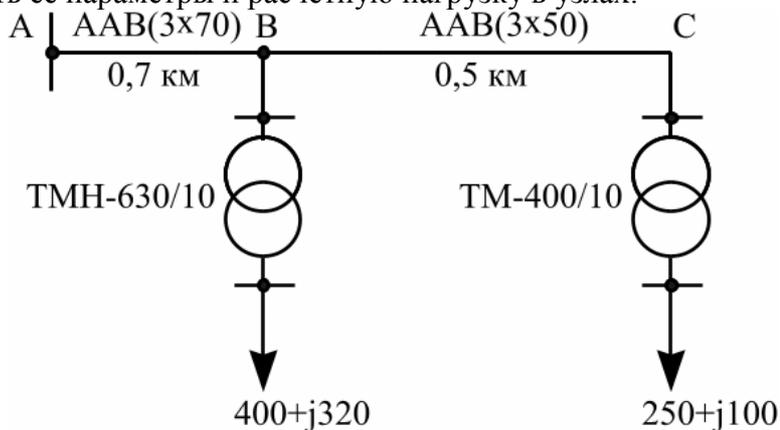
№5

Магистральная двухцепная линия 110 кВ связывает источник питания с подстанцией Д. К этой линии подключены подстанции В и С. Составить схему замещения, определить ее параметры и расчетные мощности нагрузок в узлах. Марка и сечение провода АС-120 заданы до точек В и С, АС-95 – от точек В и С до точки Д. Нагрузка в МВА показана на рисунке.



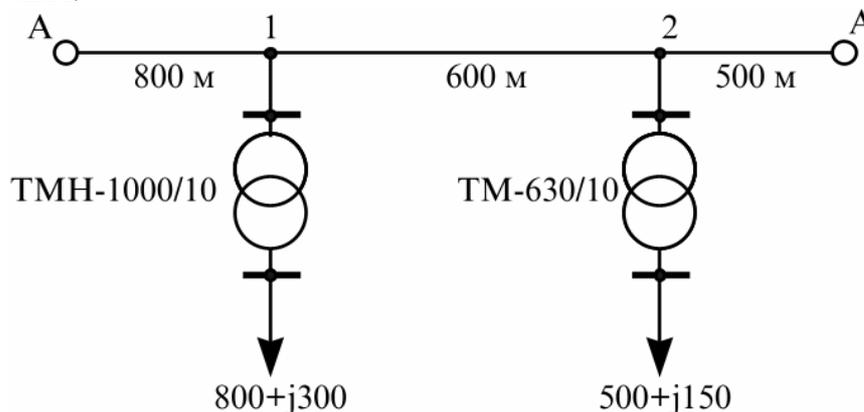
№6

Сеть 10 кВ выполнена кабелями с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией. Длины участков указаны в километрах, нагрузка - в кВА. Составить расчетную схему замещения, определить ее параметры и расчетную нагрузку в узлах.



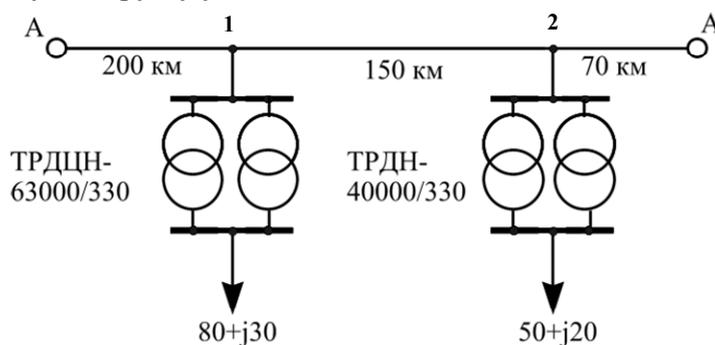
№7

Кольцевая сеть 10 кВ выполнена кабельными линиями с алюминиевыми жилами сечением 50 мм^2 и связывает подстанции 1 и 2 с источником питания А. Построить схему замещения, определить ее параметры, а также расчетную нагрузку узлов. Нагрузка подстанций дана в кВА.



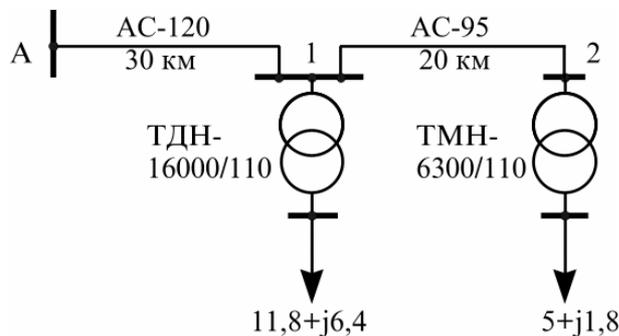
№8

Сеть 330 кВ обеспечивает электроэнергией подстанции 1 и 2. Сеть выполнена проводом марки АСКП-240 с расщеплением проводов в фазе на два. Среднегеометрическое расстояние между фазами 8 м, между проводами в фазах - 40 см. Построить схему замещения, определить ее параметры и расчетную нагрузку узлов.



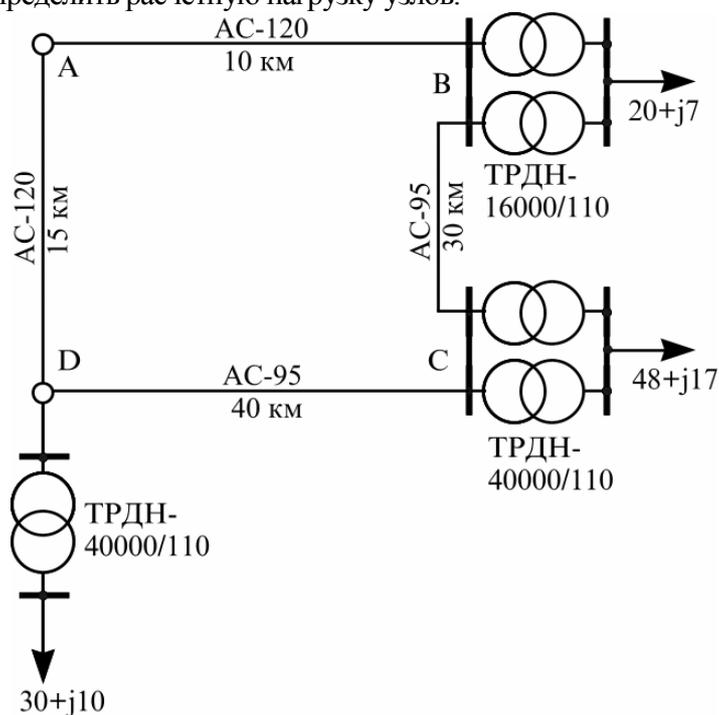
№9

В связи с увеличением нагрузки в узле 2 вдвое, однострансформаторная подстанция стала двухтрансформаторной. Необходимо определить, насколько изменится мощность, отбираемая от источника. Составить схему замещения и определить ее параметры, расчетную нагрузку узлов.



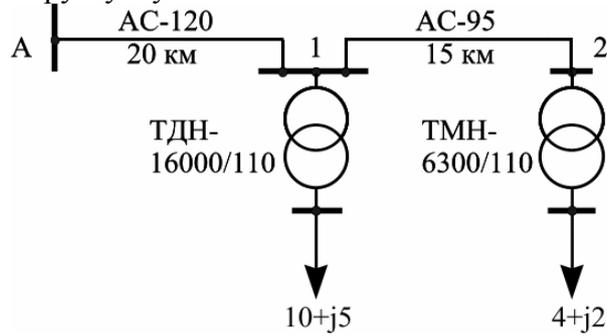
№10

Напряжение источника A равно 121 кВ. Рассчитать параметры схемы замещения кольцевой сети, построить ее и определить расчетную нагрузку узлов.



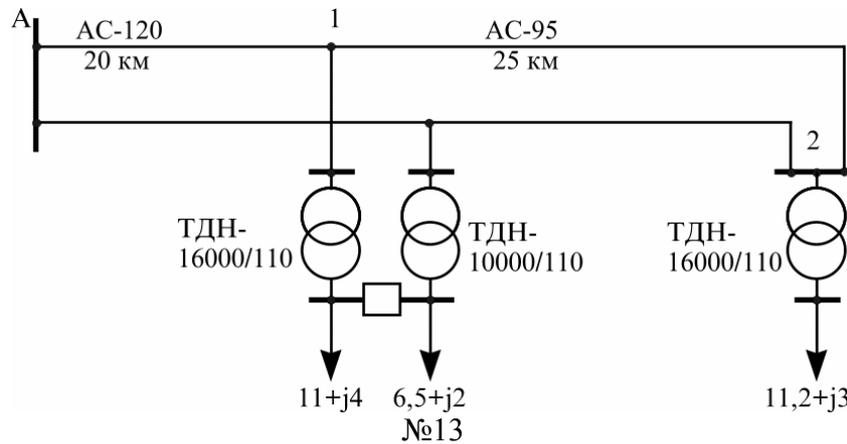
№11

В узле 1 нагрузка увеличилась вдвое, в связи с этим установлен второй трансформатор, и линия 1 стала двухцепной. Построить схему замещения, рассчитать ее параметры и расчетную нагрузку в узлах.



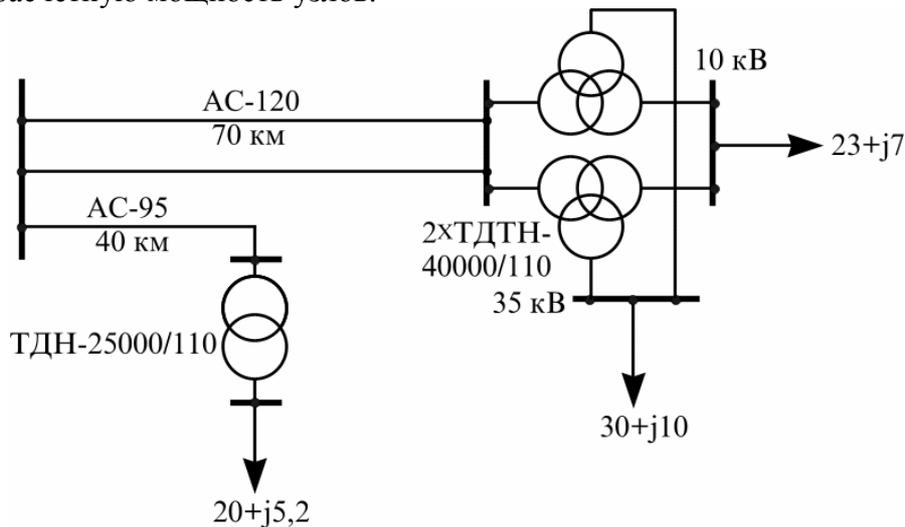
№12

Напряжение источника питания 110 кВ. Нагрузка в МВА показана на рисунке. Составить схему замещения сети, рассчитав ее параметры и расчетную мощность в узлах нагрузки.



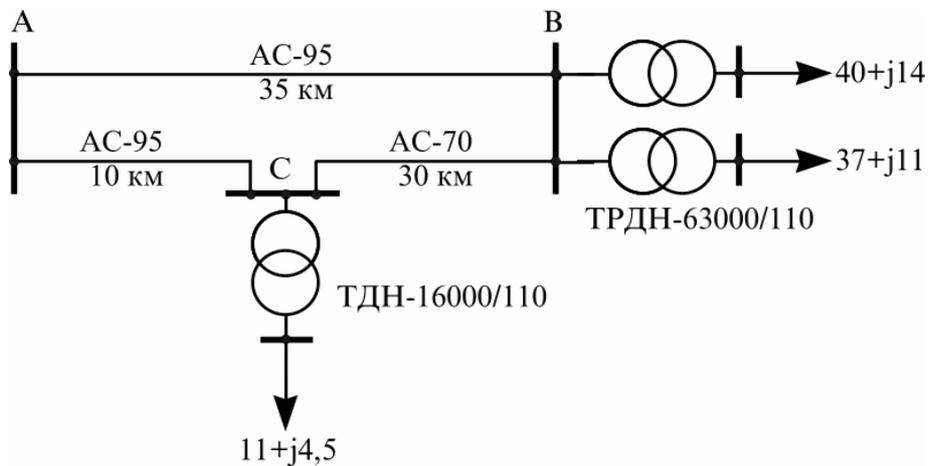
№13

Нагрузка подстанций дана в МВА. Составить схему замещения, определить ее параметры и расчетную мощность узлов.



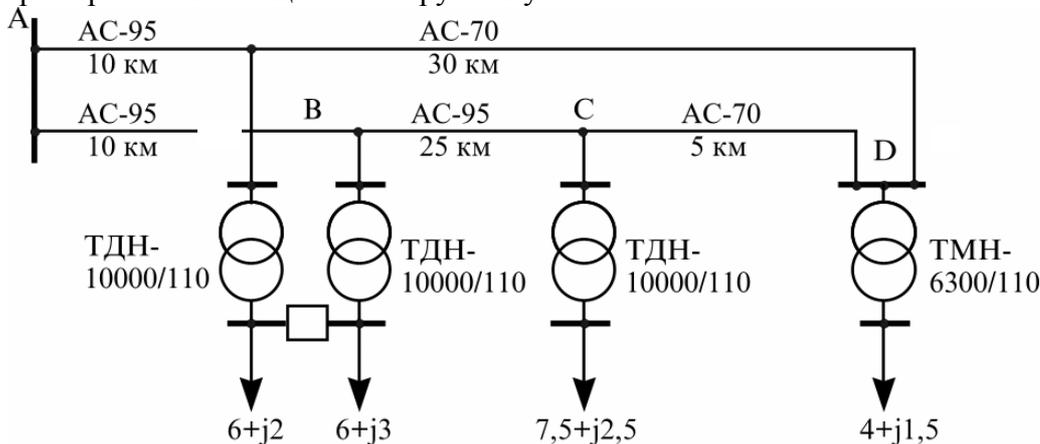
№14

Напряжение источника $U_A=110$ кВ. Две подстанции получают питание по кольцевой сети от источника питания А. Составить схему замещения, определить ее параметры и расчетную нагрузку узлов.



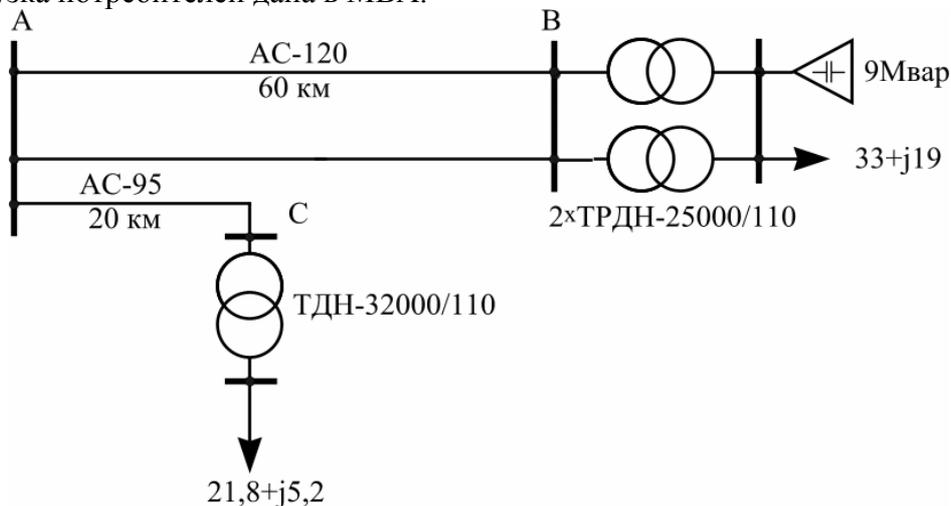
№15

Магистральная двухцепная линия 110 кВ связывает источник питания с подстанцией D. К этой линии подключены подстанции В и С. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и расчетные мощности нагрузок в узлах.



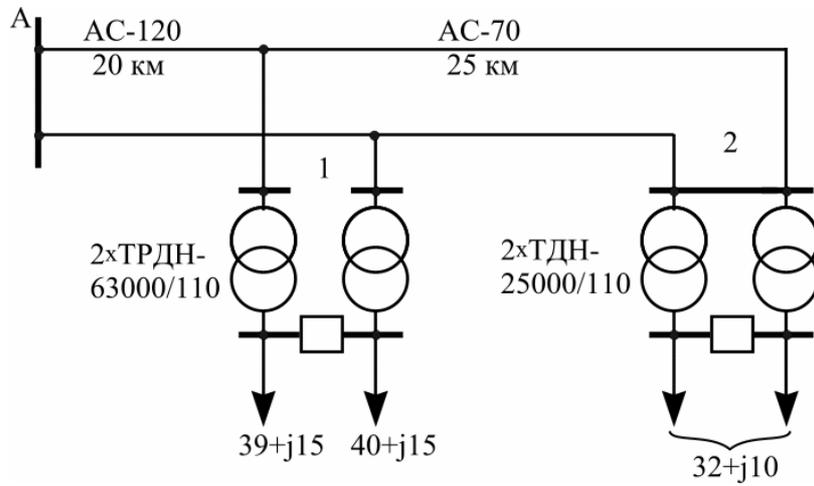
№16

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции В и С с источником питания А. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и определить расчетную нагрузку в узлах. Нагрузка потребителей дана в МВА.



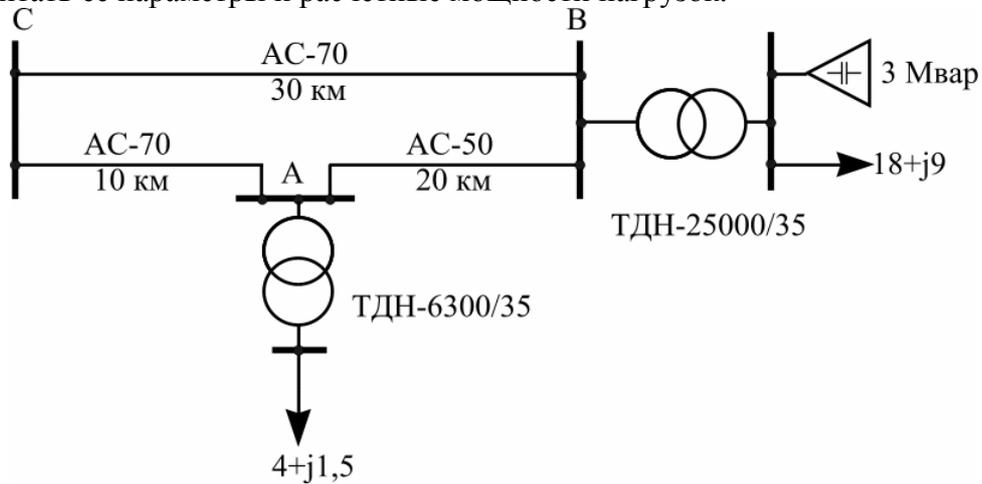
№17

Напряжение источника питания 110 кВ. Составить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетные нагрузки узлов.



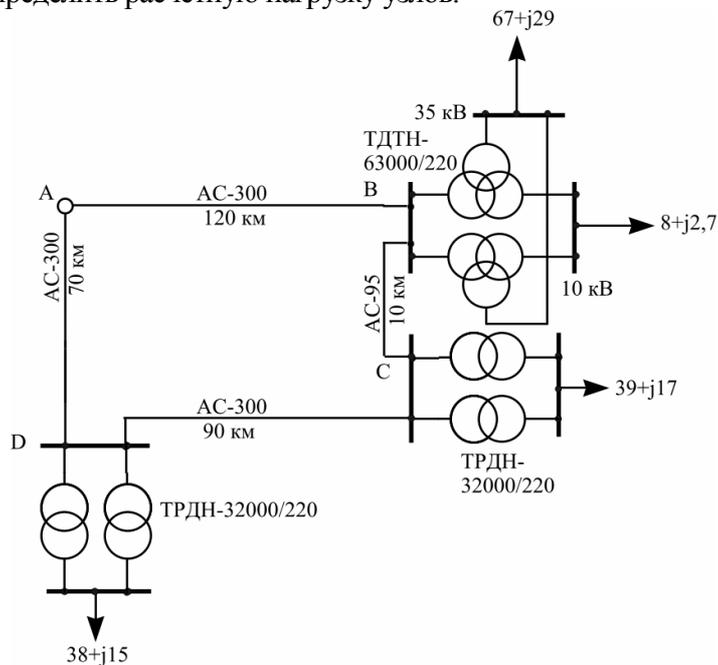
№18

Две подстанции получают энергию от источника питания С кольцевой сети 110 кВ. На подстанции В установлены батареи конденсаторов (БК). Построить схему замещения сети, рассчитать ее параметры и расчетные мощности нагрузок.



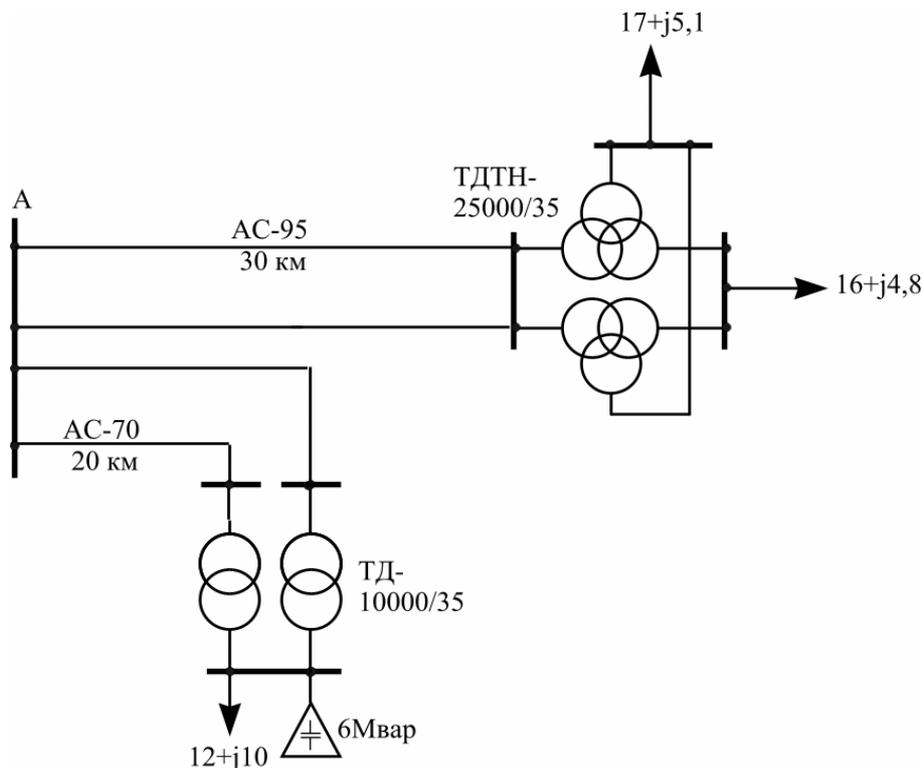
№19

Напряжение источника А равно 221 кВ. Рассчитать параметры схемы замещения кольцевой сети, построить ее и определить расчетную нагрузку узлов.



№20

Составить схему замещения, определить ее параметры и определить расчетную нагрузку узлов.

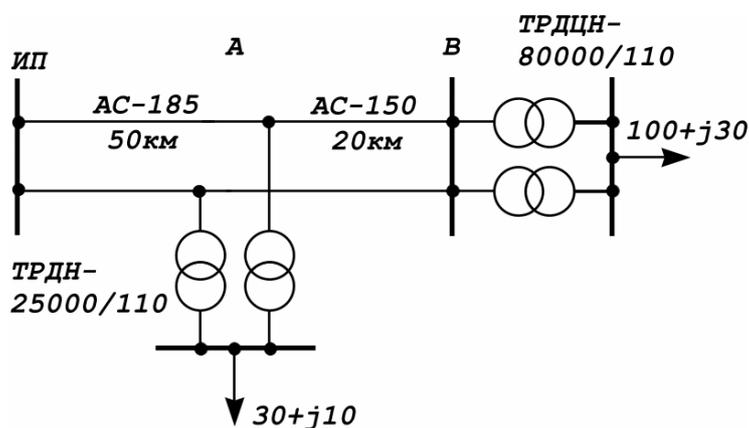


Примечание: если не указана размерность нагрузок потребителей, то она принимается в МВА.

Тема 4

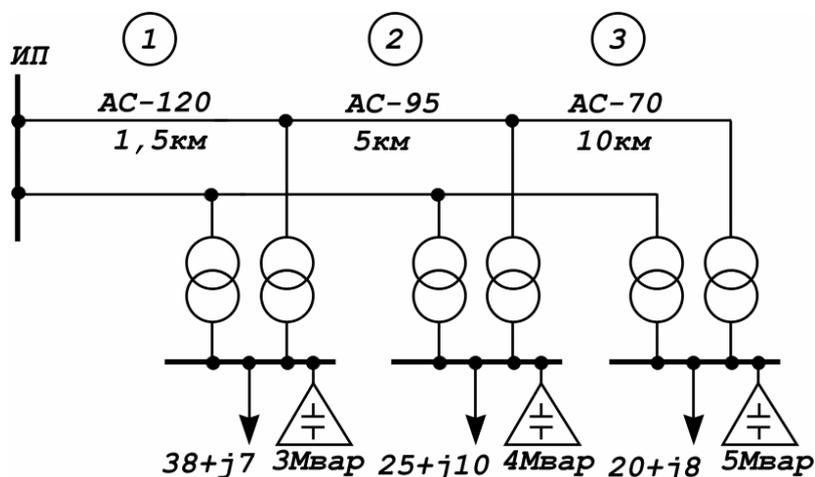
№1

Рассчитать режим районной разомкнутой сети напряжением 110 кВ, схема которой приведена на рисунке. Построить векторную диаграмму напряжений в узлах. Расчет произвести двумя алгоритмами: а) по данным начала при $U_{ИП}=112$ кВ; б) по данным конца при $U_{В}=106$ кВ.



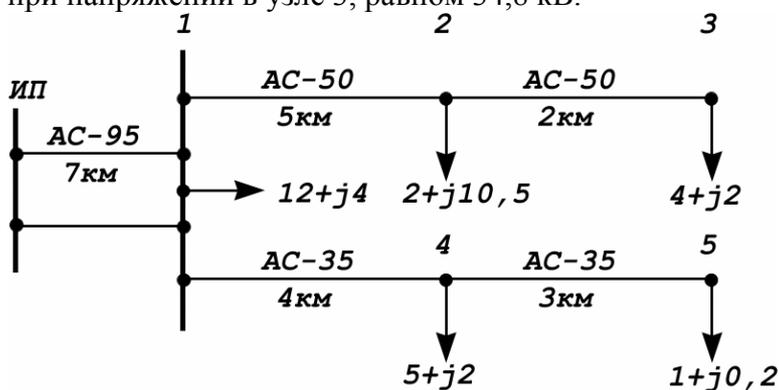
№2

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 35 кВ, схема которой приведена на рисунке. Определить мощность, выдаваемую с шин источника питания, и коэффициент мощности на шинах источника питания. В первом случае принять напряжение ИП равным 37,5 кВ, во втором - принять напряжение на шинах подстанции 3 равным 33 кВ.



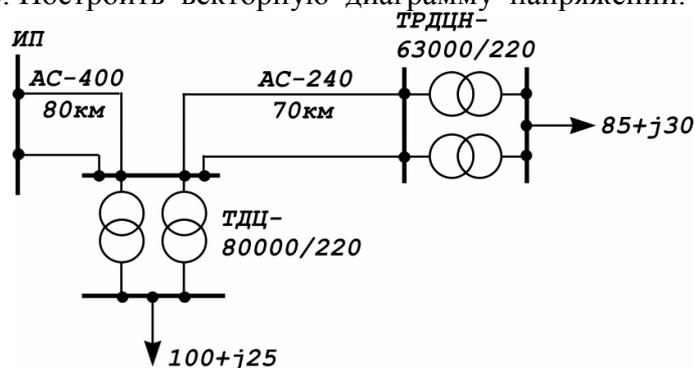
№3

Рассчитать режим разомкнутой сети 35 кВ, схема которой показана для двух случаев на рисунке. Определить наибольшую потерю напряжения в сети: а) при напряжении ИП, равном 36,8 кВ; б) при напряжении в узле 3, равном 34,8 кВ.



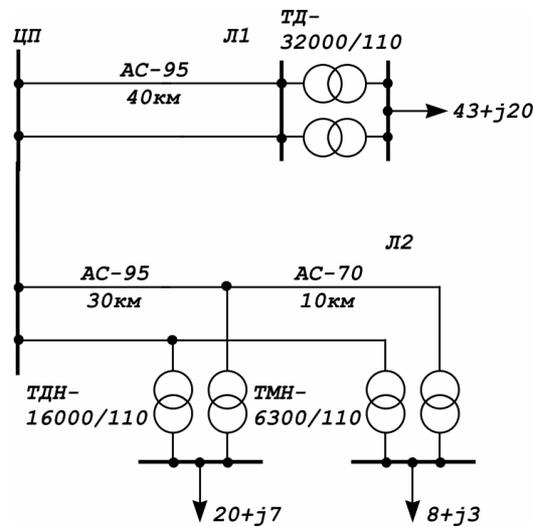
№4

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 220 кВ, схема которой показана на рисунке: а) при известном напряжении ИП, $U_{ИП}=235$ кВ; б) при напряжении последнего узла схемы $U=218$ кВ. Построить векторную диаграмму напряжений.



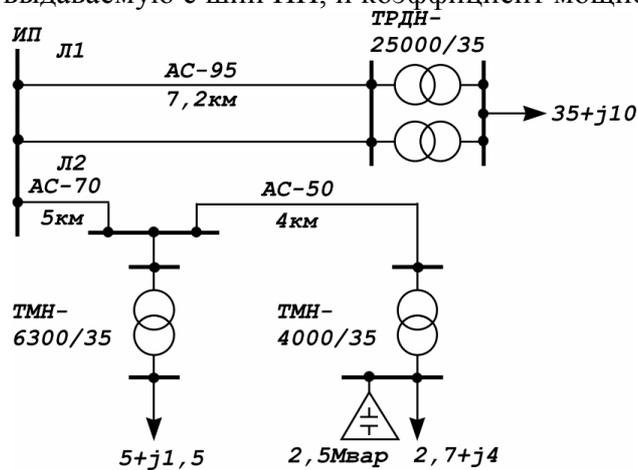
№5

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 110 кВ, схема которой приведена на рисунке. Определить мощность, выдаваемую с шин центра питания, и К.П.Д. линии Л1: а) при напряжении центра питания 121 кВ; б) при напряжении в конце линии Л2 114 кВ.



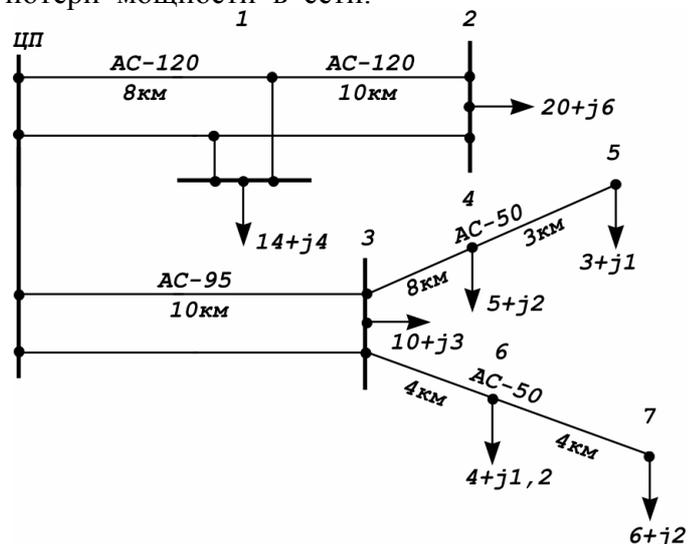
№6

Рассчитать режим работы разомкнутой сети 35 кВ, схема которой приведена на рисунке: а) при напряжении ИП 37 кВ; б) при напряжении в конце линии Л2 32,5 кВ. Определить мощность, выдаваемую с шин ИП, и коэффициент мощности на шинах ИП.



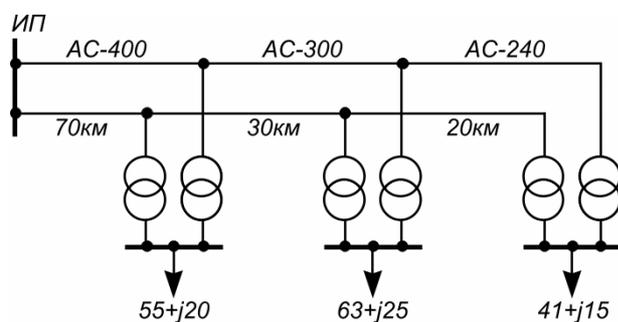
№7

Рассчитать режим разомкнутой сети 35 кВ, схема которой приведена на рисунке: а) при напряжении центра питания 37,5 кВ; б) при напряжении в узле 5, равном 32,5 кВ. Определить суммарные потери мощности в сети.



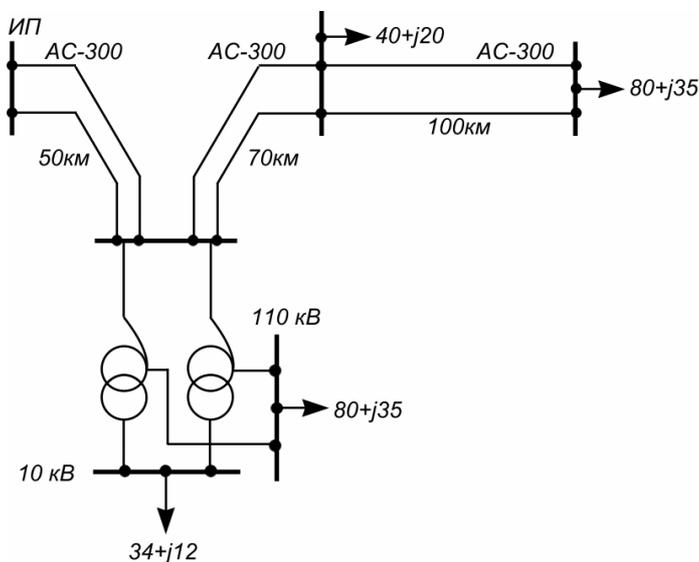
№8

Рассчитать установившийся режим работы разомкнутой сети 220 кВ, схема которой приведена на рисунке: а) $U_{ип} = 236$ кВ; б) напряжение в конце линии $U = 218$ кВ. Построить векторные диаграммы.



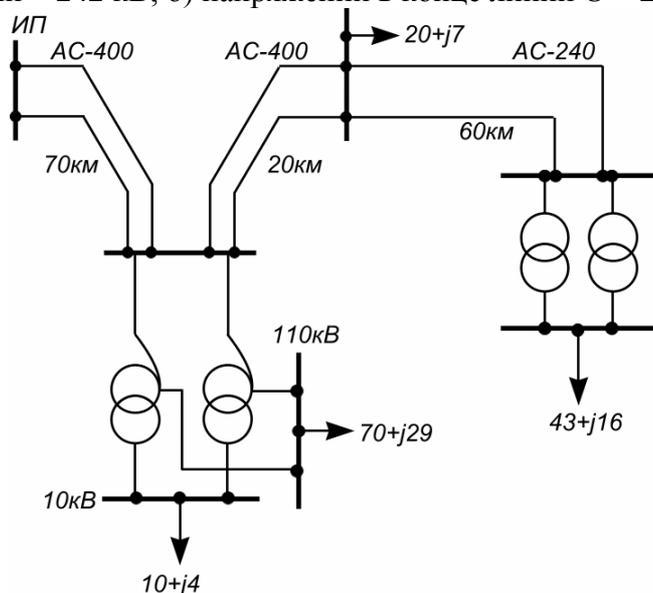
№9

Рассчитать режим разомкнутой сети, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ип} = 340$ кВ; б) напряжении в конце линии $U = 320$ кВ. Построить векторные диаграммы.



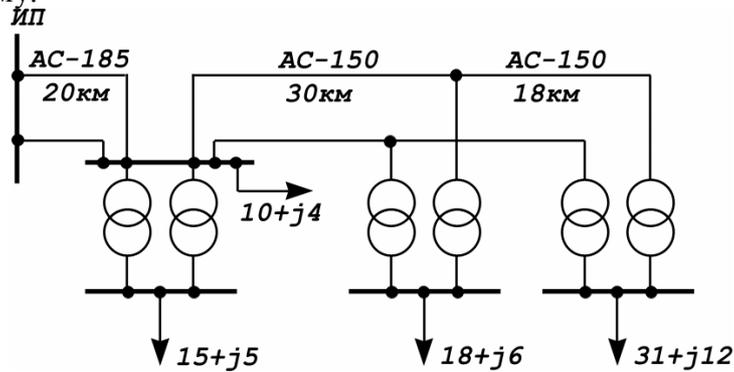
№10

Рассчитать режим разомкнутой сети 220 кВ, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ип} = 242$ кВ; б) напряжении в конце линии $U = 205$ кВ.



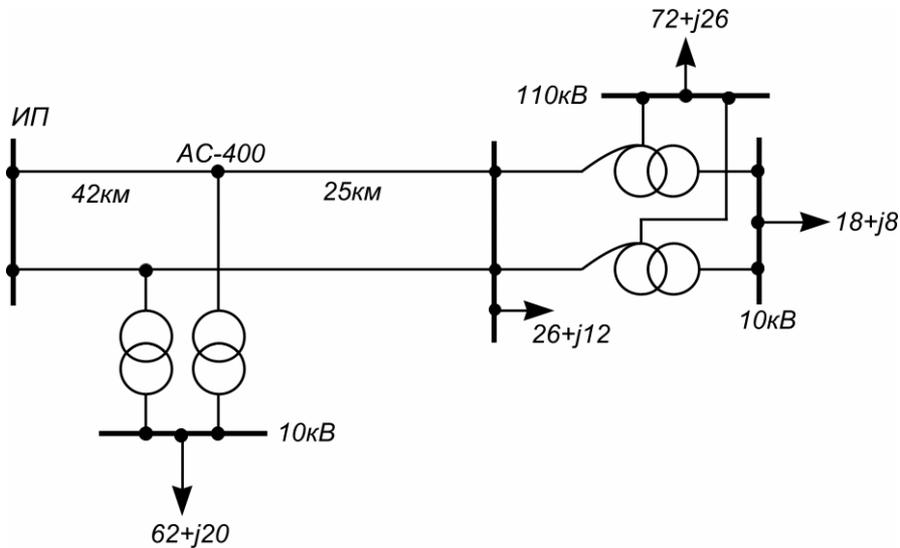
№11

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 110 кВ, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ИП} = 117$ кВ; б) напряжении в конце линии 109 кВ. Построить векторную диаграмму.



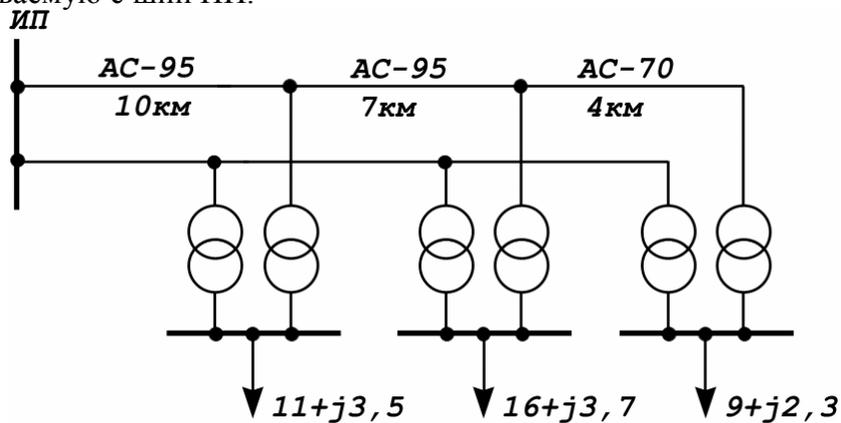
№12

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 220 кВ, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ИП} = 240$ кВ; б) напряжении в конце линии 210 кВ.



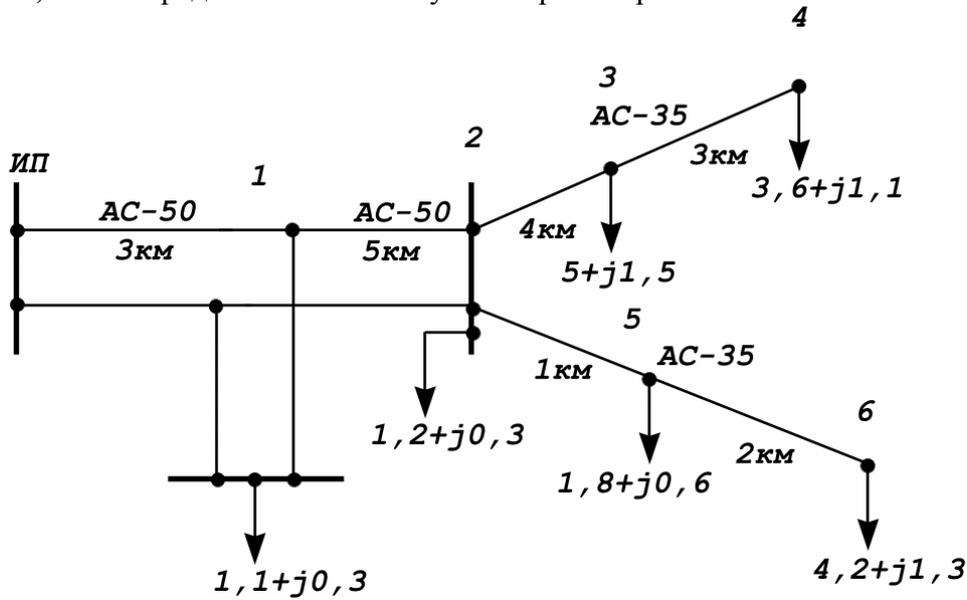
№13

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 35 кВ для случаев: а) известного напряжения $U_{ИП} = 37,2$ кВ; б) известного напряжения в конце линии $U_k = 33$ кВ. Определить мощность, выдаваемую с шин ИП.



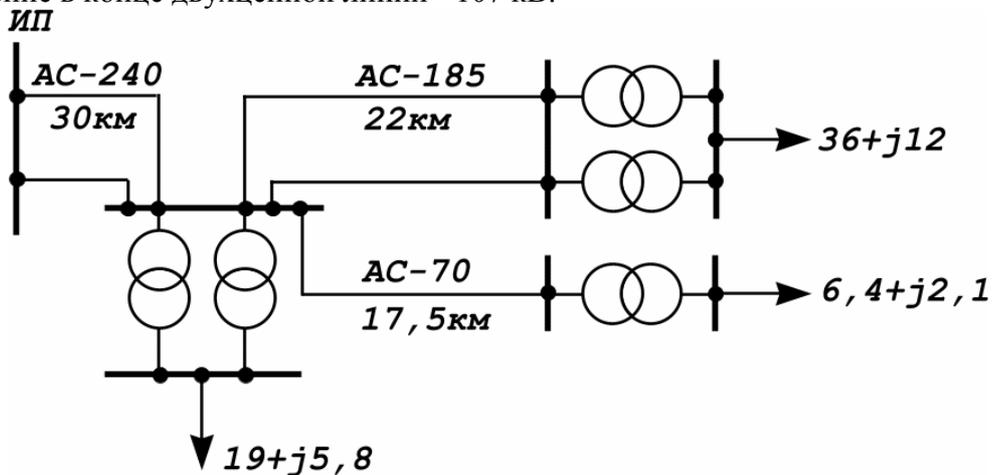
№14

Расчитать режим разомкнутой сети 10 кВ для случаев: а) $U_{ип}=11$ кВ; б) напряжение в узле 4 равно 9,5 кВ. Определить наибольшую потерю напряжения в сети.



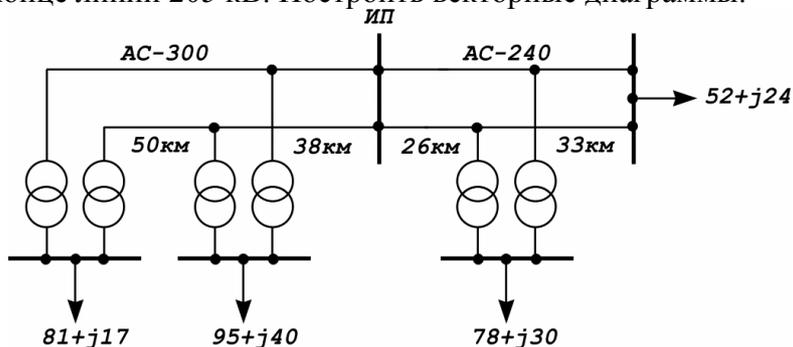
№15

Расчитать режим разомкнутой сети 110 кВ для двух случаев: а) $U_{ип} = 117$ кВ; б) напряжение в конце двухцепной линии - 107 кВ.



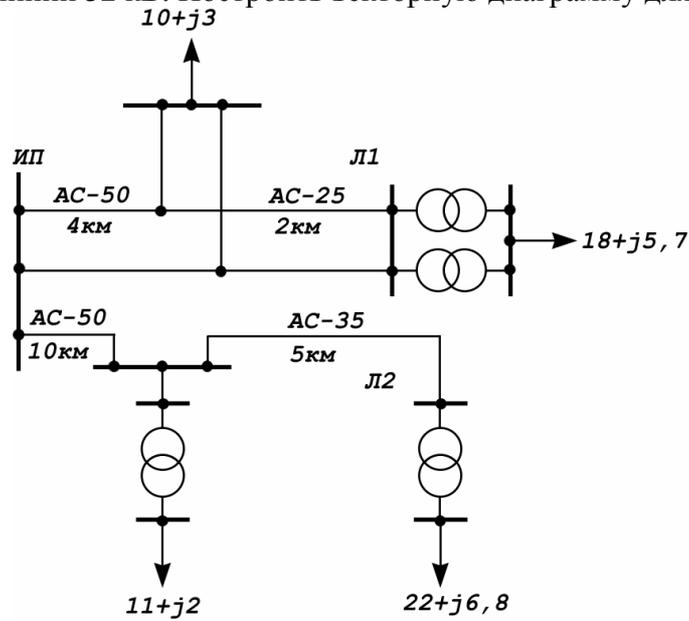
№16

Расчитать режим районной разомкнутой сети 220 кВ при: а) $U_{ип} = 238$ кВ; б) напряжении в конце линии 205 кВ. Построить векторные диаграммы.



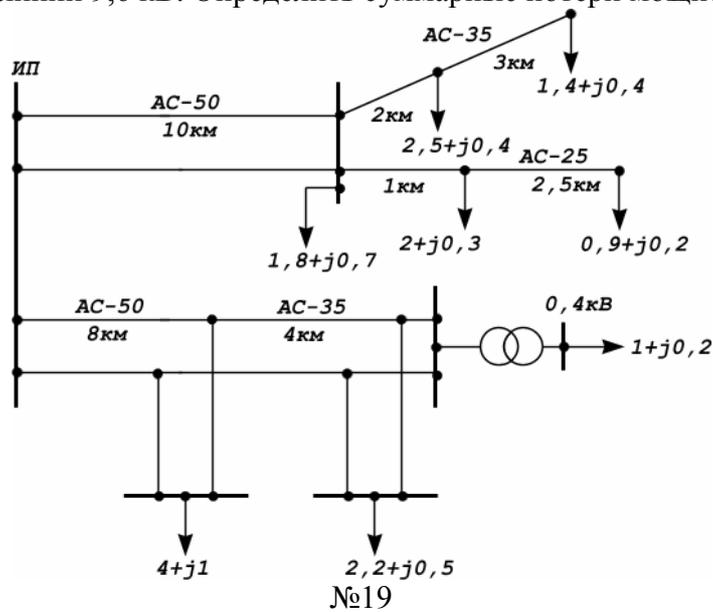
№17

Рассчитать режим разомкнутой сети 35 кВ при: а) напряжении $U_{ип} = 37$ кВ; б) напряжении в конце линии 32 кВ. Построить векторную диаграмму для указанной линии Л1.



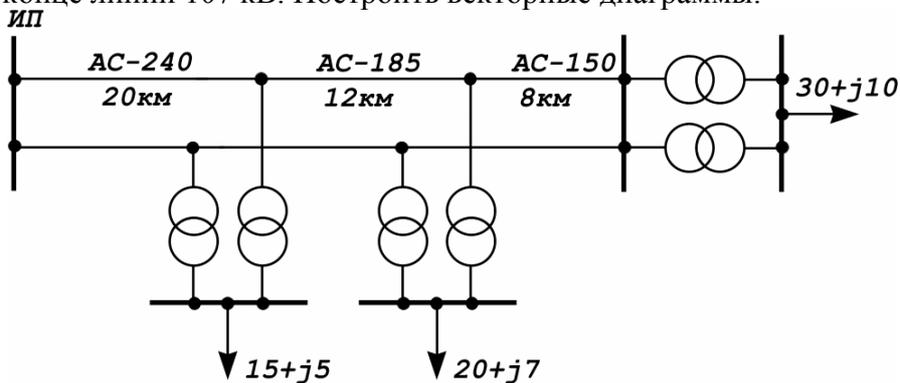
№18

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) $U_{ип} = 10,7$ кВ; б) напряжении в конце двухцепной линии 9,6 кВ. Определить суммарные потери мощности в сети.



№19

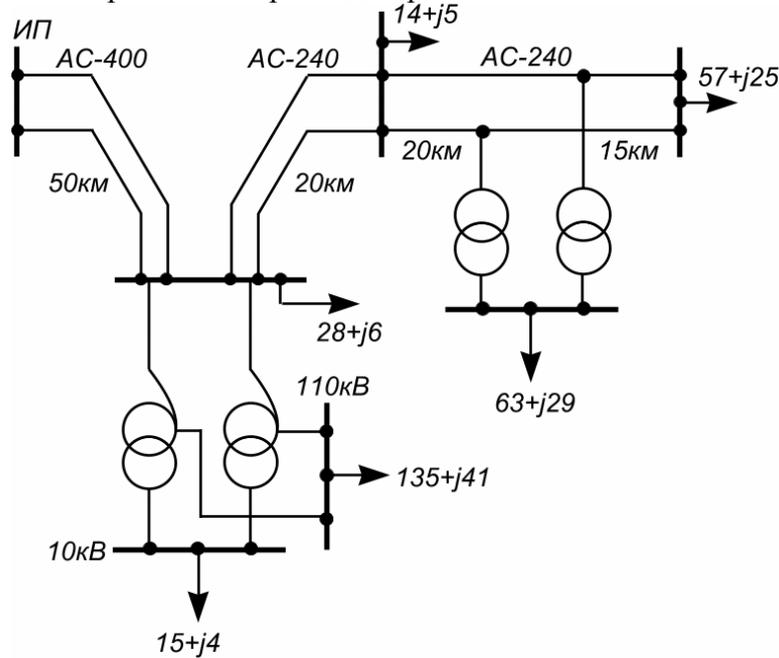
Рассчитать установившийся режим 110 кВ для двух случаев: а) $U_{ип} = 119$ кВ; б) напряжение в конце линии 107 кВ. Построить векторные диаграммы.



№20

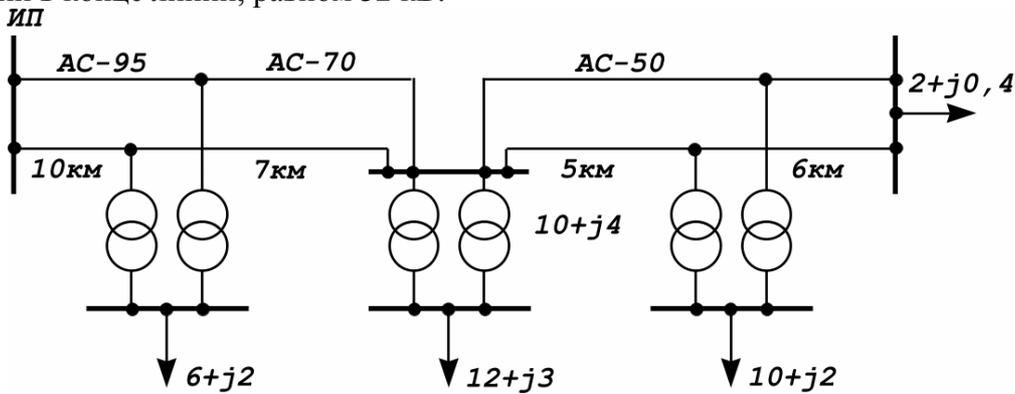
Расчитать режим разомкнутой сети при: а) $U_{ип} = 228 \text{ кВ}$; концы линии 209 кВ. Построить векторные диаграммы.

б) напряжении в



№21

Расчитать режим разомкнутой сети при: а) напряжении ИП, равном $U_{ип} = 37,8 \text{ кВ}$; б) напряжении в конце линии, равном 32 кВ.

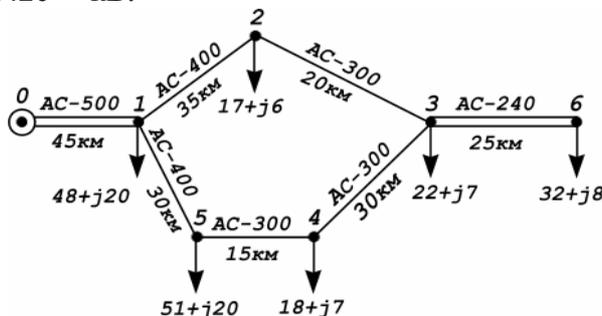


Для всех задач, если не указано номинальное напряжение на низкой стороне трансформатора, принимать его равным 10 кВ.

Тема 5

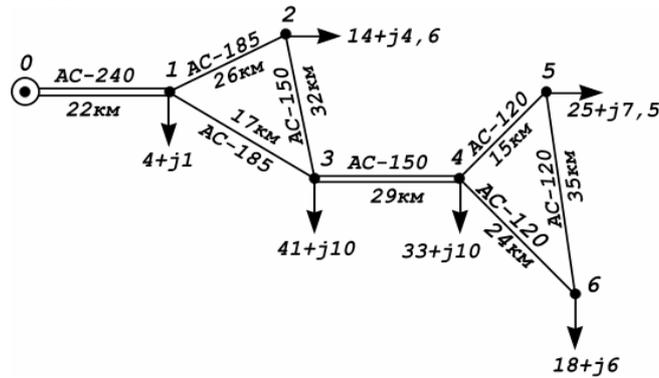
№1

Расчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $242e^{j15} \text{ кВ}$.



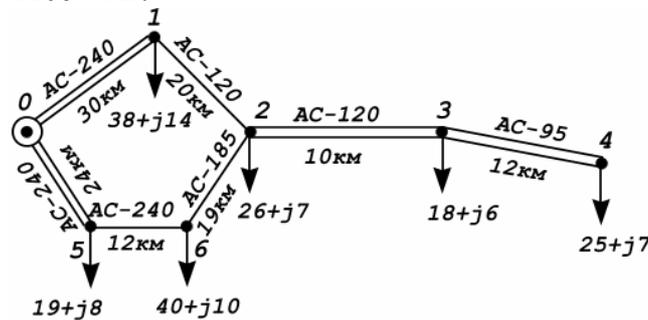
№2

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j12}$ кВ.



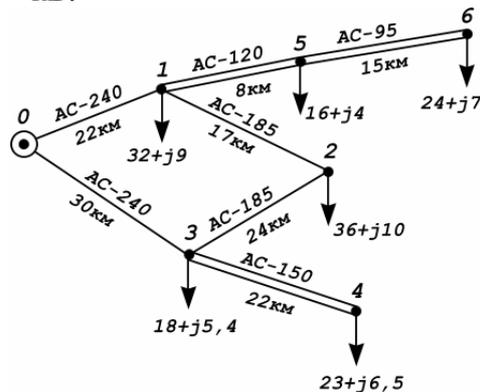
№3

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j8}$ кВ.



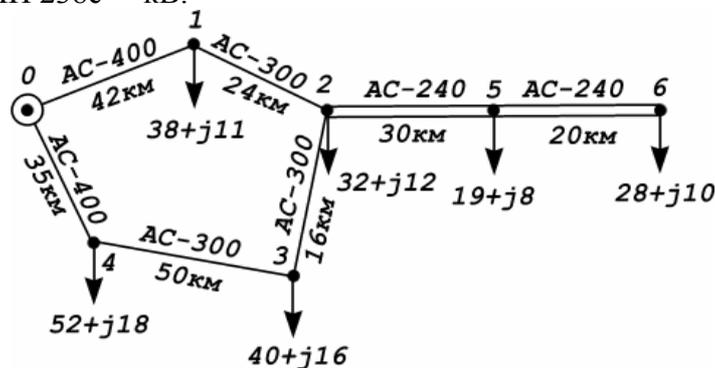
№4

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j10}$ кВ.



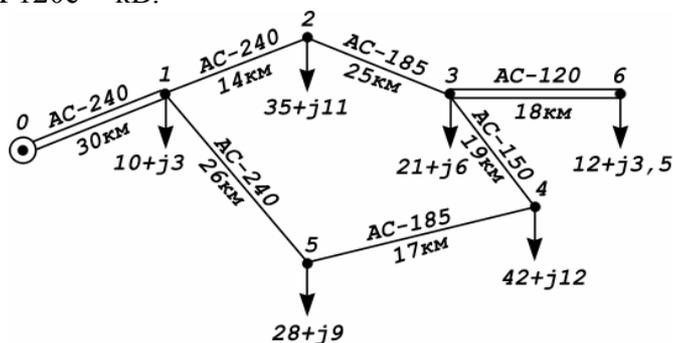
№5

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $238e^{j17}$ кВ.



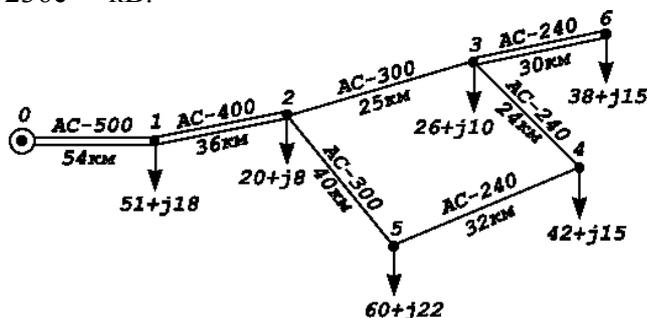
№6

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j9}$ кВ.



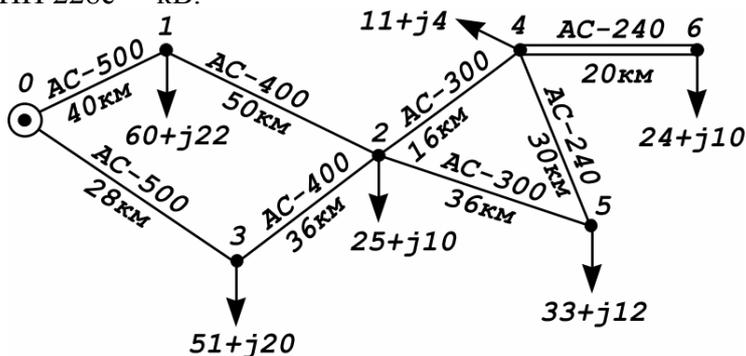
№7

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $236e^{j16}$ кВ.



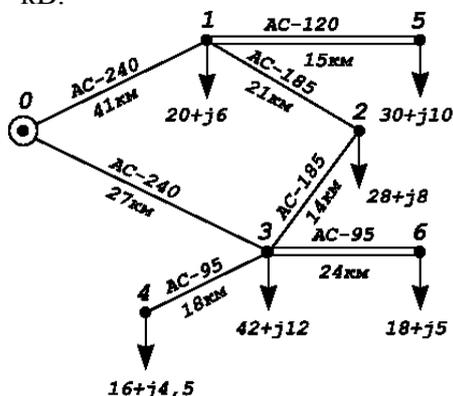
№8

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $228e^{j18}$ кВ.



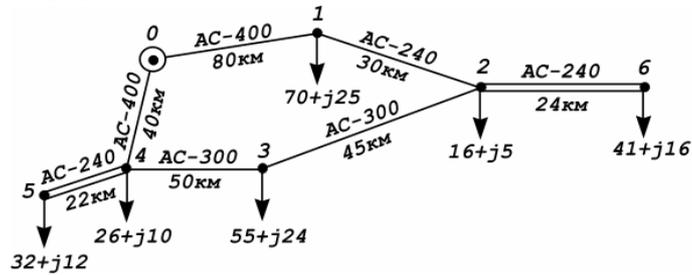
№9

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $117e^{j12}$ кВ.



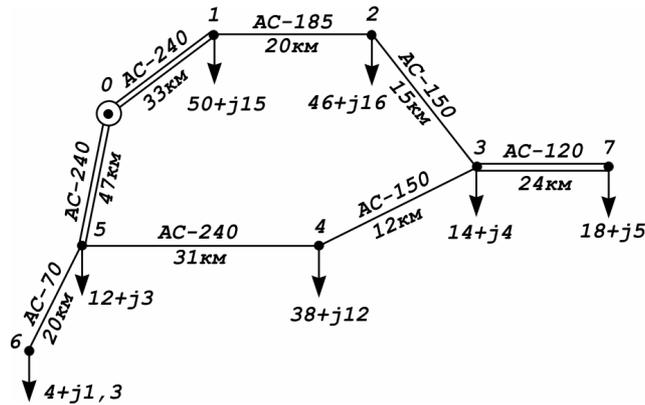
№10

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $237e^{j12}$ кВ.



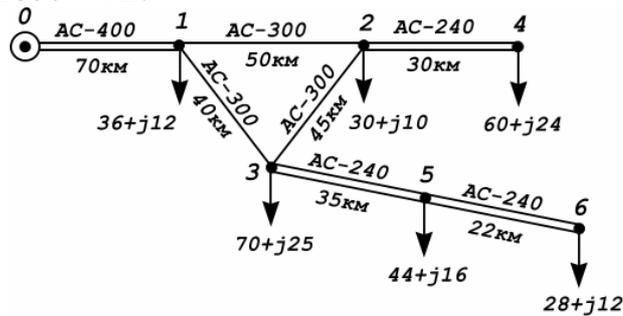
№11

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j14}$ кВ.



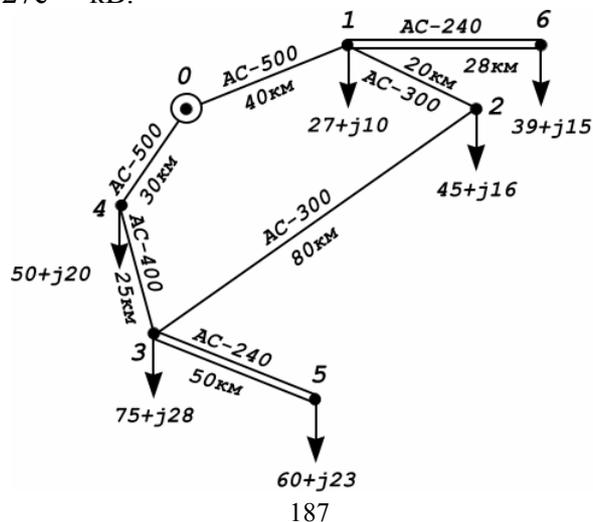
№12

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $235e^{j15}$ кВ.



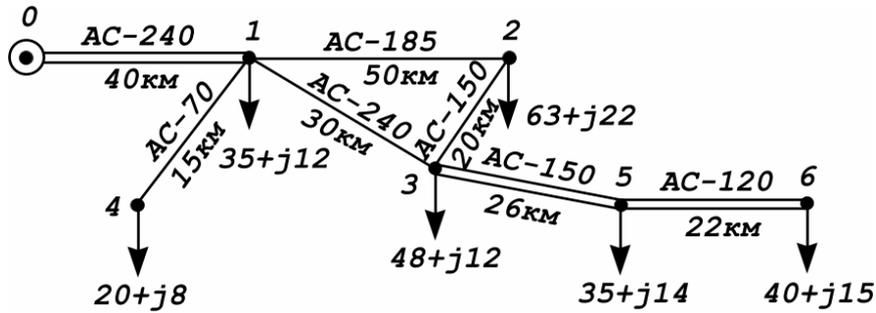
№13

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $227e^{j20}$ кВ.



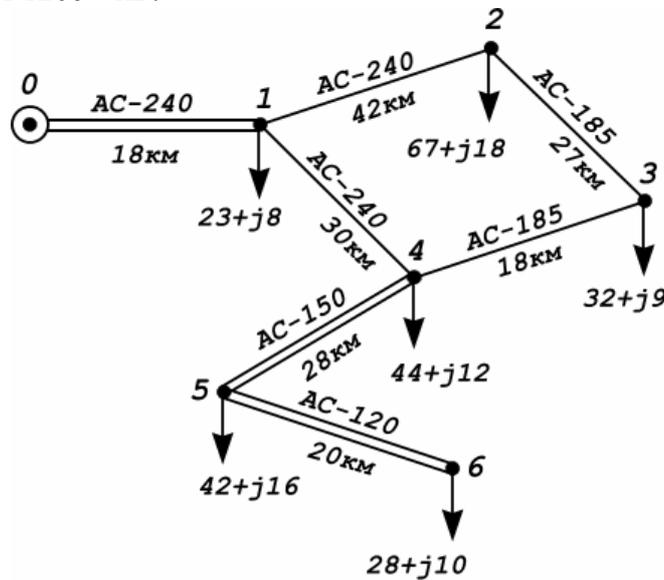
№14

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j8}$ кВ.



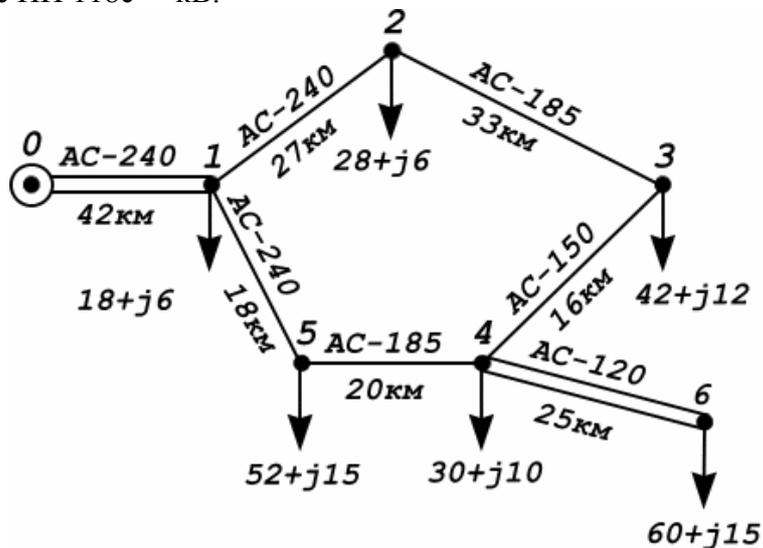
№15

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j7}$ кВ.



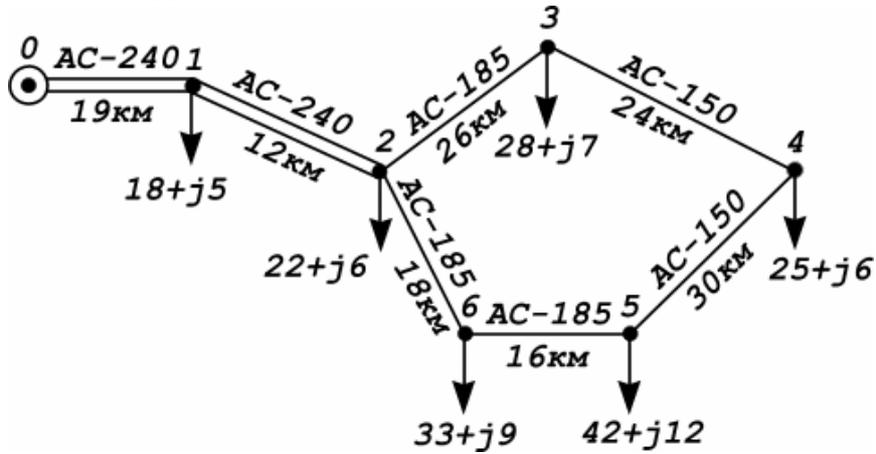
№16

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $118e^{j10}$ кВ.



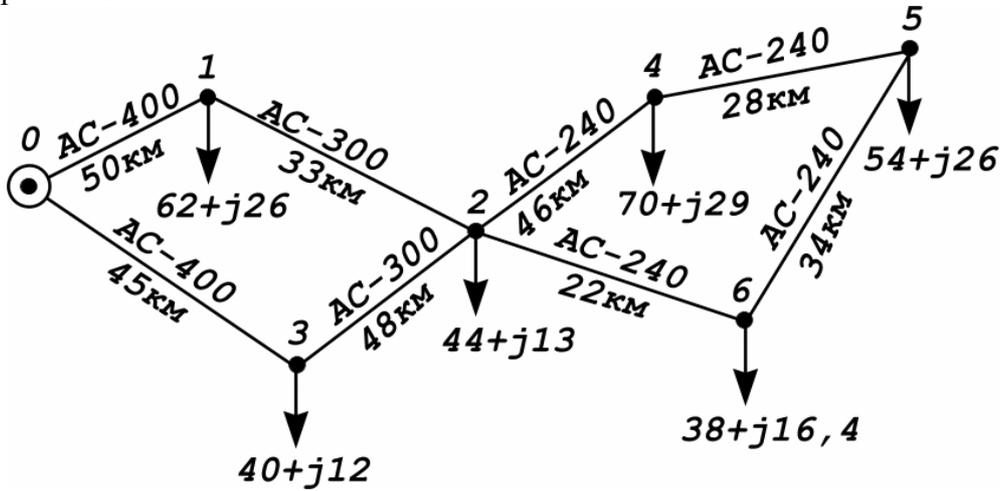
№17

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $116e^{j^8}$ кВ.



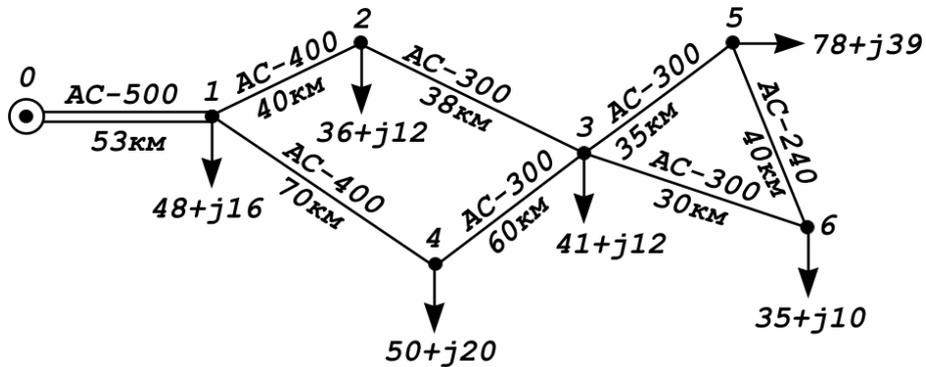
№18

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $224e^{j^{16}}$ кВ.



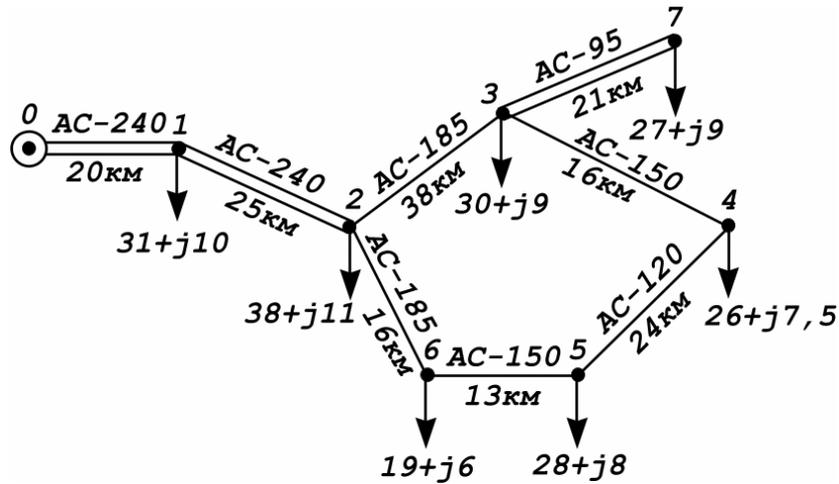
№19

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $222e^{j^{18}}$ кВ.



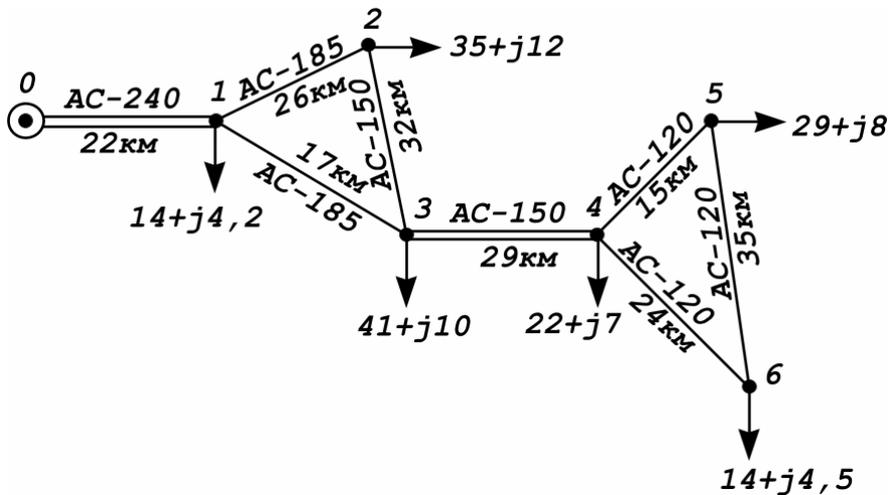
№20

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j7}$ кВ.



№21

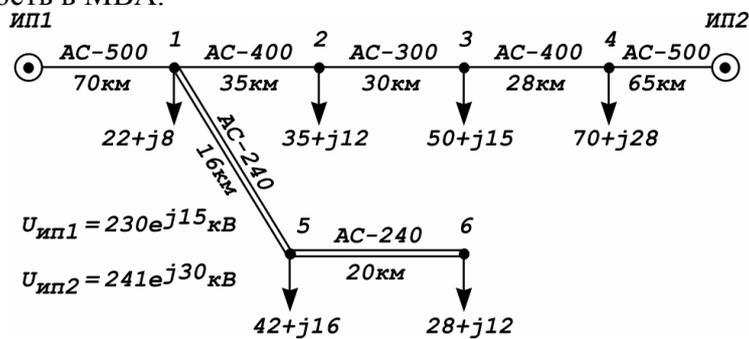
Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j9}$ кВ.



Тема 6

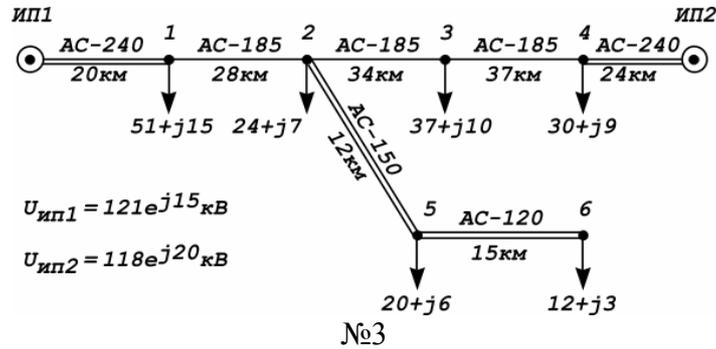
№1

Рассчитать установившийся режим в схеме, приведенной на рисунке. В узлах задана приведенная мощность в МВА.

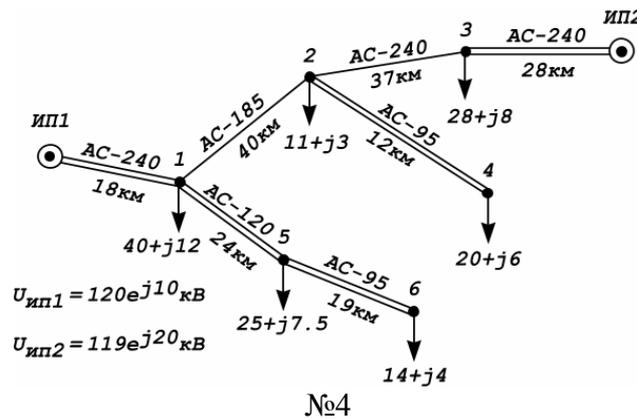


№ 2

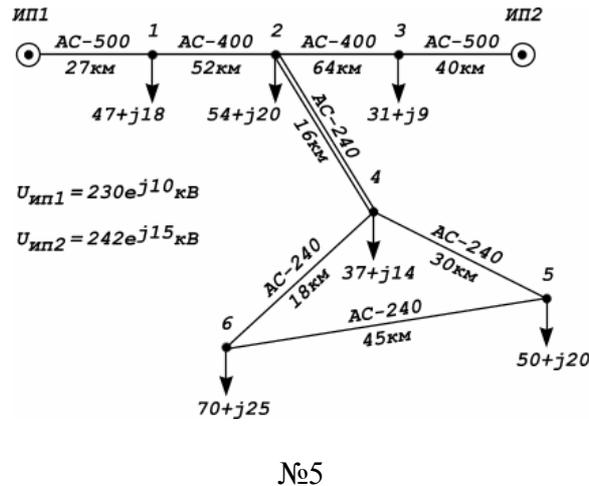
Рассчитать потокораспределение мощности и напряжения в узлах сети. Нагрузки заданы в МВА.



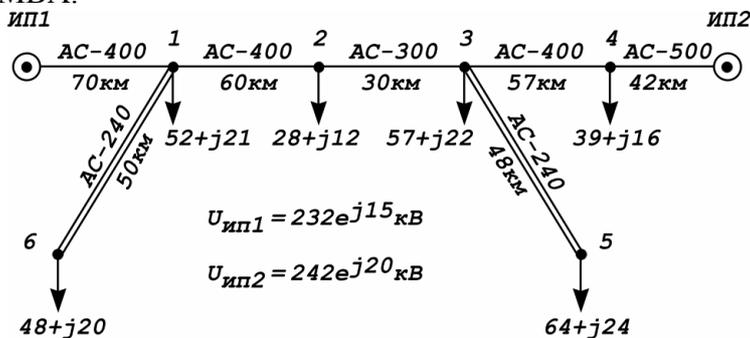
Рассчитать установившийся режим в сети. В узлах заданы приведенные нагрузки в МВА.



Рассчитать установившийся режим в сети. В узлах заданы приведенные мощности нагрузок в МВА.

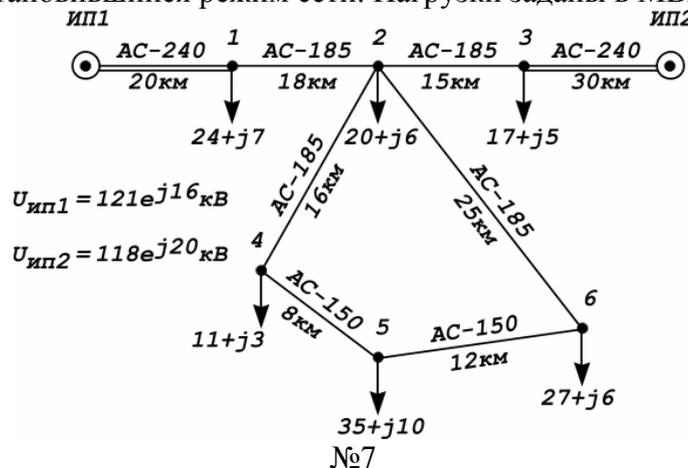


Рассчитать установившийся режим сети, схема которой приведена на рисунке. Нагрузки заданы в МВА.

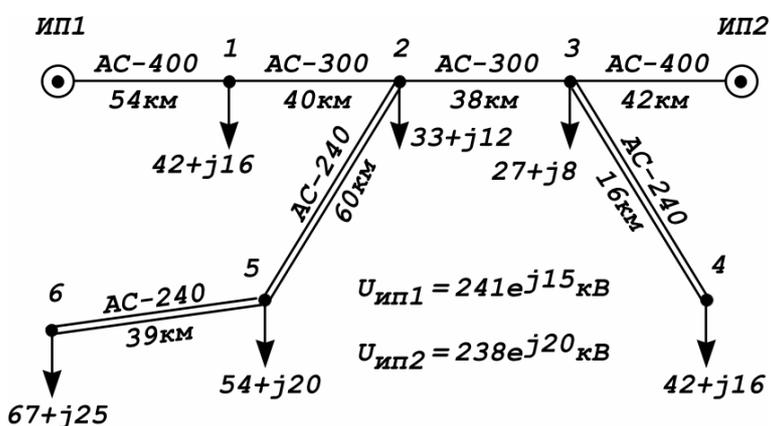


№6

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.

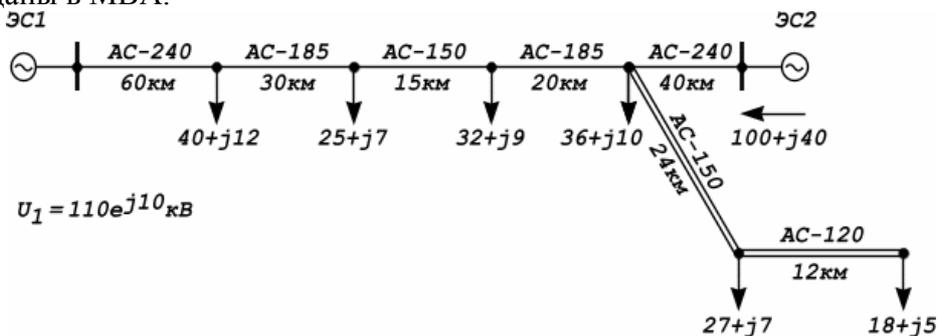


Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



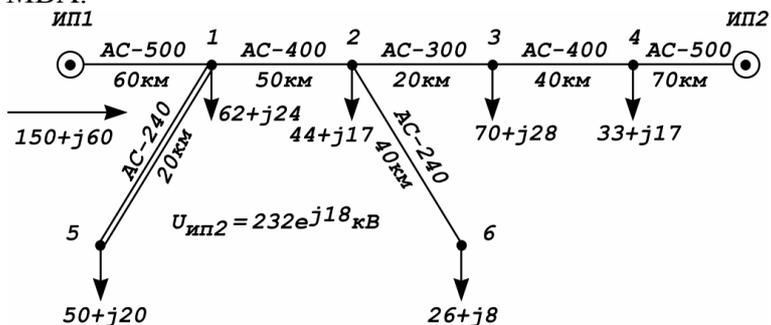
№8

Определить напряжение на шинах электростанции 2 и потоки мощности в сети. Нагрузки заданы в МВА.



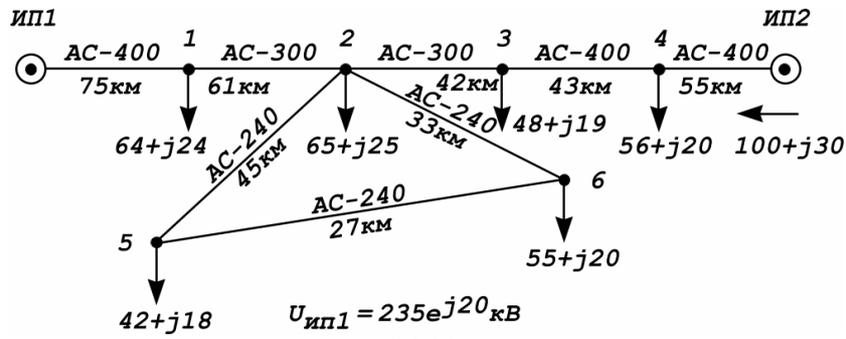
№9

Рассчитать потокораспределение мощности в сети и напряжение у первого ИП. Нагрузки заданы в МВА.



№10

Рассчитать установившийся режим в сети и напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.

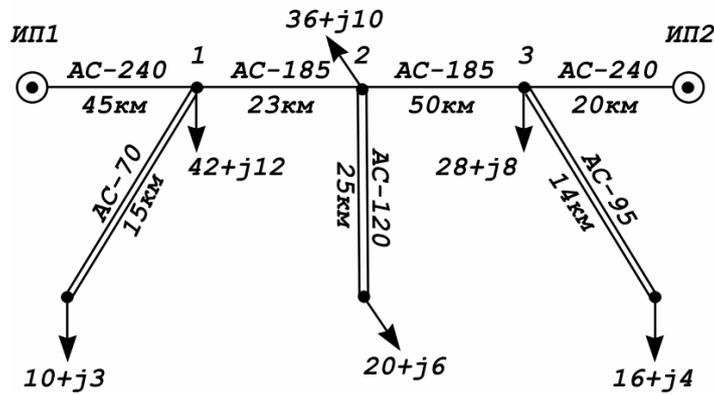


№11

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.

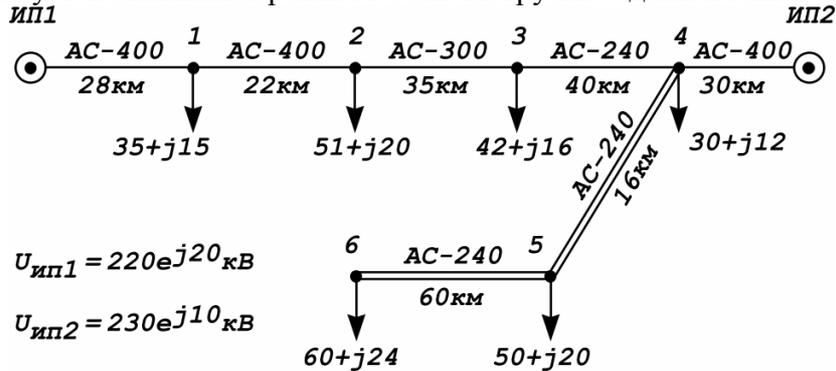
$$U_{ИП1} = 121e^{j15} \text{ кВ}$$

$$U_{ИП2} = 118e^{j10} \text{ кВ}$$



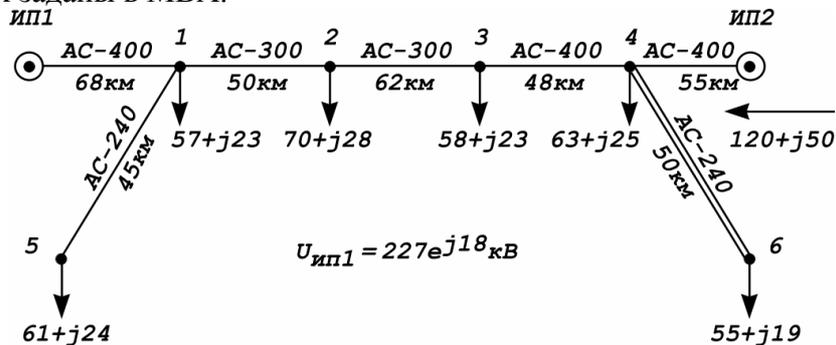
№12

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



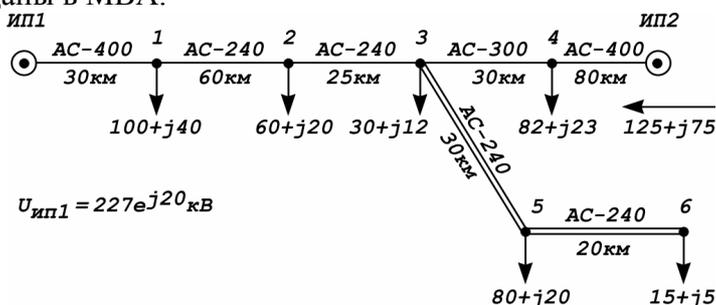
№ 13

Рассчитать установившийся режим в сети. Определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



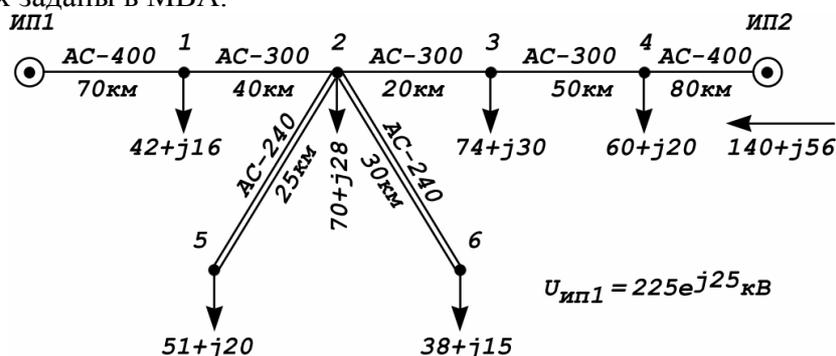
№ 14

Рассчитать установившийся режим в сети. Определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



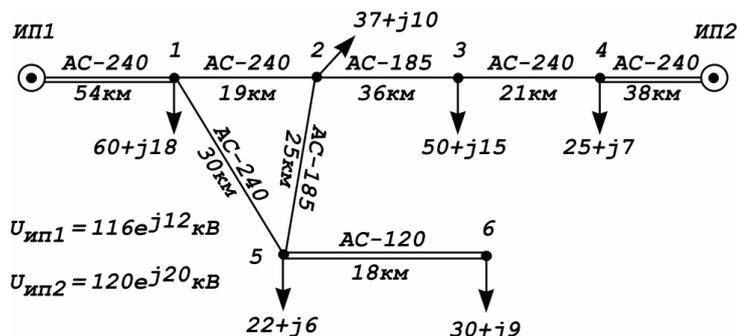
№15

Рассчитать установившийся режим в сети и определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



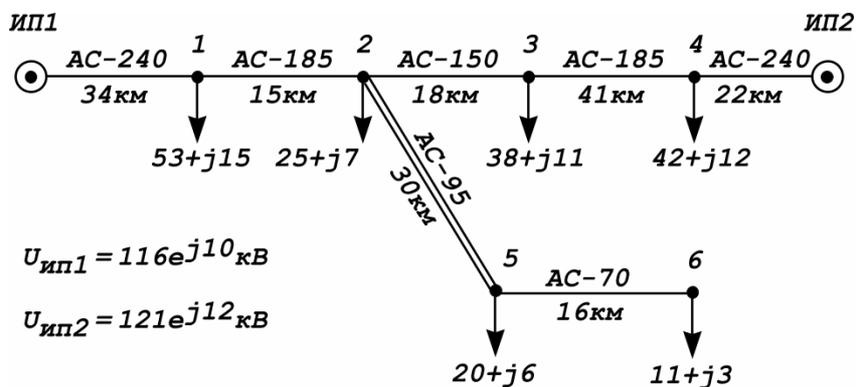
№16

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



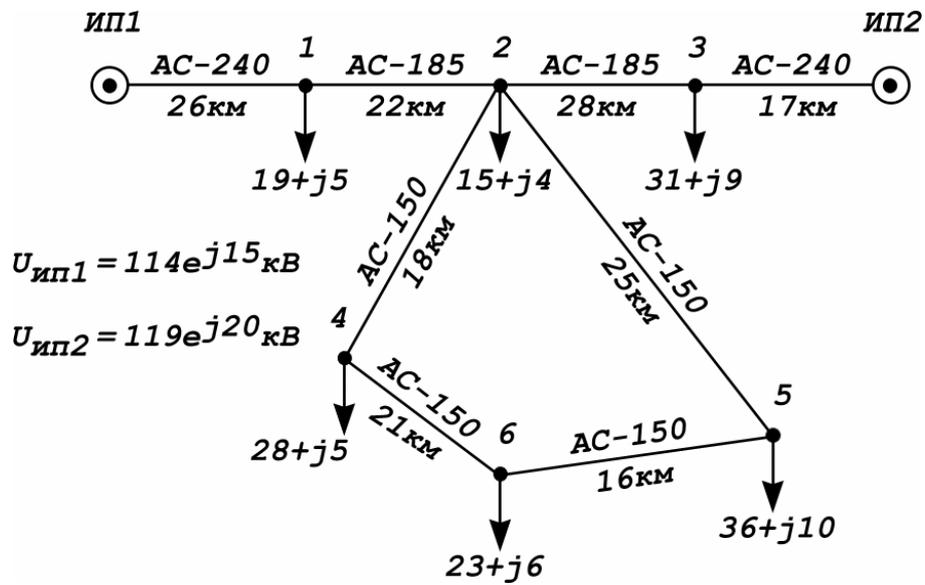
№ 17

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



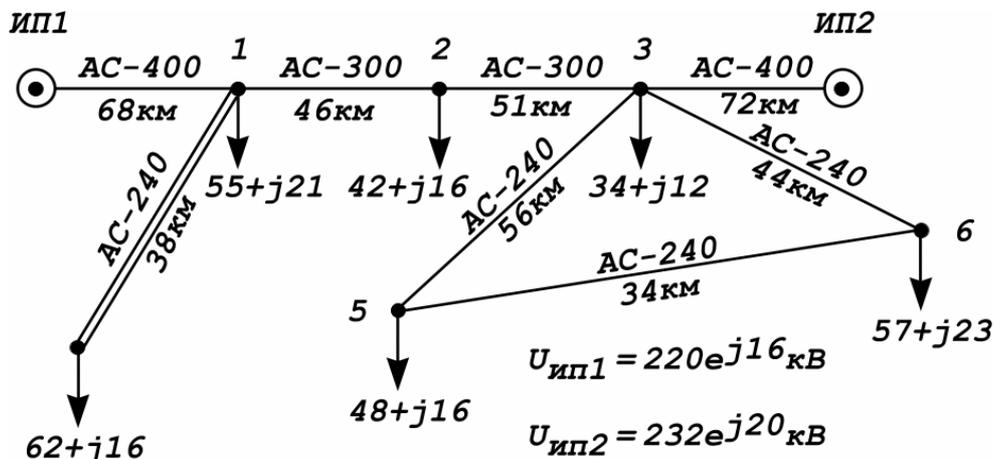
№18

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



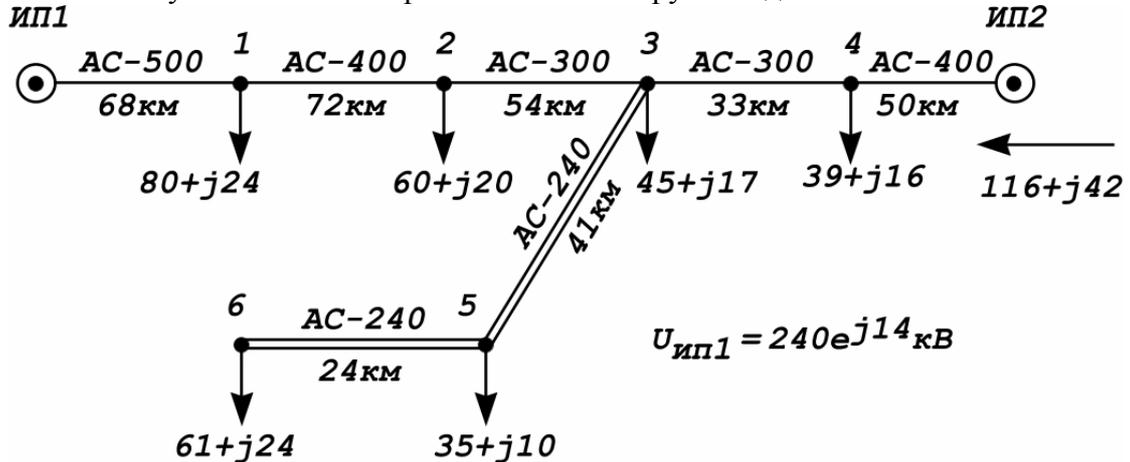
№19

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



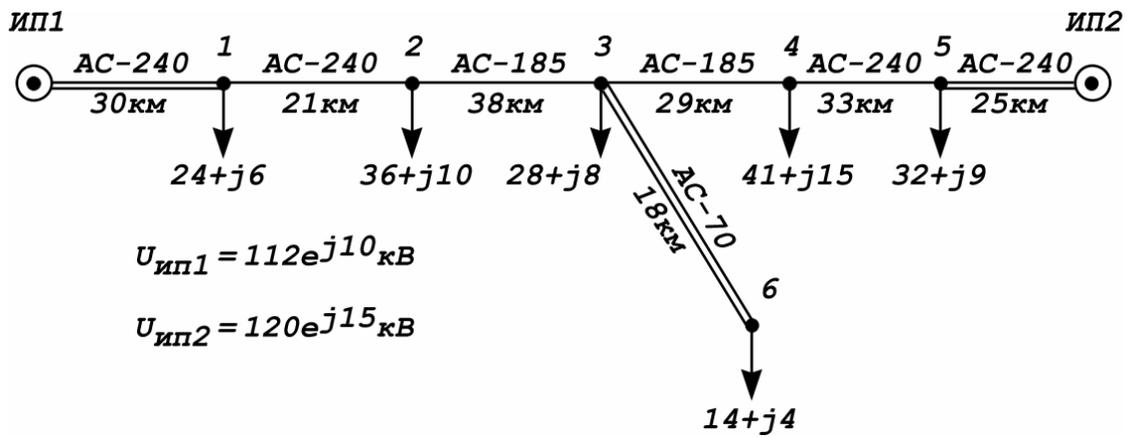
№20

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



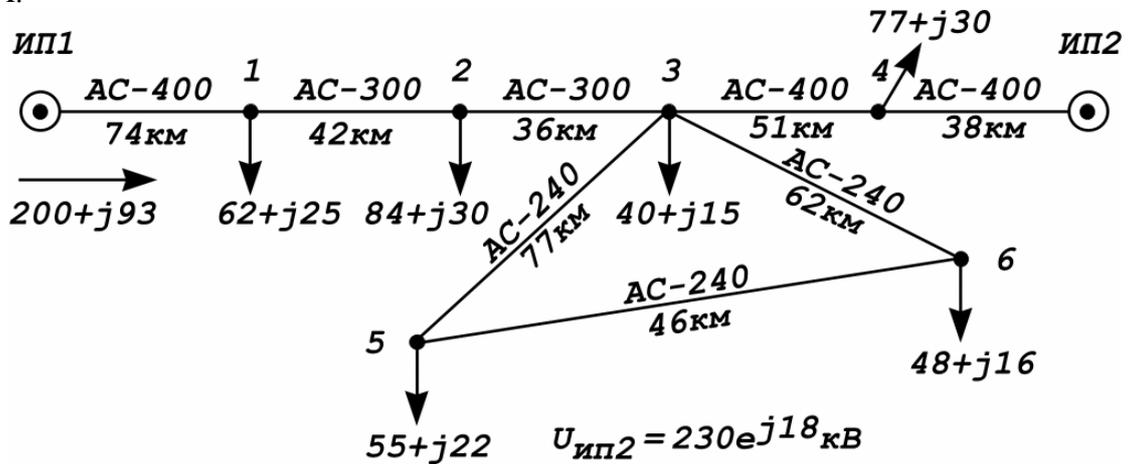
№21

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



№ 22

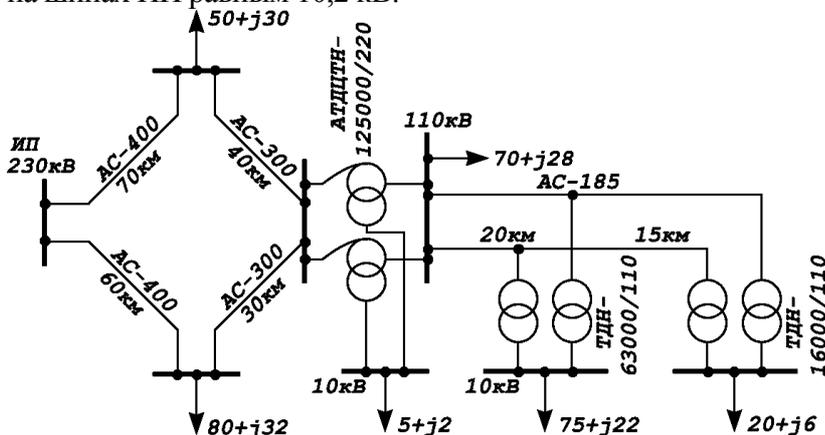
Рассчитать установившийся режим в сети и напряжение первого ИП. Нагрузки заданы в МВА.



Тема 7

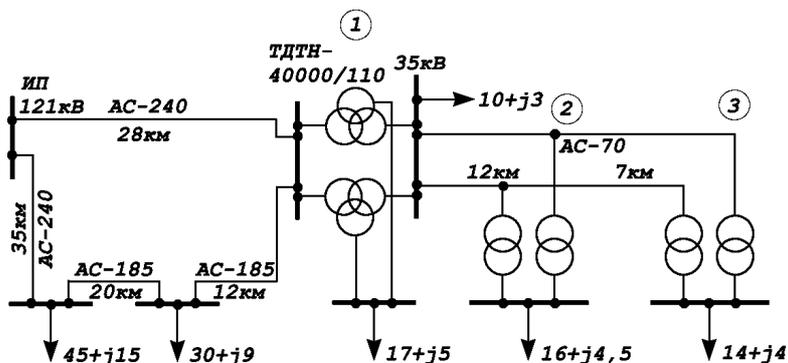
№ 1

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать отпайки РПН автотрансформатора для поддержания напряжения на шинах СН равным 116 кВ, на шинах НН – 10,5 кВ и трансформатора ТДН – 63000/110 для поддержания напряжения на шинах НН равным 10,2 кВ.



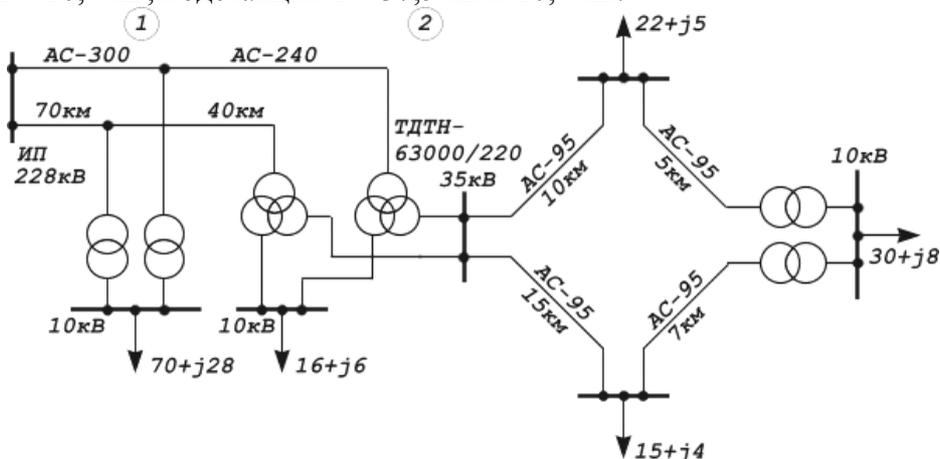
№ 2

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать отпайки РПН трансформаторов подстанций 1 и 3 для поддержания на шинах подстанции 1 следующих уровней напряжения: 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 3 – 10,3 кВ.



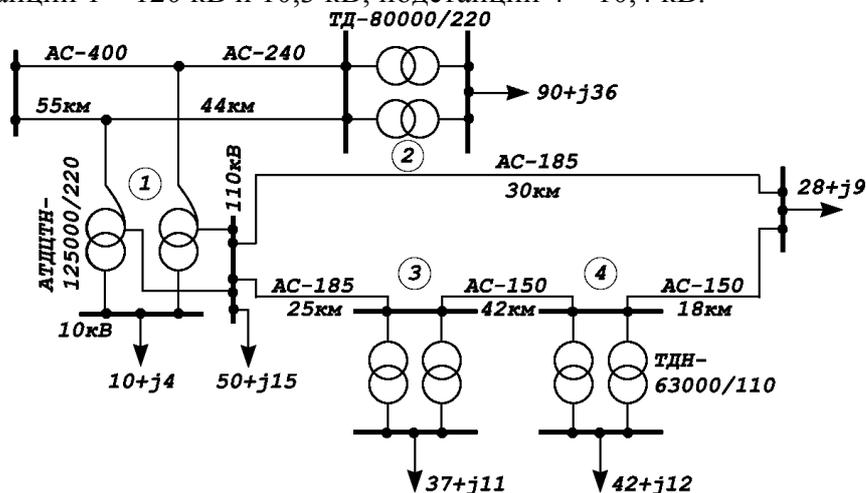
№ 3

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпайек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 10,4 кВ; подстанции 2 – 37,5 кВ и 10,4 кВ.



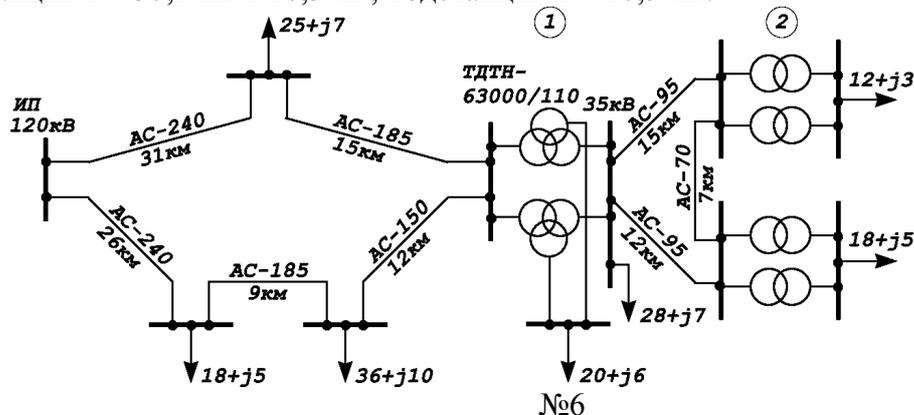
№ 4

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпайек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,3 кВ; подстанции 4 – 10,4 кВ.

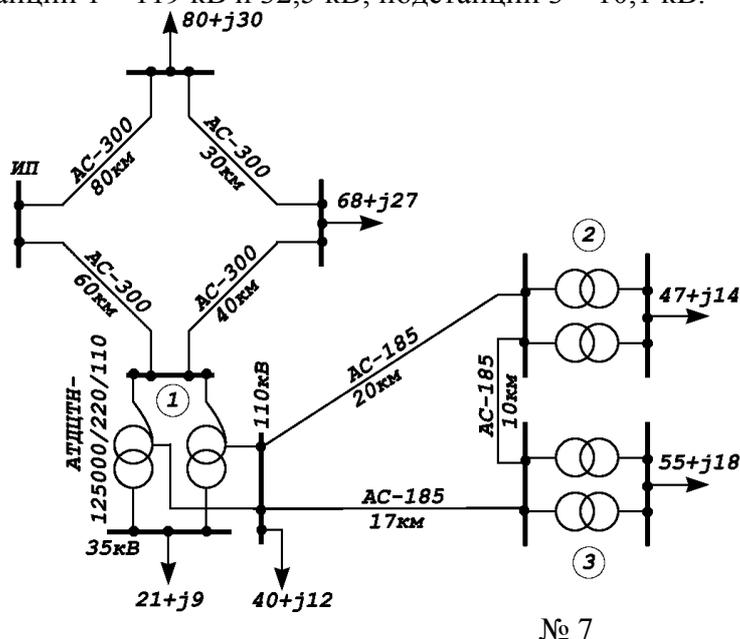


№ 5

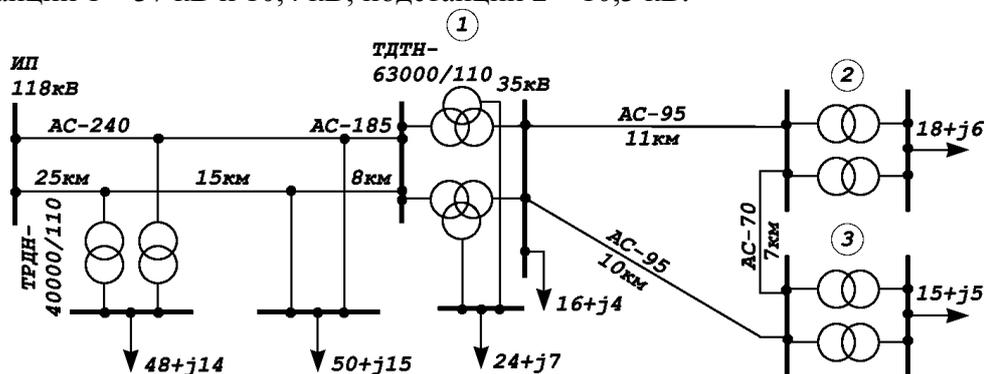
Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,5 кВ.



Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 32,5 кВ; подстанции 3 – 10,1 кВ.

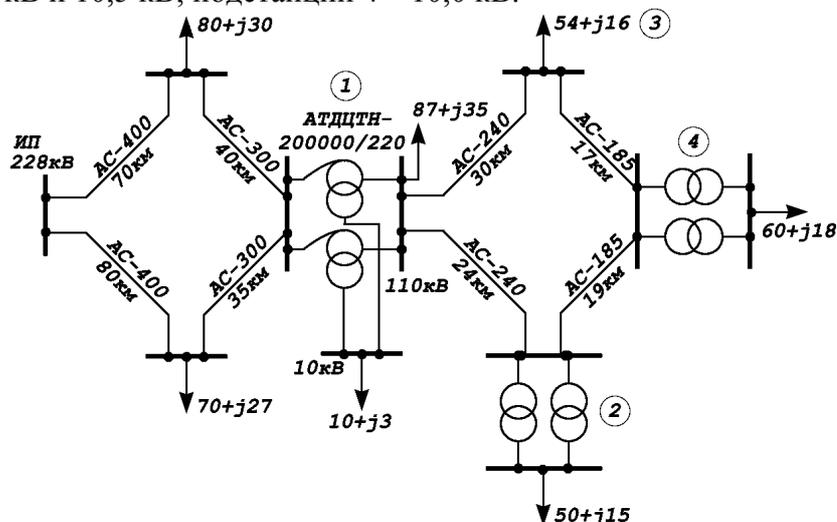


Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



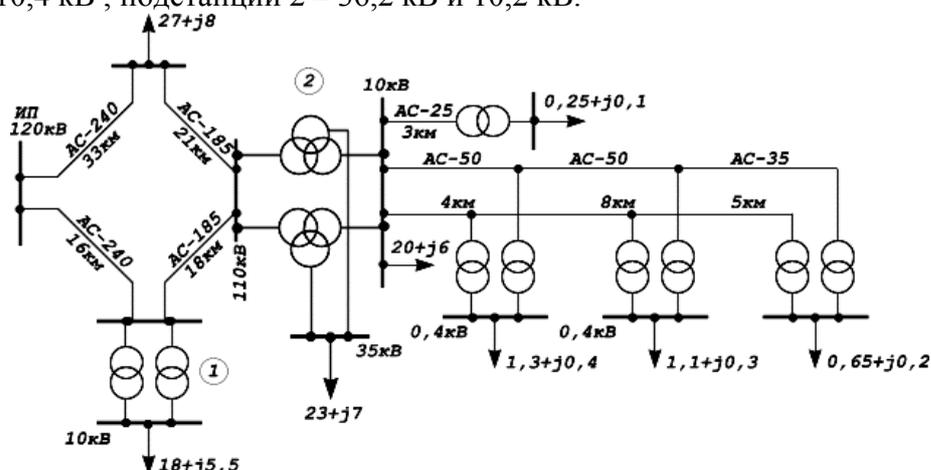
№ 8

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 121 кВ и 10,5 кВ; подстанции 4 – 10,0 кВ.



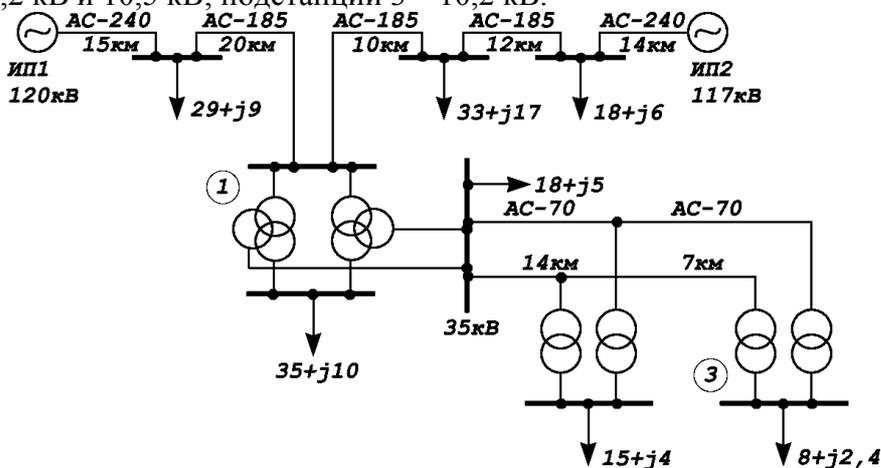
№ 9

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 10 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 10,4 кВ ; подстанции 2 – 36,2 кВ и 10,2 кВ.



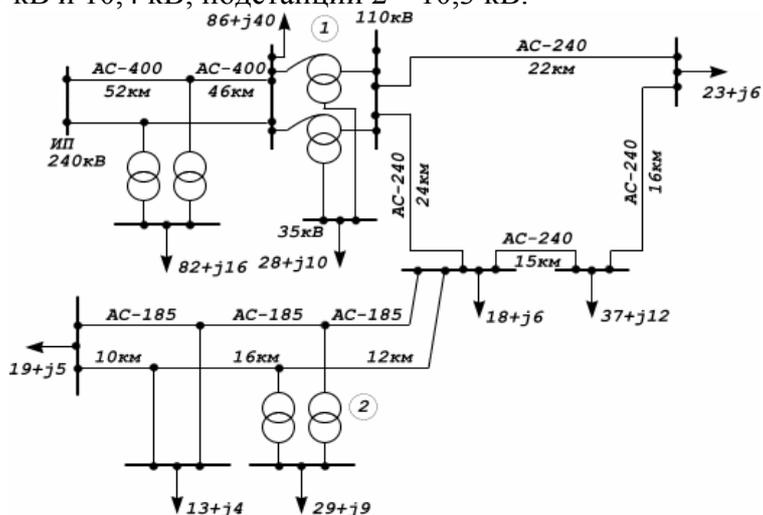
№ 10

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,2 кВ.



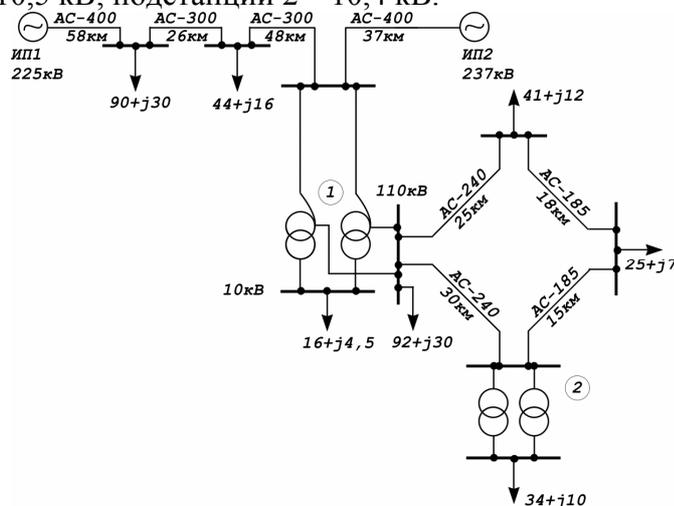
№14

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



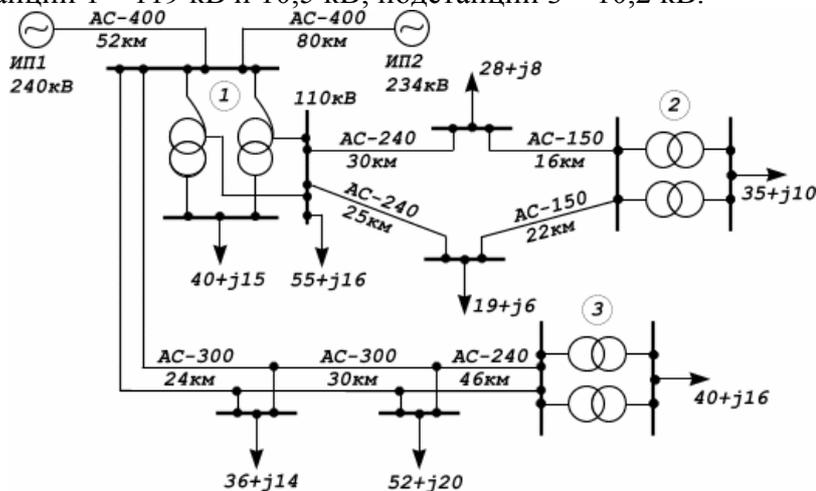
№ 15

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 118 кВ и 10,5 кВ; подстанции 2 – 10,4 кВ.



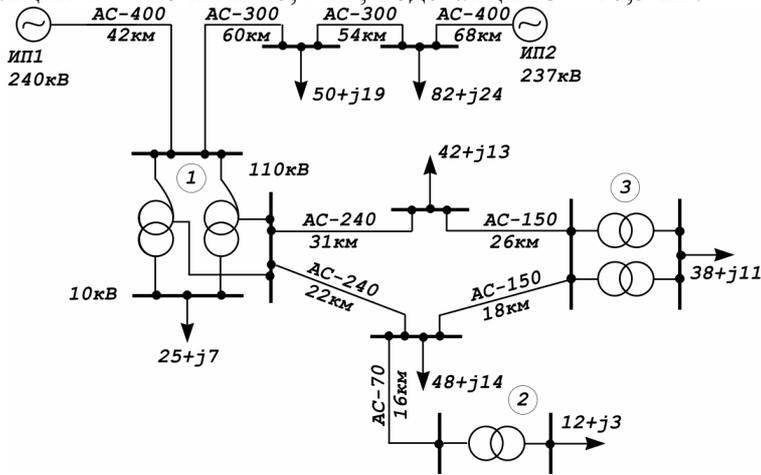
№ 16

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,2 кВ.



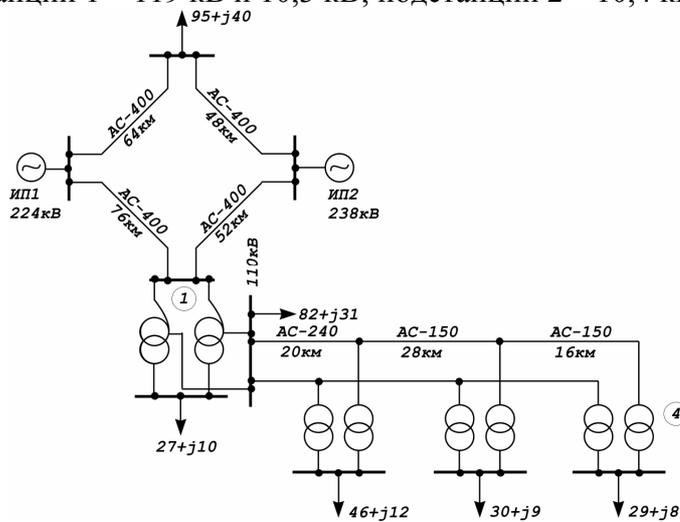
№ 17

Расчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 116 кВ и 10,4 кВ; подстанции 3 – 10,5 кВ.



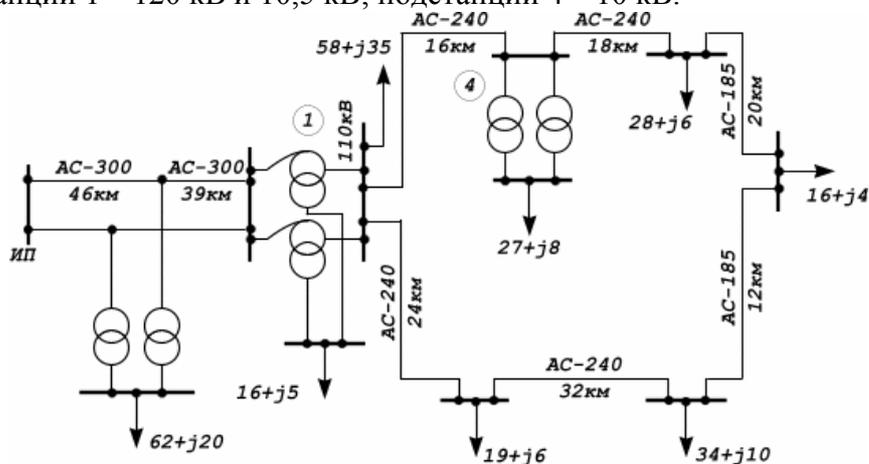
№ 18

Расчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,4 кВ.



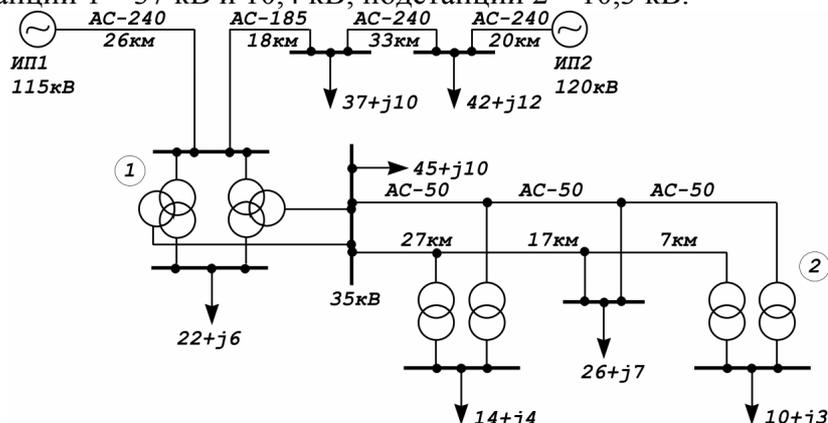
№ 19

Расчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,5 кВ; подстанции 4 – 10 кВ.



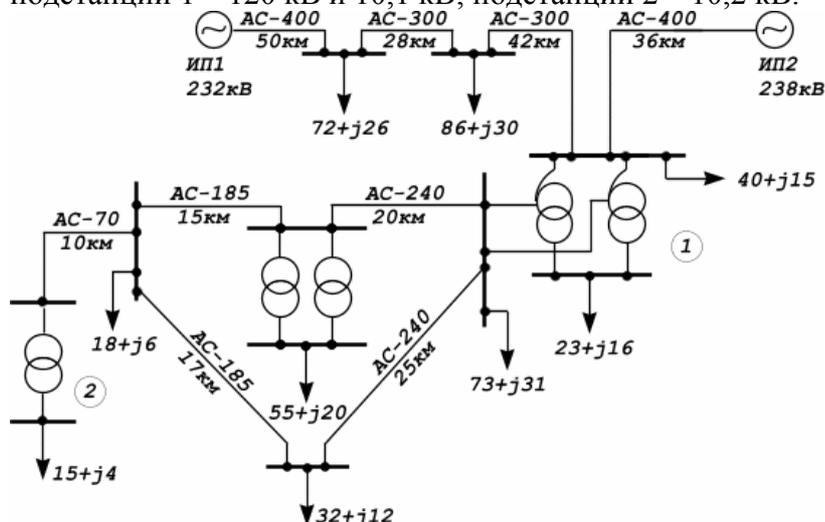
№ 20

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



№21

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,1 кВ; подстанции 2 – 10,2 кВ.



Задания на контрольную работу студентов заочной и сокращенной форм обучения также формируются из подобных заданий.

6. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины

При изучении данной дисциплины целесообразно пользоваться следующими программными продуктами: MathCad; Visio; СДО-6; RASTR; Exsel.

Все выше перечисленные ПВК широко используются в практической деятельности выпускников и изучаются ранее.

Методические указания по данным программным продуктам изложены в УМКД дисциплин «Информатика», «Пакеты прикладных программ», поэтому в данном УМКД не приводятся.

7. Методические указания по применению современных информационных технологий

Состав информационных технологий, используемых при изучении данной дисциплины:

1. Презентации лекций, слайды, каталоги с техническими характеристиками оборудования – 3 компакт диска.
2. Электронные варианты электрических схем энергетических компаний Дальневосточного региона.
3. Схемы, рисунки, таблицы под медиакомплекс.
4. Лазерные пленки к проектоскопу – 16 штук.
5. Комплект индивидуальных заданий по дисциплине: домашних и выдаваемых на лекциях.
6. Промышленные программно-вычислительные комплексы «СДО-6», "RASTR", пакет автоматизации математических расчетов «MathCad».
7. Презентации практических занятий.
8. Электронный подбор материалов по тематике «Конструктивное исполнение воздушных и кабельных линий».
9. Электронные варианты учебников и учебных пособий в библиотеке кафедры.
10. Справочные материалы.

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 стилизового 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.

8. Контроль качества образования

8.1. 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, 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 должен включать два теоретических вопроса 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.

8.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний

Тестовые задания для оценки качества знаний по дисциплине «Электроэнергетика. Передача и распределение электроэнергии» утверждены в 2006 г. в УМО в области энергетики и электротехники.

Аннотация к контрольным заданиям по дисциплине цикла ОПД *"Передача и распределение электроэнергии"*

При формировании пятилетних учебных планов УМС направления 650900 – «Электроэнергетика» Амурского государственного университета принял решение дисциплину «Электроэнергетика» (ОПД.Ф.08) читать в виде цикла дисциплин, к которому относятся: «Производство электроэнергии»; «Передача и распределение электроэнергии», «Электроснабжение», «Изоляция и перенапряжение» (в данную дисциплину включены также часы национально-регионального компонента цикла ОПД), а материал, относящийся к части «Релейная защита и автоматизация», перенести в дисциплины специализаций.

Контрольные задания по дисциплине "Передача и распределение электроэнергии" (электроэнергетика, ОПД.Ф.08) выполнены в виде тестов.

Представлено 6 вариантов тестовых заданий.

Каждый вариант включает 20 заданий. При разработке тестов использовались следующие формы:

- а) открытого типа "Дополнить";
- б) закрытая с одним правильным ответом;
- в) на установление правильной последовательности;
- г) задание с несколькими правильными ответами типа: "Подчеркнуть относящиеся к...".

Время, отводимое на выполнение всех заданий, составляет два часа аудиторных занятий или 1 час 30 мин астрономического времени тестирования.

При оценке результатов студентов оценка:

- "отлично" соответствует более 15 правильных ответов;
- "хорошо" - более 10 до 15 включительно правильных ответов;
- "удовлетворительно" - 10 правильных ответов;
- "неудовлетворительно" - менее 10 правильных ответов;

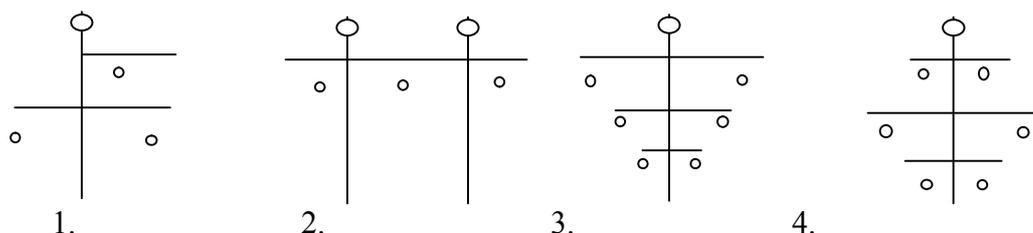
Тесты разработаны зав. кафедрой "Энергетики" Амурского государственного университета, канд.техн.наук, доцентом Савиной Н.В.

Вариант № 1

1. ДОПОЛНИТЬ:

Энергетическая система состоит из: _____

2. Выбрать расположение проводов на опоре бочкой:



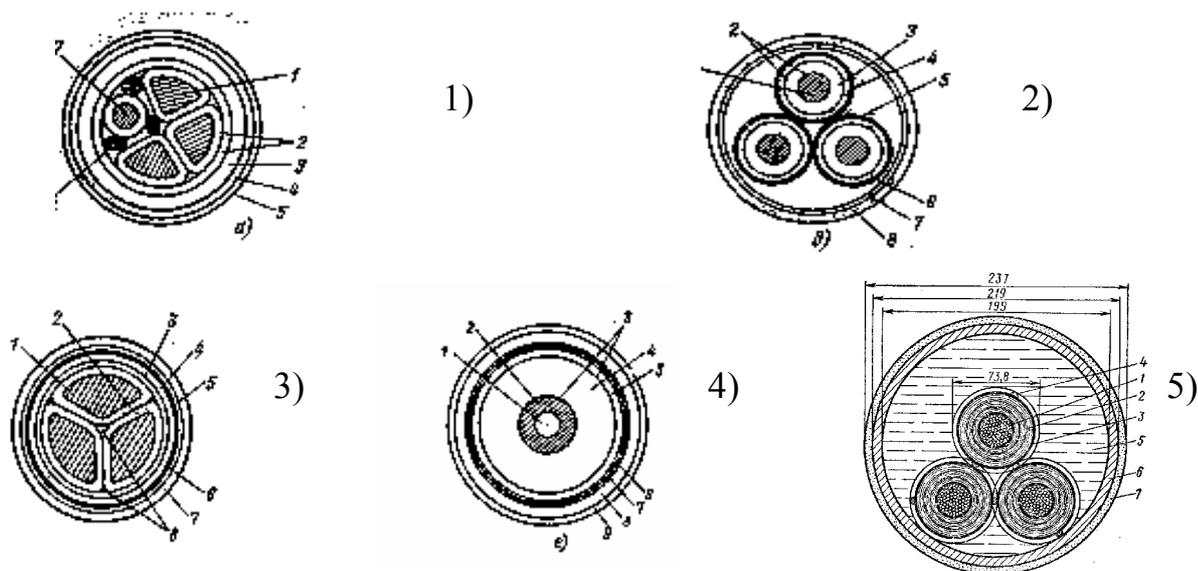
3. ДОПОЛНИТЬ:

Основными конструктивными элементами ВЛ являются: _____

4. Выбрать марки кабеля с алюминиевыми жилами, с бумажной изоляцией:

- | | | |
|---------|-------------|----------|
| 1. ААБ | 4. АВБбШв | 7. АПвП |
| 2. ААШв | 5. АРВГ | 8. МНАШв |
| 3. МВД | 6. СБ2ЛГУ-В | 9. МНС |

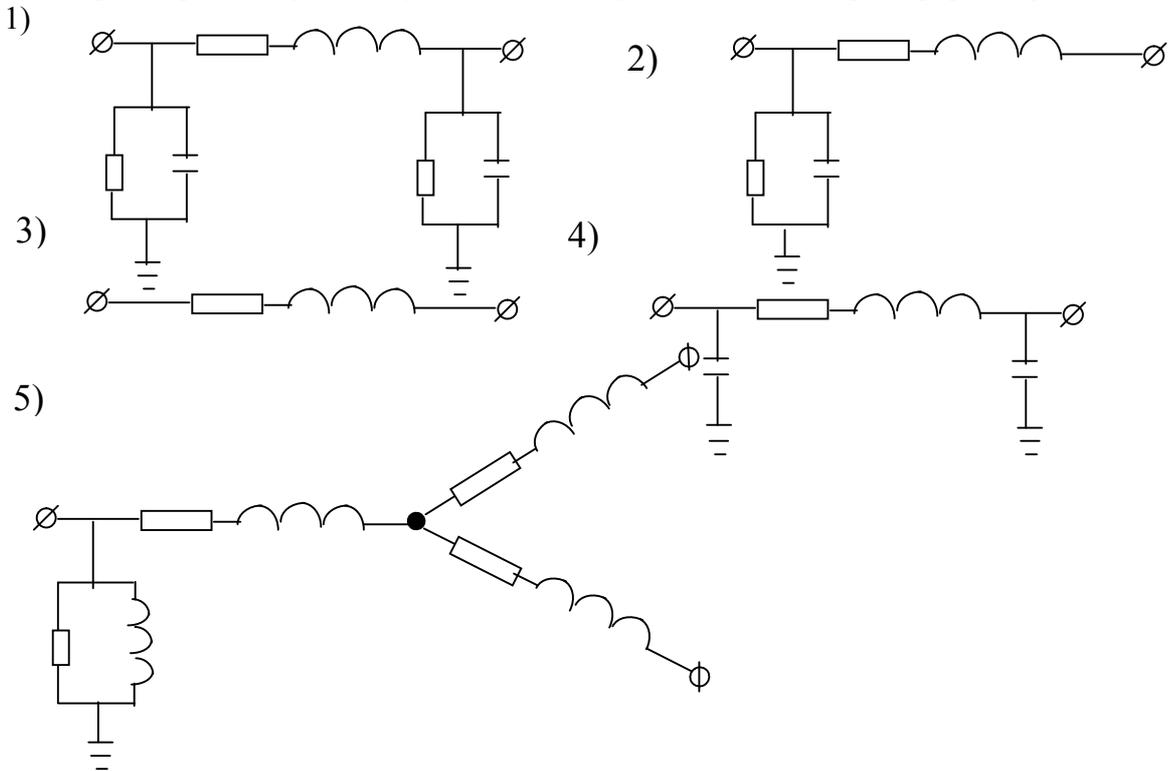
5. Выбрать из приведенных на рис. четырехжильный кабель напряжением до 1кВ:



6. Нормальному установившемуся режиму соответствует следующая часть статической характеристики $Q_H(U)$.

1. правая 2. левая 3. точка минимума

7. Выбрать правильную схему замещения двухобмоточного трансформатора:



8. При расчетах режимов электрических сетей и систем нагрузка задается постоянным током в:

1. низковольтных распределительных сетях;
2. распределительных сетях высокого напряжения;
3. питающих сетях;
4. системообразующих сетях.

9. Потеря напряжения - это:

1. геометрическая разность между комплексами напряжения начала и конца линии;
2. алгебраическая разность между модулями напряжения начала и конца линии;
3. поперечная составляющая падения напряжения.

10. Выбрать правильное выражение для определения падения напряжения линии при расчете по данным конца:

- 1)
$$U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^R X_{12}}{U_1} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_1}$$
- 2)
$$U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^R X_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2}$$
- 3)
$$U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^K X_{12} + Q_{12}^R R_{12}}{U_2} - j \frac{P_{12}^K R_{12} - Q_{12}^K X_{12}}{U_2}$$

11. Определить правильную последовательность расчета режима по данным конца:

- определить падение напряжения на последнем участке сети
- определить потери мощности в последнем участке сети
- рассчитать зарядную мощность трех фаз в конце последнего участка сети
- определить мощность в начале последнего участка сети
- определить расчетную нагрузку последнего узла
- определить потери мощности в последнем участке сети
- определить напряжение предпоследнего узла

12. Выбрать правильную формулу для расчета потерь мощности по данным конца :

1) $\Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^k)^2 + (Q_{12}^k)^2}{U_2^2} (R_{12} + jX_{12})$

2) $\Delta S_{12} = \frac{P_{12}^k R_{12} + Q_{12}^k X_{12}}{U_2} (P_{12} + jQ_{12})$

3) $\Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^k)^2 + (Q_{12}^k)^2}{U_1^2} (R_{12} + jX_{12})$

13. Расчетная нагрузка подстанции - это:

- 1) мощность нагрузки на низкой стороне трансформатора
- 2) мощность нагрузки на высокой стороне трансформатора
- 3) мощность нагрузки с учетом потерь мощности в трансформаторе и зарядной мощности линий

14. В двухобмоточном трансформаторе устройство РПН устанавливается на:

- 1) низкой стороне трансформатора, а регулируется напряжение на стороне ВН трансформатора
- 2) высокой стороне трансформатора, а регулируется напряжение на стороне НН трансформатора
- 3) высокой стороне трансформатора, а регулируется напряжение на стороне ВН трансформатора

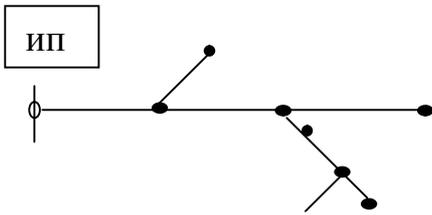
15. ДОПОЛНИТЬ:

Капитальные вложения включают в себя: _____

16. В распределительных сетях напряжением до 35 кВ сечение выбирается из условия минимума потерь мощности:

- 1) в городских сетях
- 2) в сетях промышленных предприятий
- 3) в сетях сельскохозяйственного назначения

17. Приведенная на рисунке схема является:



- 1) магистральной нерезервированной
- 2) магистральной резервированной
- 3) радиально нерезервированной
- 4) радиально резервированной
- 5) радиально-магистральной нерезервированной
- 6) радиально-магистральной резервированной

18. Приведенная на рисунке схема замкнутой сети является:

- 1) одноцепная линия с двухсторонним питанием



- 2) одноцепная кольцевая
- 3) одноцепная петлевая
- 4) двухцепная с двухсторонним питанием
- 5) двухцепная кольцевая
- 6) двухцепная петлевая

19. ДОПОЛНИТЬ:

Тупиковая подстанция присоединяется к сети _____

20. Выбрать номинальную мощность трансформатора двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ для питания нагрузки:

$P = 11 \text{ МВт}$; $Q = 4 \text{ Мвар}$

- | | |
|------------|-----------|
| 1) 10 МВА | 3) 16 МВА |
| 2) 6,3 МВА | 4) 25 МВА |

Вариант № 2

1. ДОПОЛНИТЬ:

Энергетическая система включает в себя: _____

2. ВЫБРАТЬ МАРКИ ПРОВОДОВ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ ИЗ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ:

- | | | | |
|--------|--------|-------|---------|
| 1. А | 3. АН | 5. АЖ | 7. АСКП |
| 2. АКП | 4. АСК | 6. АС | 8. АСКС |

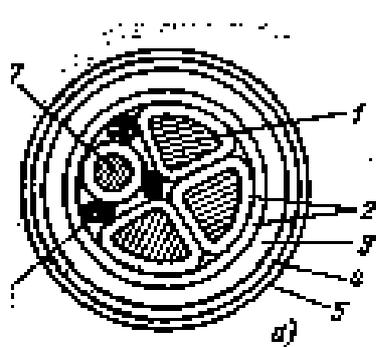
3. ДОПОЛНИТЬ:

К линейной арматуре относятся: _____

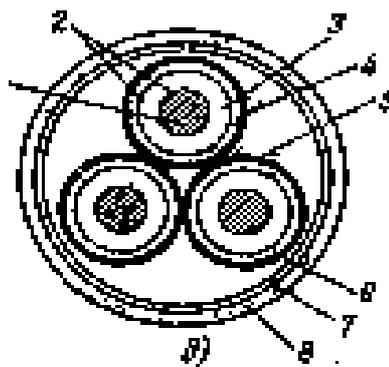
4. Выбрать правильную последовательность формирования марки кабеля:

- изоляция
- оболочка
- жила
- броня
- покров
- подушка под броней

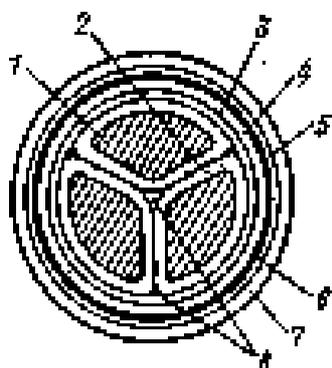
5. Выбрать из приведенных на рис. кабель напряжением 10 кВ:



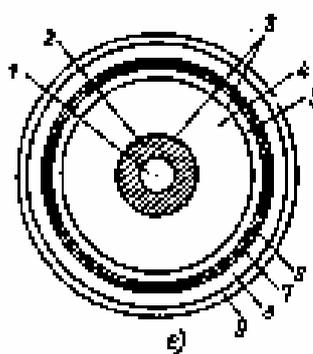
1)



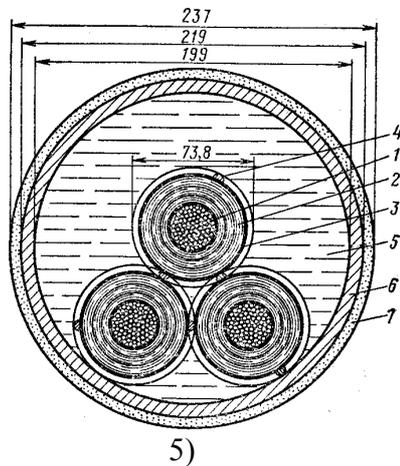
2)



3)



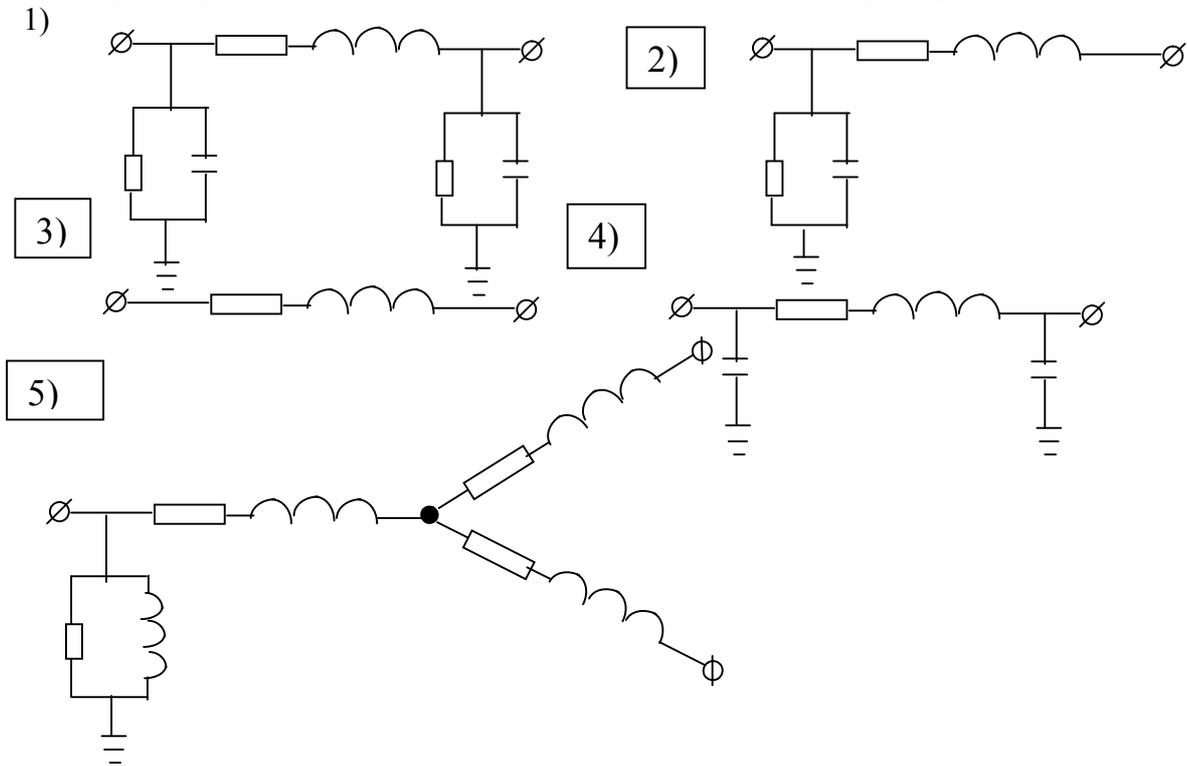
4)



6. Регулирующий эффект нагрузки численно характеризуется:

1. $\frac{dP_H}{dU}$
2. $\frac{d^2 P_H}{dU}$
3. $\frac{dS_H}{dU}$
4. $\frac{dP_H}{dt}$
5. $\frac{d^2 P_H}{dt}$

7. Выбрать правильную схему замещения трехобмоточного трансформатора:



8. При расчетах режимов электрических сетей и систем нагрузка задается постоянной мощностью в:

- 1) низковольтных распределительных сетях
- 2) питающих сетях, при поддержании напряжения постоянным
- 3) питающих сетях с напряжением отличным от номинального
- 4) распределительных сетях напряжением выше 1кВ при его отличии от номинального.

9. Падение напряжения - это:

- 1) геометрическая разность между комплексами напряжения начала и конца линии
- 2) арифметическая разность между напряжениями начала и конца линии
- 3) геометрическая разность между напряжением в конце и в начале линии

10. Выбрать правильное выражение для определения падения напряжения при расчете по данным начала:

$$1) \quad U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^H R_{12} + Q_{12}^H X_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}^H R_{12} - Q_{12}^H X_{12}}{U_2}$$

$$2) \quad U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^H R_{12} + Q_{12}^H X_{12}}{U_1} + j \frac{P_{12}^H X_{12} - Q_{12}^H R_{12}}{U_1}$$

$$3) \quad U_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^H X_{12} + Q_{12}^H R_{12}}{U_1} - j \frac{P_{12}^H R_{12} - Q_{12}^H X_{12}}{U_1}$$

11. Определить правильную последовательность расчета режима по данным начала:

- определить падение напряжения на участке сети

- определить мощность в начале участка сети

- определить расчетную нагрузку узла

- определить напряжение в конце участка сети

- определить зарядную мощность в конце участка сети

- определить потери мощности на участке сети

12. Выбрать правильную формулу для расчета потерь мощности на участке сети по данным начала :

$$1) \quad \Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^H)^2 + (Q_{12}^H)^2}{U_2^2} (R_{12} + jX_{12})$$

$$2) \quad \Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^H)^2 + (Q_{12}^H)^2}{U_{ном}^2} (P_{12} + jX_{12})$$

$$3) \quad \Delta S_{12} = \frac{(P_{12}^H)^2 + (Q_{12}^H)^2}{U_1}$$

13. Приведенная мощность нагрузки подстанции - это:

- 1) мощность нагрузки на низкой стороне трансформатора
- 2) мощность нагрузки с учетом потерь мощности в трансформаторе
- 3) мощность нагрузки с учетом потерь мощности в трансформаторе и зарядной мощности линий

14. Устройство РПН в трехобмоточных трансформаторах устанавливается:

- 1) на высокой стороне
- 2) на средней стороне
- 3) на низкой стороне

15. ДОПОЛНИТЬ:

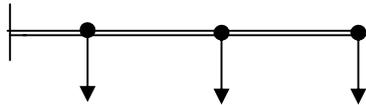
Эксплуатационные издержки включают в себя: _____

16. В распределительных сетях напряжением менее 35 кВ сечение ВЛ выбирается из условия равенства на всех участках:

- 1) в городских сетях
- 2) в промышленных сетях
- 3) в сетях сельскохозяйственного назначения

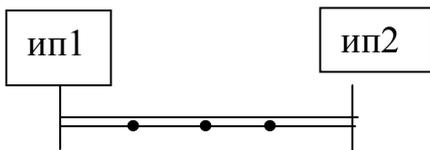
17. Приведенная на рисунке схема является:

ип



- 1) магистральной нерезервированной
- 2) магистральной резервированной
- 3) радиально нерезервированной
- 4) радиально резервированной
- 5) радиально-магистральной нерезервированной
- 6) радиально-магистральной резервированной

18. Приведенная на рисунке схема замкнутой сети является:



- 1) одноцепная линия с двухсторонним питанием
- 2) одноцепная кольцевая
- 3) одноцепная петлевая
- 4) двухцепная с двухсторонним питанием
- 5) двухцепная кольцевая
- 6) двухцепная петлевая

19. ДОПОЛНИТЬ:

Ответвительная подстанция присоединяется к сети _____

20. Выбрать номинальную мощность трансформатора двухтрансформаторной подстанции 120/10 кВ для питания нагрузки:

$P = 105 \text{ МВт}$; $Q = 35 \text{ Мвар}$

- 1) 63
- 2) 80
- 3) 40
- 4) 125

Вариант № 3

1. ДОПОЛНИТЬ:

Электрическая сеть - это совокупность _____

2. Выбрать пункты, относящиеся к классификации эл.сетей по выполняемым функциям:

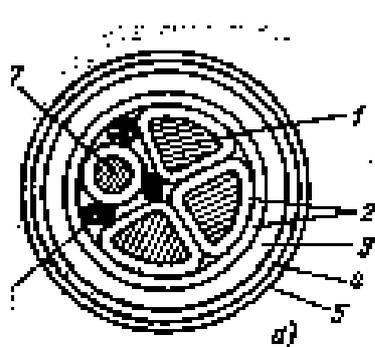
1. Системообразующие сети
2. Сети сверхвысокого напряжения
3. Распределительные сети
4. Промышленные сети
5. Городские сети
6. Сети высокого напряжения
7. Сети сельскохозяйственного назначения
8. Питающие сети
9. Сети низкого напряжения.

3. ДОПОЛНИТЬ:

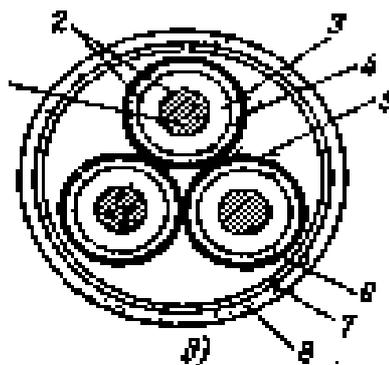
Фазы ВЛ расщепляют на несколько проводов для _____

4. Выбрать типы опор, относящиеся к номинальному напряжению 500 кВ.

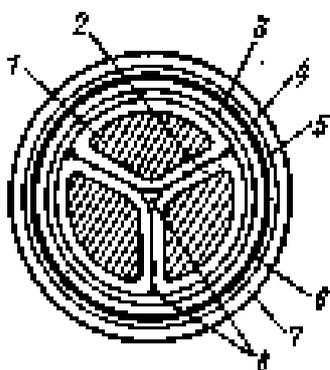
1. Портал на оттяжках
 2. V- образная типа "Набла"
 3. V- образная с вантовой траверсой
 4. Башенная
 5. В виде А-П-образной конструкции
5. Выбрать из приведенных на рис. кабель напряжением 35 кВ:



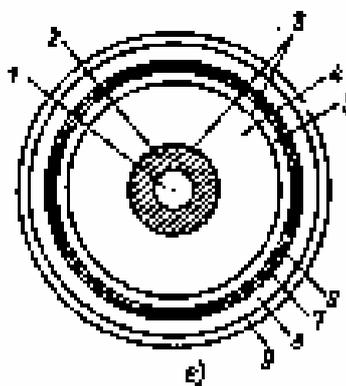
1)



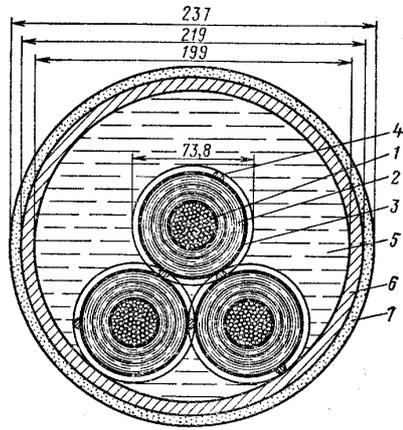
2)



3)

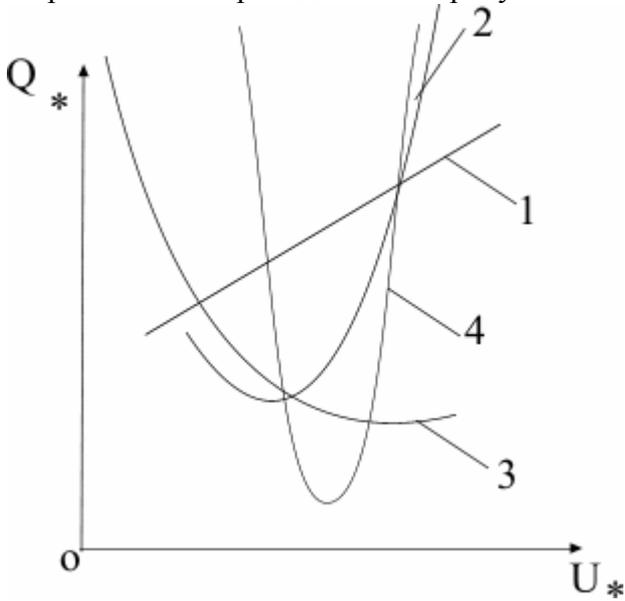


4)

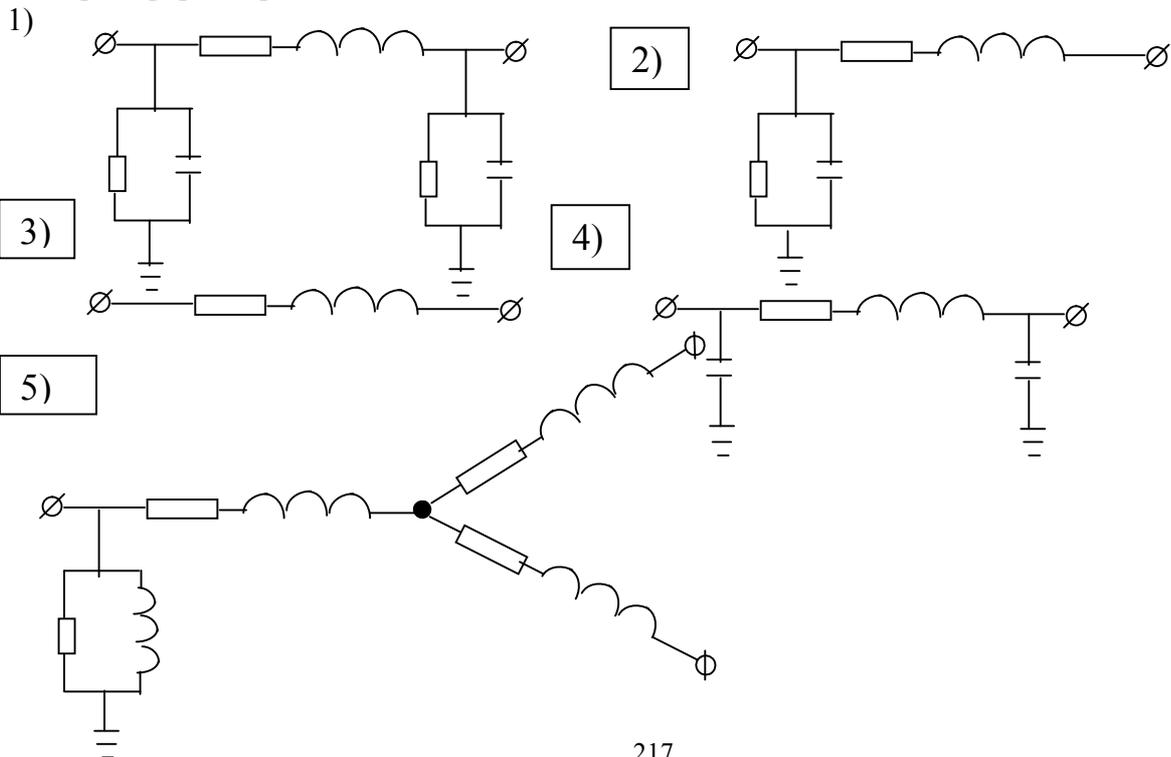


5)

6. Выбрать правильную статическую характеристику типовой обобщенной нагрузки по напряжению из приведенных на рисунке:



7. Выбрать правильную схему замещения автотрансформатора:



8. Нагрузка задается постоянной проводимостью при расчете:

- 1) установившихся режимов при напряжении равным номинальному
- 2) электромагнитных переходных процессов
- 3) электромеханических переходных процессов
- 4) установившихся режимов при линейной зависимости нагрузки от напряжения

9. К активным элементам схем замещения используемых при расчетах установившихся режимов, относятся:

- 1) трансформаторы
- 2) генераторы
- 3) двигатели

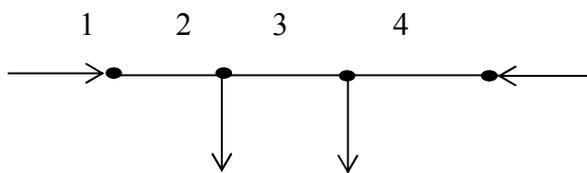
10. Выбрать правильное выражение для определения падения напряжения в конце линии:

- 1) $\underline{U}_2 = \underline{U}_1 + \Delta \underline{U}_{12}^H + j\delta \underline{U}_{12}^H$
- 2) $\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}_{12}^H - j\delta \underline{U}_{12}^H$
- 3) $\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}_{12}^K - j\delta \underline{U}_{12}^K$

11. Определить правильную последовательность расчета режима в кольцевых сетях:

- определение напряжений в узлах сети
- определение точки потокораздела
- определение мощности на головных участках сети без учета потерь
- уточнение потоков мощностей с учетом потерь (при разделении сети на две разомкнутые)
- определение мощности без учета потерь на всех участках сети за исключением головных
- определение расчетной нагрузки узлов

12. Выбрать правильную формулу для расчета потоков мощности на головных участках кольцевой сети:



- 1) $\underline{S}_{12} = \frac{\underline{S}_2 \underline{Z}_{12} + \underline{S}_3 \underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23}}$
- 2) $\underline{S}_{12} = \frac{\underline{S}_2 \underline{Z}_{24} + \underline{S}_3 \underline{Z}_{34}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34}}$
- 3) $\underline{S}_{12} = \frac{\underline{S}_2 \underline{Z}^*_{24} + \underline{S}_3 \underline{Z}^*_{34}}{\underline{Z}^*_{12} + \underline{Z}^*_{23} + \underline{Z}^*_{34}}$

13. Наибольшая потеря напряжения - это:

- 1) потеря напряжения на последнем участке сети
- 2) суммарная потеря напряжения на всех участках сети
- 3) потеря напряжения на головном участке сети

14. В автотрансформаторах путем изменения числа витков обмотки регулируется напряжение на:

- 1) на стороне высокого напряжения
- 2) на стороне среднего напряжения
- 3) на стороне низкого напряжения

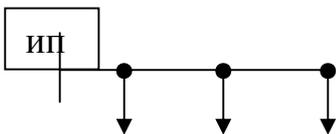
15. ДОПОЛНИТЬ:

Приведенные затраты включают в себя: _____

16. сечение ВЛ напряжением 10 кВ выбирается по:

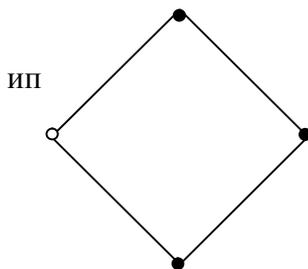
- 1) экономической плотности тока
- 2) экономическим токовым интервалам
- 3) нагреву длительно допустимым токам

17. Приведенная на рисунке схема является:



- 1) магистральной нерезервированной
- 2) магистральной резервированной
- 3) радиально нерезервированной
- 4) радиально резервированной
- 5) радиально-магистральной нерезервированной
- 6) радиально-магистральной резервированной

18. Приведенная на рисунке схема замкнутой сети является:



- 1) одноцепная линия с двухсторонним питанием
- 2) одноцепная кольцевая
- 3) одноцепная петлевая
- 4) двухцепная с двухсторонним питанием
- 5) двухцепная кольцевая
- 6) двухцепная петлевая

19. ДОПОЛНИТЬ:

Проходная подстанция присоединяется к сети _____

20. Выбрать номинальную мощность трансформатора двухтрансформаторной подстанции 35/10 кВ, если мощность нагрузок: $P = 3\text{МВт}$; $Q = 1\text{Мвар}$

- 1) 2,5
- 2) 4
- 3) 6,3
- 4) 10

Вариант № 4

1. ДОПОЛНИТЬ:

Линия электропередачи это _____

2. Распределительные сети обеспечивают передачу эл.энергии:

1. От электростанций
2. К центрам питания
3. К потребителям
4. В другие энергосистемы

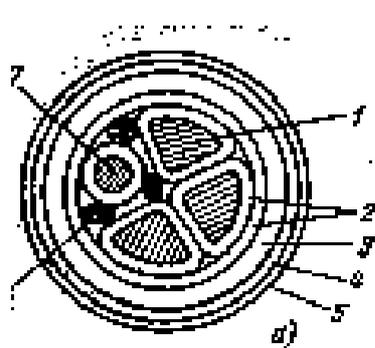
3. ДОПОЛНИТЬ:

Провода марок АСК, АСКС. АСКП предназначены для ВЛ, проходящих

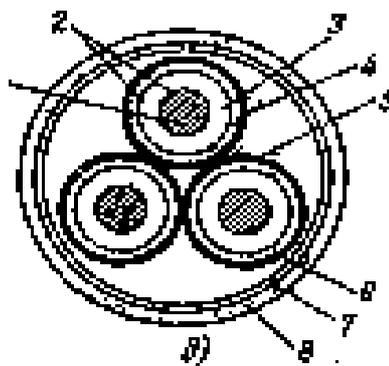
4. Выбрать основные элементы деревянной опоры:

- | | |
|------------|-------------------|
| 1. Стойка | 4. Пасынок |
| 2.Траверса | 5. Тросостойка |
| 3. Оттяжки | 6. Ветровые связи |

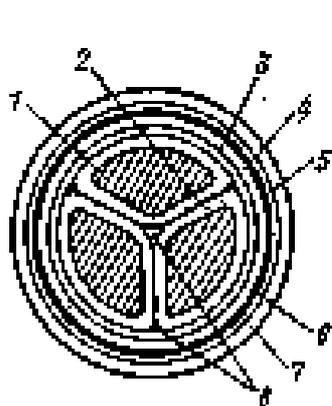
5. Выбрать из приведенных на рис. кабель напряжением 110 кВ:



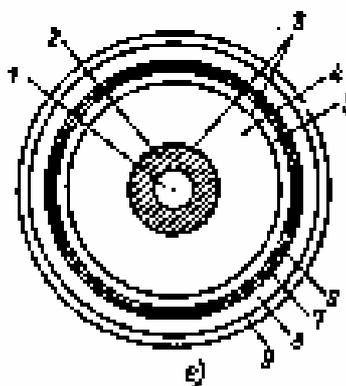
1)



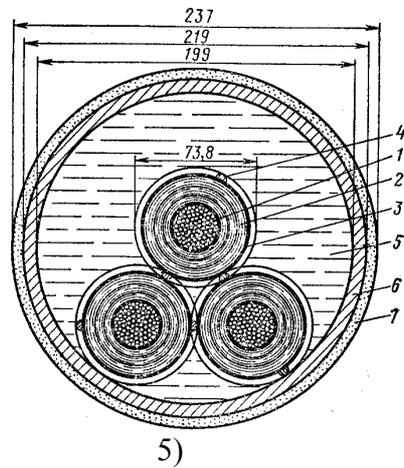
2)



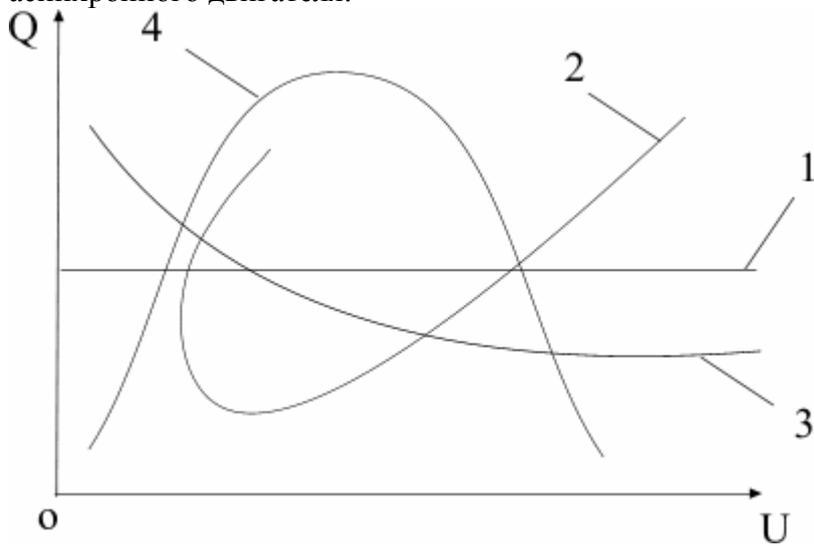
3)



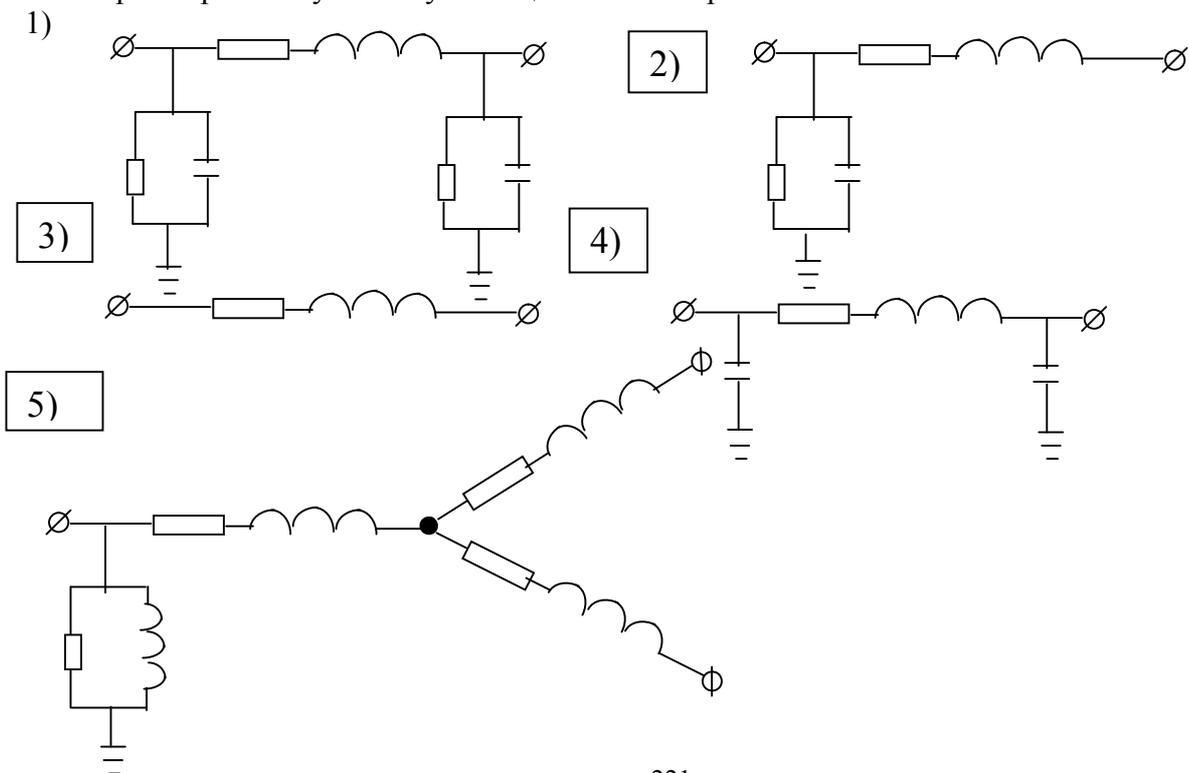
4)



6. Выбрать из приведенных на рисунке статическую характеристику реактивной мощности асинхронного двигателя:



7. Выбрать правильную схему замещения ВЛ напряжением 110 кВ:



8. Статические характеристики нагрузок по напряжению используются при расчетах:

- 1) послеаварийных установившихся режимов при отличии напряжения от номинального
- 2) электромагнитных переходных процессах
- 3) послеаварийных установившихся режимов при дефиците мощности
- 4) аварийных режимах при коротком замыкании

9. К пассивным элементам схемы замещения эл.сети, используемой при расчетах установившихся режимов, относятся:

- 1) генераторы
- 2) трансформаторы и линии
- 3) коммутационные аппараты

10. Выберите правильное выражение для определения напряжения в начале линии:

- 1) $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_{12}^k + j\delta \underline{U}_{12}^k$
- 2) $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 - \Delta \underline{U}_{12}^k - j\delta \underline{U}_{12}^k$
- 3) $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_{12}^H + j\delta \underline{U}_{12}^H$

11. Определить правильную последовательность расчета режима сетей с двухсторонним питанием:

- определить потоки мощности без учета потерь на всех участках кроме головных
- определить напряжение в узлах сети
- определить уравнительную мощность
- рассчитать потоки мощности на головных участках при равенстве напряжений источников питания
- уточнить потоки мощности с учетом потерь (при разрезании сети в точке потокораздела)
- определить фактические потоки мощности на головных участках
- найти точку потокораздела

12. Выберите правильную формулу для определения уравнительной мощности при $U_1 > U_2$:

- 1) $\Delta \underline{S}_{ур} = \frac{U_2 - U_1}{Z_{12}^*} U_{ном}$
- 2) $\Delta \underline{S}_{ур} = \frac{U_1 - U_2}{Z_{12}} U_{ном}$
- 3) $\Delta \underline{S}_{ур} = \frac{U_1^* - U_2^*}{Z_{12}^*} U_{ном}$

13. Идеальный трансформатор:

- 1) обладает сопротивлением, но не имеет коэффициента трансформации
- 2) не имеет сопротивления, но обладает коэффициентом трансформации
- 3) имеет сопротивления и коэффициент трансформации

14. Устройство ПБВ трансформатора предназначено для регулирования напряжения:

- 1) под нагрузкой без отключения от сети на стороне НН трансформатора
- 2) без нагрузки с отключением от сети
- 3) под нагрузкой без отключения от сети на стороне ВН трансформатора

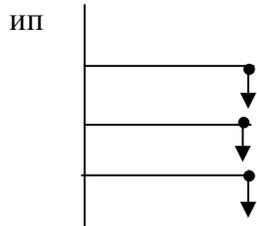
15. ДОПОЛНИТЬ:

Амортизационные отчисления включают в себя: _____

16. Сечение ВЛ напряжением 110 кВ выбирается по:

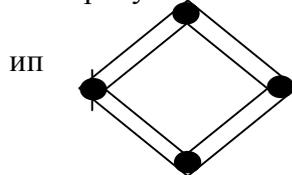
- 1) экономической плотности тока
- 2) экономическим токовым интервалам
- 3) по нагреву длительно допустимым токам

17. Приведенная на рисунке схема является:



- 1) магистральной нерезервированной
- 2) магистральной резервированной
- 3) радиально нерезервированной
- 4) радиально резервированной
- 5) радиально-магистральной нерезервированной
- 6) радиально-магистральной резервированной

18. Приведенная на рисунке схема замкнутой сети является:



- 1) одноцепная линия с двухсторонним питанием
- 2) одноцепная кольцевая
- 3) одноцепная петлевая
- 4) двухцепная с двухсторонним питанием
- 5) двухцепная кольцевая
- 6) двухцепная петлевая

19. ДОПОЛНИТЬ:

Узловая подстанция - это _____

20. Выбрать номинальную мощность трансформатора двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ для питания нагрузки: $P = 70$ МВт; $Q = 20$ Мвар

- 1) 40
- 2) 63
- 3) 25
- 4) 80

Вариант № 5

1. ДОПОЛНИТЬ:

К основному оборудованию электрической части электростанции относятся:

2. Питающие сети осуществляют:

1. Функции формирования объединенной системы
2. Функции формирования районной энергосистемы
3. Передачу электроэнергии к центрам питания распределительных сетей
4. Передачу электроэнергии потребителям

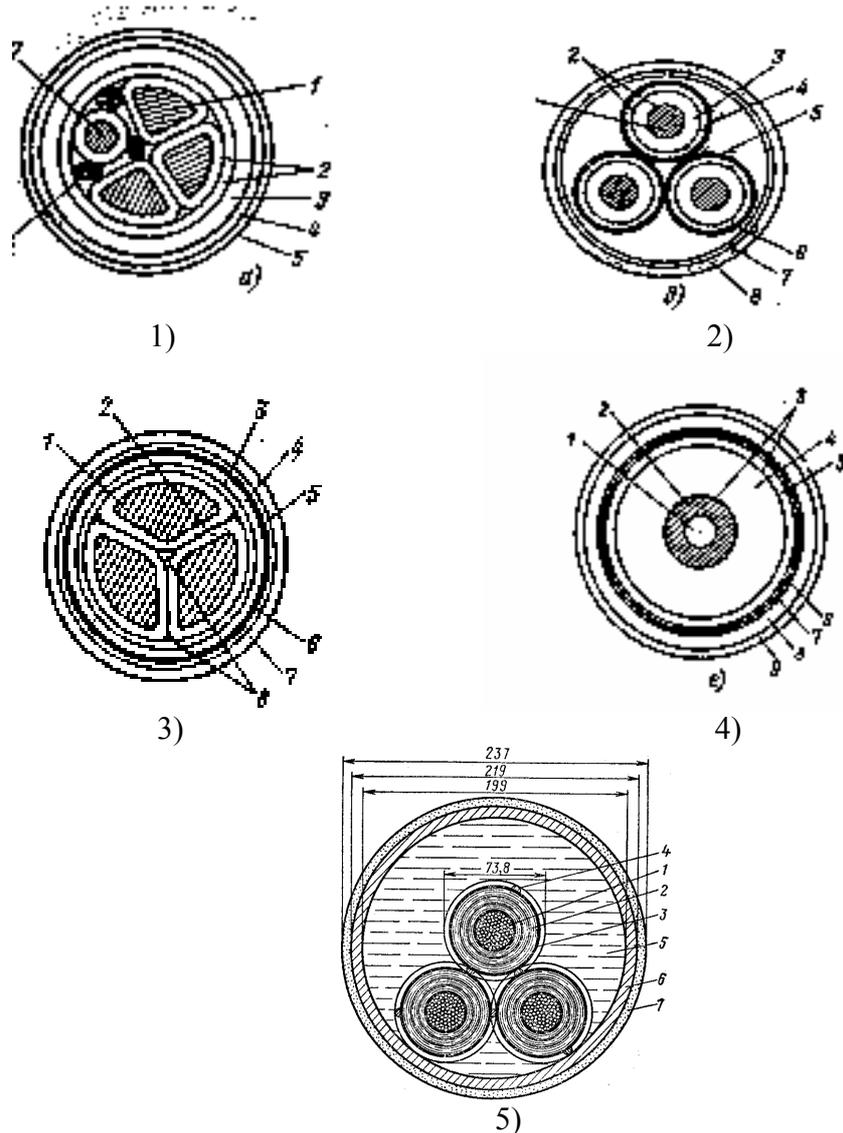
3. ДОПОЛНИТЬ:

Анкерные опоры служат для _____

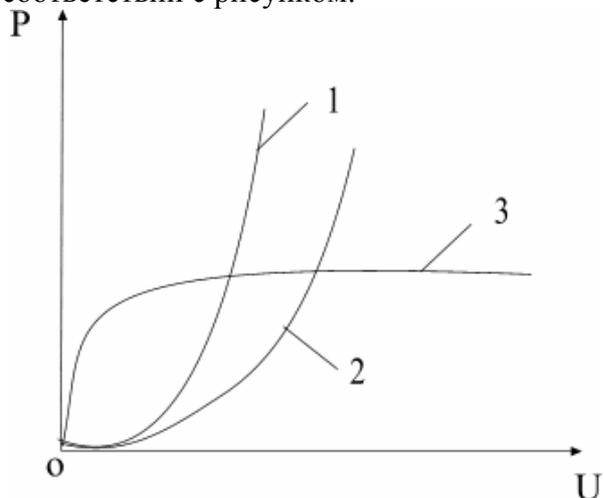
4. Подчеркнуть относящиеся к основному ряду номинальные напряжения:

0,22; 0,38; 0,66; 3; 6; 10; 15; 20; 35; 110; 150; 220;
330; 500; 750; 1150 кВ

5. Выбрать из приведенных на рис. маслонаполненный кабель напряжением 220 кВ низкого давления:

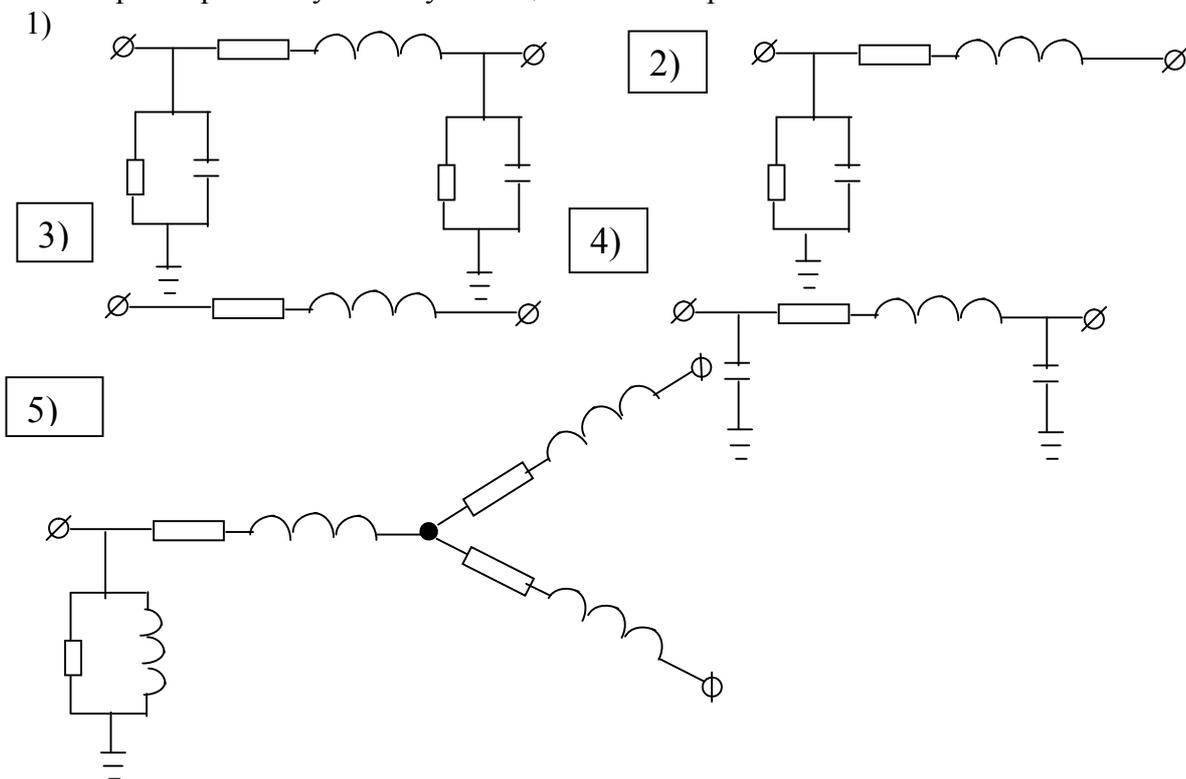


6. Расставить нумерацию кривых статических характеристик осветительной нагрузки в соответствии с рисунком:



- при $r_H = \text{const}$
- при $r_H = f(U)$
- зависимость сопротивления ламп на накаливание от напряжения

7. Выбрать правильную схему замещения ВЛ напряжением 500 кВ:



8. Вероятной характеристикой нагрузки используемой при точном расчете потерь мощности является:

- 1) средняя мощность
- 2) минимальная мощность
- 3) максимальная мощность
- 4) эффективная мощность

9. Замкнутой сетью называется сеть:

- 1) не содержащая контуров
- 2) содержащая один или несколько контуров
- 3) сеть, в которой каждый узел получает питание по одной ветви

10. Ток в линии при расчете по данным конца определяется так:

$$1) \underline{I}_{12} = \frac{\underline{S}_{12}^K}{\sqrt{3}U_2}$$

$$2) \underline{I}_{12} = \frac{\underline{S}_{12}^{*K}}{\sqrt{3}U_2}$$

$$3) \underline{I}_{12} = \frac{\underline{S}_{12}^{*K}}{\sqrt{3}U_2^*}$$

11. Определить правильную последовательность расчета режимов в разомкнутых сетях по данным начала:

- рассчитать поток мощности в начале головного участка сети

- определить напряжение в первом узле от источника питания

- определить расчетные нагрузки узлов

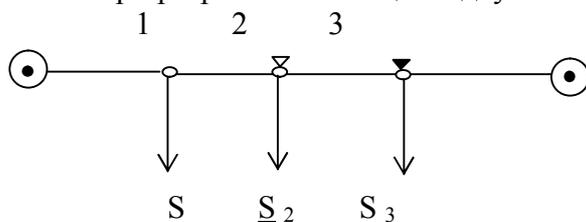
- рассчитать потери мощности на последнем участке сети

- определить поток мощности в начале последнего участка сети

- рассчитать потоки мощности с учетом потерь на основных участках

- определить падение напряжения на головном участке

12. Выбрать правильную формулу для расчета определения нагрузки в конце разомкнутого участка сети при разрезании кольца по двум точкам потокораздела:



$$1) \underline{S}_{12}^K = P_{12} + j(Q_{12} + \Delta Q_{23})$$

$$2) \underline{S}_{12}^K = P_{12} + \Delta P_{23} + jQ_{12}$$

$$3) \underline{S}_{12}^K = P_{12} + \Delta P_{23} + j(Q_{12} + \Delta Q_{23})$$

13. Активные проводимости в схеме замещения ВЛ учитываются:

- 1) в сетях всех номинальных напряжений
- 2) в сетях с номинальными напряжениями выше 220 кВ
- 3) в сетях с номинальными напряжениями ниже 220 кВ

14. Трансформаторы с ПБВ имеют:

- 1) 5 ответвлений
- 2) 10 ответвлений
- 3) 20 ответвлений
- 4) 18 ответвлений

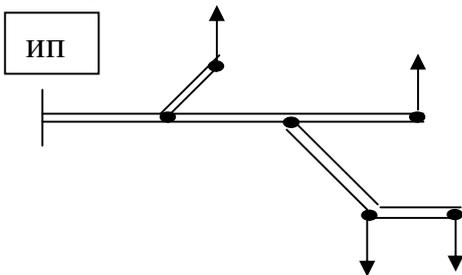
15. ДОПОЛНИТЬ:

Отчисления на текущий ремонт включают в себя: _____

16. При проектировании электрических сетей для выбора номинального напряжения необходимо знать:

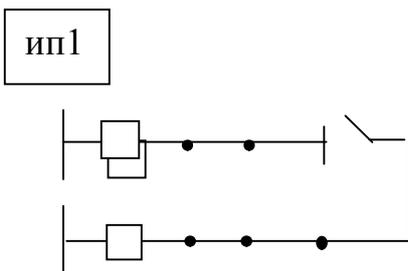
- 1) активную мощность передаваемую по линии и ее длину
- 2) полную мощность передаваемую по линии и ее длину
- 3) активную, реактивную мощности, передаваемую по линии и ее сопротивления: R и X

17. Приведенная на рисунке схема является:



- 1) магистральной нерезервированной
- 2) магистральной резервированной
- 3) радиально нерезервированной
- 4) радиально резервированной
- 5) радиально-магистральной нерезервированной
- 6) радиально-магистральной резервированной

18. Приведенная на рисунке схема замкнутой сети является:



- 1) одноцепная линия с двухсторонним питанием
- 2) одноцепная кольцевая
- 3) одноцепная петлевая
- 4) двухцепная с двухсторонним питанием
- 5) двухцепная кольцевая
- 6) двухцепная петлевая

19. ДОПОЛНИТЬ:

Транзитная подстанция это _____

20. Выбрать номинальную мощность трансформатора двухтрансформаторной подстанции 220/10 кВ для питания нагрузки:

$P = 80$ МВт; $Q = 30$ Мвар

- | | |
|-----------|------------|
| 1) 40 МВА | 3) 80 МВА |
| 2) 63 МВА | 4) 125 МВА |

Вариант № 6

1. ДОПОЛНИТЬ:

Электрическая подстанция - это _____

2. Системообразующие сети осуществляют:

1. Функции формирования районной энергосистемы
1. Функции формирования объединенной системы
3. Передачу электроэнергии к центрам питания
4. Передачу электроэнергии потребителям

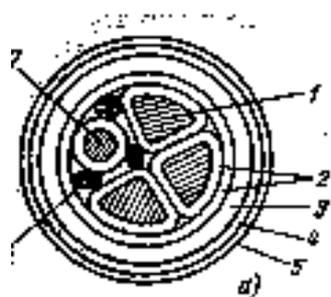
3. ДОПОЛНИТЬ:

Деревянные опоры применяют на номинальные напряжения

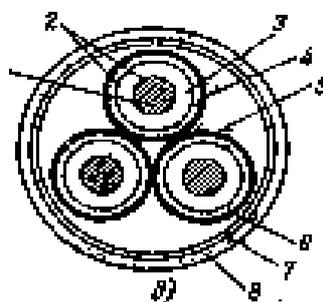
4. Выбрать правильное количество изоляторов в поддерживающей гирлянде для ВЛ 110 кВ

- | | | | |
|------|-------|------|-------|
| 1. 3 | 3. 12 | 5. 9 | 7. 11 |
| 2. 7 | 4. 10 | 6. 5 | 8. 15 |

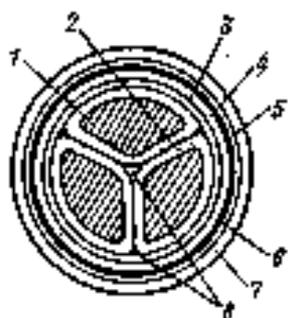
5. Выбрать из приведенных на рис. маслонаполненный кабель напряжением 220 кВ высокого давления



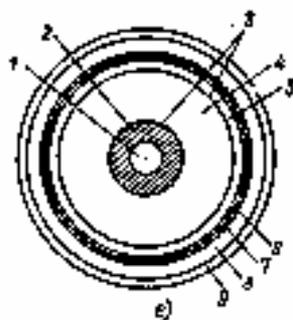
1)



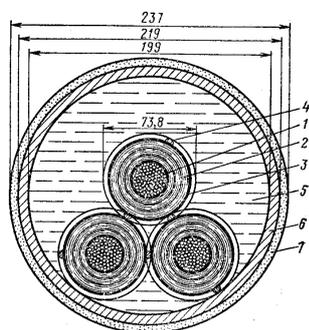
2)



3)



4)

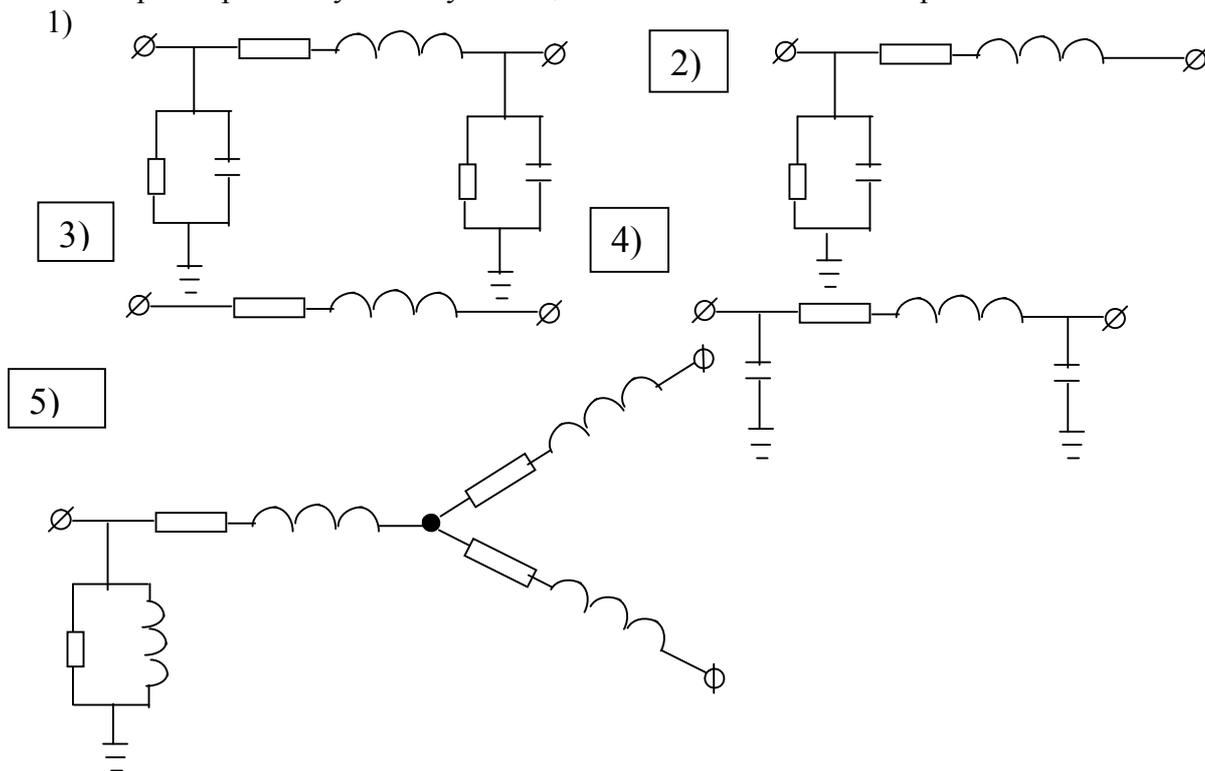


5)

6. Статические характеристики нагрузки - это:

1. Зависимости мощности нагрузки от напряжения или частоты при медленных изменениях параметров режима.
2. Зависимости мощности нагрузки от напряжения или частоты при быстрых изменениях параметров режима.
3. Зависимости тока нагрузки от частоты при быстрых изменениях параметров режима.
4. Зависимости тока нагрузки от напряжения при медленных изменениях параметров режима.

7. Выбрать правильную схему замещения кабельной линии напряжением 35 кВ:



8. Вероятностной характеристикой нагрузки, по которой осуществляется выбор элементов электрической сети, является:

- 1) средняя мощность
- 2) минимальная мощность
- 3) максимальная мощность

9. Замкнутой сетью называется сеть:

- 1) не содержащая контуров
- 2) содержащая один контур
- 3) содержащая два и более контуров

10. Ток в линии при расчете по данным начала определяется так:

$$1) I_{12} = \frac{S_{12}^{*H}}{\sqrt{3}U_2^*} \quad 2) I_{12} = \frac{S_{12}^{*H}}{\sqrt{3}U_1} \quad 3) I_{12} = \frac{S_{12}}{\sqrt{3}U_1}$$

11. Определить правильную последовательность расчета режимов в сети состоящих из конца и питаемых от него участков разомкнутой сети:

- определить падение напряжения на головных участках кольца
- определить потоки мощности на головных участках кольца без учета потерь
- определить потоки мощности с учетом потерь на разомкнутых участках сети
- определить расчетные нагрузки узлов
- уточнить потоки мощности в кольце с учетом потерь
- рассчитать напряжения в узлах разомкнутой сети
- рассчитать напряжения в узлах

12. Выбрать правильную формулу для определения фактического потока мощности на головном участке к сети с двухсторонним питанием, питаемом от ип1, если $U_{ип1} > U_{ип2}$:

- 1) $\underline{S}_{Г.у}^{\varphi} = \underline{S}_{Г.у} + \underline{S}_{уп}$
- 2) $\underline{S}_{Г.у}^{\varphi} = \underline{S}_{Г.у} - \underline{S}_{уп}$
- 3) $\underline{S}_{Г.у}^{\varphi} = \underline{S}_{Г.у} + \Delta \underline{S}_{Г.у}$

где $\underline{S}_{Г.у}$ - поток мощности на головном участке при $U_{ип1} = U_{ип2}$:

13. В автотрансформаторах типовая мощность:

- 1) равна номинальной
- 2) меньше номинальной
- 3) больше номинальной

14. Устройство РПН в трансформаторе применяется для регулирования:

- 1) тока
- 2) мощности
- 3) напряжения

15. ДОПОЛНИТЬ:

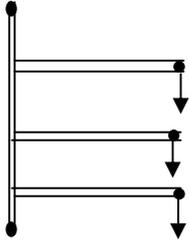
Отчисления на обслуживание включают в себя: _____

16. Для выбора оптимального варианта схемы электрической сети сравниваются по:

- 1) приведенным затратам
- 2) капитальным вложениям
- 3) эксплуатационным издержкам

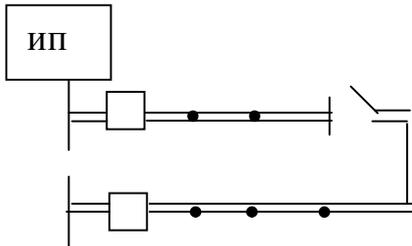
17. Приведенная на рисунке схема является:

ип



- 1) магистральной нерезервированной
- 2) магистральной резервированной
- 3) радиально нерезервированной
- 4) радиально резервированной
- 5) радиально-магистральной нерезервированной
- 6) радиально-магистральной резервированной

18. Приведенная на рисунке схема замкнутой сети является:



- 1) одноцепная линия с двухсторонним питанием
- 2) одноцепная кольцевая
- 3) одноцепная петлевая
- 4) двухцепная с двухсторонним питанием
- 5) двухцепная кольцевая
- 6) двухцепная петлевая

19. ДОПОЛНИТЬ:

Промежуточная подстанция это _____

20. Выбрать номинальную мощность автотрансформатора двухтрансформаторной подстанции 220/110/10 КВ, если нагрузка:

$P = 200 \text{ МВт}$; $Q = 90 \text{ Мвар}$

- | | |
|------------|------------|
| 1) 80 МВт | 3) 200 МВт |
| 2) 125 МВт | 4) 250 МВт |

8.3. Экзаменационный контроль.

Вопросы к экзамену

1. Понятия: энергетическая система, электроэнергетическая система, электрическая станция, электрическая сеть.
2. Классификация электрических сетей.
3. Стандартный ряд номинальных напряжений и наибольшие рабочие значения напряжений.
4. Преимущества объединённых энергосистем.
5. Дальние линии электропередачи переменного тока.
6. Дальние линии электропередачи постоянного тока.
7. Питающие сети, пример.
8. Системообразующие сети, пример.
9. Распределительные сети, пример.
10. Местные электрические сети, пример.
11. Конструктивные элементы ВЛЭП.
12. Конструктивное исполнение проводов, марки проводов.
13. Назначение проводов, тросов, изоляторов, опор, линейной арматуры.
14. Высота опоры, длина пролёта, стрела провеса.
15. Количество изоляторов в гирляндах на ВЛЭП различных номинальных напряжений.
16. Ориентировочные значения длин пролётов ВЛЭП различных номинальных напряжений.
17. Требования к материалу, из которого изготавливаются провода.
18. Области применения проводов различных марок. Марки проводов.
19. Марки грозозащитных тросов и области их применения.
20. Какие бывают опоры? Их назначение.
21. Транспозиция проводов, и с какой целью она применяется.
22. Расположение проводов на опоре.
23. Конструктивное исполнение деревянных опор, область их применения.
24. Конструктивное исполнение железобетонных опор, область их применения.
25. Конструктивное исполнение металлических опор, область их применения.
26. Унификация конструкций металлических и железобетонных опор. Шифры опор.
27. Классификация линейных изоляторов, их конструктивное исполнение.
28. Виды линейной арматуры, её назначение.
29. Классификация кабелей.
30. Конструктивное исполнение кабелей, назначение каждого элемента.
31. Кабели напряжением до 1 кВ.
32. Кабели напряжением 3 – 10 кВ.
33. Кабели напряжением 20, 35 кВ.
34. Маслонаполненные кабели напряжением 110 – 220 кВ.
35. Маслонаполненные кабели высокого давления.
36. Газоизолированные линии и газонаполненные кабели.
37. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.
38. Маркировка кабелей, примеры.
39. Принцип формирования марок кабелей, примеры.
40. Кабельная арматура, её назначение.
41. Прокладка кабелей.
42. Статические и динамические характеристики нагрузок, понятия и физическая сущность.
43. Статические характеристики осветительной нагрузки.
44. Статические характеристики асинхронных и синхронных двигателей.
45. Обобщённые статические нагрузки по напряжению и частоте комплексной нагрузки.
46. Регулирующий эффект нагрузки.
47. Задание нагрузки при расчётах режимов.

48. Представление генераторов при расчётах установившихся режимов.
49. Схемы замещения ВЛЭП и их параметры.
50. Схемы замещения кабельных линий, их параметры.
51. Каталожные данные трансформаторов, основные понятия и определения.
52. Схема соединения обмоток автотрансформатора. Распределение токов при работе автотрансформатора в понижающем режиме.
53. Типовая и номинальная мощности автотрансформаторов.
54. Схема замещения двухобмоточного трансформатора и её параметры.
55. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой и её параметры.
56. Схема замещения трёхобмоточного трансформатора, её параметры.
57. Схема замещения автотрансформатора, её параметры.
58. Определение потерь мощности в двухобмоточном трансформаторе.
59. Определение потерь мощности в трёхобмоточном трансформаторе и автотрансформаторе.
60. Приведенная и расчётная нагрузка узла.
61. Схемы электрических сетей.
62. Падение и потеря напряжения.
63. Расчёт режима ЛЭП при заданном токе нагрузки по данным «конца».
64. Расчёт режима ЛЭП при заданном токе нагрузки по данным «начала».
65. Построение векторных диаграмм токов и напряжений при расчёте режима ЛЭП.
66. Расчёт режимов разомкнутых сетей по данным «конца».
67. Расчёт режимов разомкнутых сетей по данным «начала».
68. Построение векторных диаграмм токов и напряжений при расчёте режимов разомкнутых сетей.
69. Определение потоков мощности на головных участках в простых замкнутых сетях и в сетях с двухсторонним питанием.
70. Расчёт кольцевых сетей.
71. Понятие «точка потокораздела». Как рассчитать кольцевую сеть с двумя точками потокораздела?
72. Расщепление сети. В каких сетях возможно применение такого приёма.
73. Особенности расчёта режимов в однородных электрических сетях.
74. Расчёт режимов сетей с двухсторонним питанием.
75. Определение наибольшей потери напряжения.
76. Особенности расчёта сетей с равномерно распределённой нагрузкой.
77. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции с двухобмоточными трансформаторами.
78. Определение напряжения на сторонах среднего и низшего напряжений подстанции с трёхобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами.
79. Расчёт сетей с различными номинальными напряжениями.
80. Регулирование напряжения с помощью РПИ трансформаторов и линейных регуляторов.
81. Выбор ответвлений РПН в двухобмоточных трансформаторах
82. Выбор ответвлений РПН в трёхобмоточных трансформаторах
83. Выбор ответвлений РПН в автотрансформаторах.
84. Способы присоединения подстанций к электрической сети
85. Схемы электрических соединений подстанций.
86. Баланс активной мощности и его связь с частотой.
87. Резерв мощности.
88. Регулирование частоты вращения турбины
89. Регулирование частоты в системе.
90. Баланс реактивной мощности и его связь с напряжением.
91. Потребление реактивной мощности
92. Выработка реактивной мощности на электростанциях.

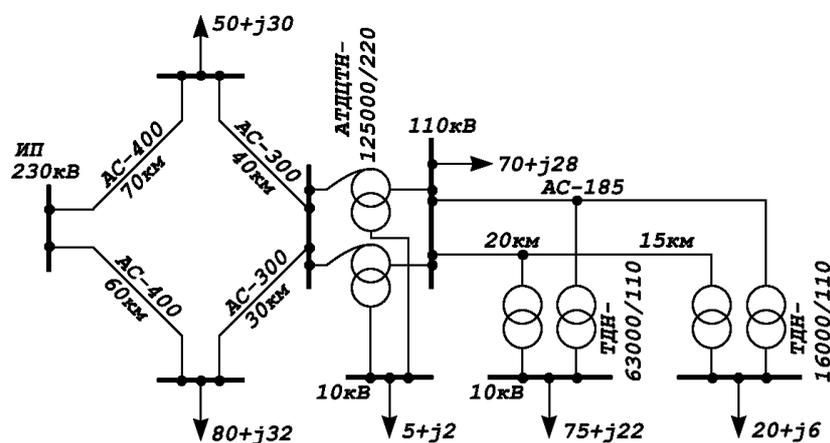
Пример билета на экзамен

Билет №1

1. Местные электрические сети, пример.
2. Выработка реактивной мощности на электростанциях.
3. Выбор ответвлений РПН в двухобмоточных трансформаторах
4. Задача.

Задача.

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать отпайки РПН автотрансформатора для поддержания напряжения на шинах СН равным 116 кВ, на шинах НН – 10,5 кВ и трансформатора ТДН – 63000/110 для поддержания напряжения на шинах НН равным 10,2 кВ.



Полный комплект экзаменационных билетов хранится на кафедре.

9. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава

Лекции	Практические занятия	Контроль за качеством знаний студентов	Экзамен
Зав. каф. энергетики, проф. Савина Н.В.	ст.преп. Тоушкин А.Г., асс. Бодруг Н.С.	проф. Савина Н.В., ст.преп. Тоушкин А.Г., асс. Бодруг Н.С.	проф. Савина Н.В.

10. Список использованных источников

1. Электрические системы. Электрические сети: Учебник для энергетических специальностей вузов/ под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998- 511 с.
2. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002- 248 с.
3. Основы современной энергетики: Учебник для вузов. В двух частях / под общей ред. Е.В. Аметистова. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. Часть 2. Современная электроэнергетика. / Под ред. А.П.Бурмана и В.А.Строева. – 462 с.
4. Савина Н.В., Мясоедов Ю.В., Дудченко Л.Н., Электрические сети в примерах и расчетах: учебное пособие. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 1999- 238 с.
5. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / под ред. В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1999 – 35 с.
6. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Высшая школа, 1989, 592 с.
7. Зуев Э.Н. Основы техники подземной передачи электроэнергии. М.: «Энергоатомиздат» Москва, 1999 – 256с.
8. Попов Л.В. Кабельные линии 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
9. Пospelов Г.Е., Федин В.Т. Электрические системы и сети. Проектирование. - Минск: Высш. шк., 1988. - 308 с.
10. Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. - М.: Энергоатомиздат, 1989, 680 с.
11. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэн. спец. вузов / Под ред. В.М. Блок. М.: Высш. шк., 1990. - 383 с.
12. Правила устройств электроустановок. /Министерство топлива и энергетики РФ. - 7 изд., 2006. - 648 с.
13. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро/ - М.: Энергоатомиздат, 1985, 352 с.
14. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.3. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ: А.И. Попов (гл. ред.) и др. - М.: Изд-во МЭИ, 2002, 964 с.
15. Гордон С.В. Сооружение линий электропередачи. - М.: Энергоиздат, 1984, 432 с.
16. Справочник по проектированию подстанций 35 - 500 кВ/ под ред. С.С. Рокотяна, Я.С. Самойлова/ - М.: Энергоиздат, 1982, 352 с.
17. Блок В.М. Электрические сети и системы. М.: Высш. шк., 1986. - 430 с.
18. Справочник по проектированию систем электроснабжения/ под ред. Ю.Г. Барыбина, и др. - М.: Энергоатомиздат, 1991 -576 с.
19. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1983
20. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / под ред. В.А. Веникова./ - М.: Энергоатомиздат, 1983, 504 с.
21. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию./Под ред. А.А. Федорова, М.:Энергоиздат,1986. в2-х томах.
22. Справочник по проектированию электросетей и электрооборудования/ под ред. Ю.Г. Барыбина - М.: Энергоатомиздат, 1991 – 464 с.
23. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: учеб. пособие – М.: форум: Инфра. – М. 2006.- 480 с.

Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАН
10. Энергетика

Информационное обеспечение дисциплины

1. Центральное Диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/>
2. Служба релейной защиты и автоматики ЦДУ ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/rza/>
3. Объединённое Диспетчерское Управление энергосистемами Востока (ОДУ Востока) <http://www.oduv.ru/>
4. ОАО "АМУРЭНЕРГО" <http://www.ae.amur.ru/>
5. ОАО "ДАЛЬЭНЕРГО" <http://www.dalenergo.org/>
6. ОАО "ЗЕЙСКАЯ ГЭС" <http://www.rao-ees.ru/zges/>
7. ФОРЭМ <http://www.cdrforem.ru/>