

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине
Электромагнитные переходные процессы

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника Направленность (профиль) «Электроснабжение»

Квалификация выпускника
бакалавр

Ставрополь
2026

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Расчет токов для начального момента трехфазного КЗ в сетях свыше 1 кВ

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ

Провести расчет токов для начального момента трехфазного КЗ.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

1. Общие теоретические предпосылки (для лабораторных работ №1÷ 4).

Все элементы схем замещения приводятся к базисным условиям в относительных единицах с учетом средних коэффициентов трансформации. Расчетные выражения приведены в [1, 2]. Базисная мощность задана в таблице П.1. Для проведения расчетов рекомендуется изучить методические указания [1, 2].

2. Методика предварительных расчетов.

При предварительном расчете необходимо составить схему замещения прямой последовательности исследуемой сети в соответствии с выданным заданием. Рассчитать сопротивления в относительных единицах, используя [1, 2].

Далее, схема замещения преобразуется до получения эквивалентных сопротивлений и ЭДС между началом и концом схемы. При этом используются известные методы преобразования схем, например приведенные в [2].

Искомый периодический ток в начальный момент трехфазного КЗ может быть найден из выражения:

$$I_{\text{ПО}} = \frac{E_{\text{Э}}}{X_{\text{Э}}} \cdot I_{\text{Б}} , \text{ кА}, \quad (1)$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}, \text{ кА}, \quad (2)$$

где E_{Σ} , X_{Σ} – эквивалентные ЭДС и сопротивление схемы замещения;

$U_B = U_{CP}$ – среднее номинальное напряжение в [кВ] по шкале [1, 3, 4].

Мощность КЗ определяется по формуле:

$$S_K = \sqrt{3} \cdot U_B \cdot I_{\text{ПО}}, \text{ МВА}. \quad (3)$$

АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторные работы №1÷ 4 выполняются на специализированных моделях постоянного тока (СМП) №1÷ 3 (для студентов специальностей 100200 и 551702 выполняются проверочные расчеты по программе ТКЗ на ПЭВМ). Все СМП выполнены идентично. Стенды №1÷ 3 имеют различное исполнение панелей управления. Кроме того, СМП №3 в отличие от 1 и 2 содержит техническую диагностику схемы замещения прямой последовательности.

СМП изготовлены на основе модели-анализатора электрических систем и предназначены для исследования переходных процессов в электрических сетях свыше 1 кВ при КЗ. На СМП применен набор фиксированных схем, с возможностью коммутации выключателей и нейтралей.

СМП включают в себя следующие блоки (рисунок 1):

- 1) блоки питания (4 шт.), состоящие из блоков стабилизации напряжения и блоков защиты от аварий ЭДС генераторов;
- 2) блок набора сопротивлений схем замещения;
- 3) блок коммутаций выключателей и нейтралей расчетной схемы;
- 4) блок измерений токов и напряжений.

Питание СМП осуществляется от однофазной сети переменного тока с номинальным напряжением 220 В. Постоянный ток от выпрямителя подается

через плавкие предохранители на шину питания. К шинам постоянного тока через 4 выключателя, расположенные на панели управления, присоединяются 4 либо 8 (в зависимости от исполнения СМП) потенциометра, воспроизводящие ЭДС расчетной схемы.

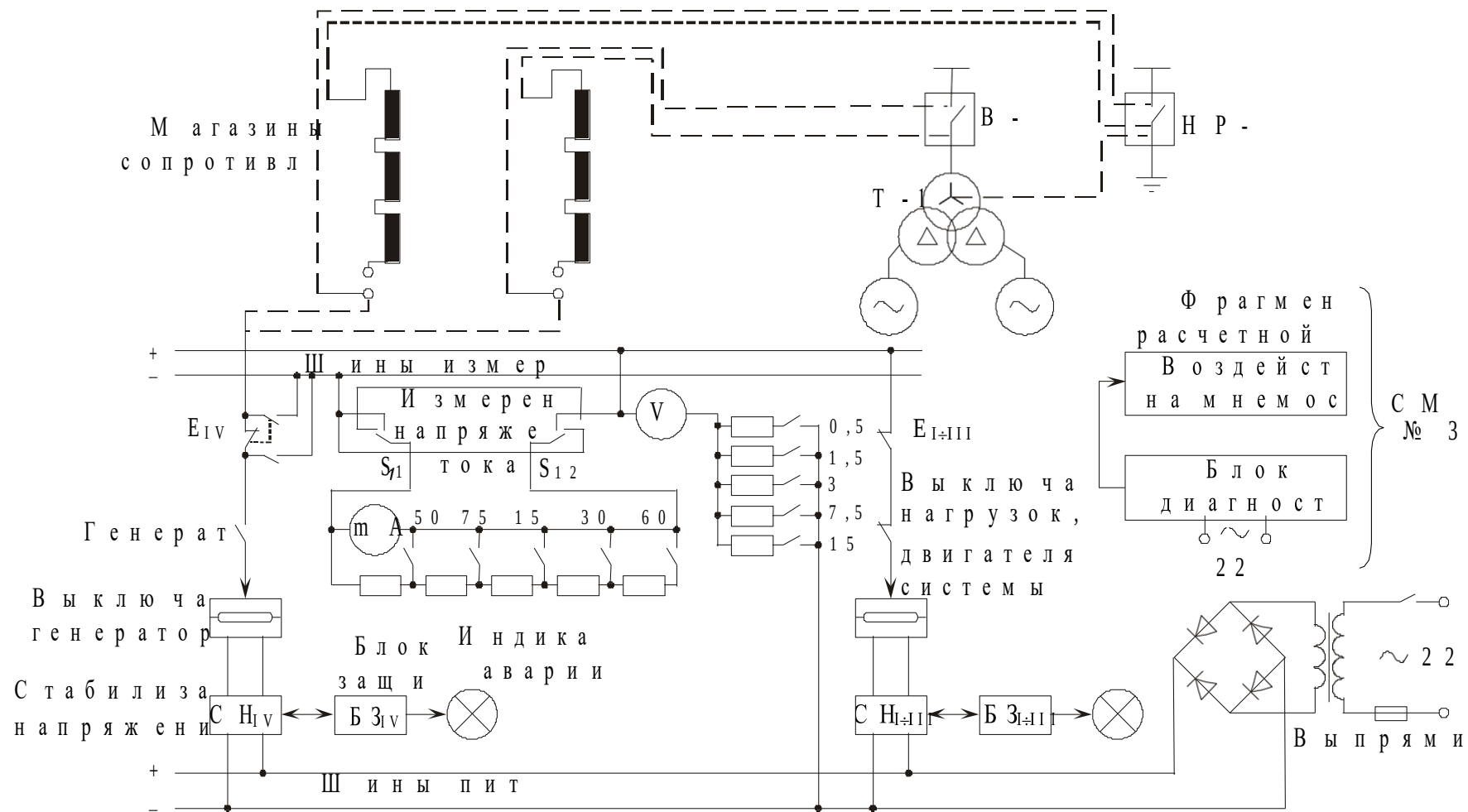


Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда

КЗ создается путем подключения нужного места КЗ схемы к шине источника питания. Заданная расчетная схема электрической системы собирается из блоков сопротивлений и коммутируется с помощью выключателей на мнемонической схеме. На каждом из блоков, воспроизводящем какой-либо элемент сети, набираются в выбранном масштабе соответствующие сопротивления (прямой, обратной и нулевой последовательностей). Общий ток КЗ для $K^{(3)}$ либо ток прямой последовательности для несимметричных КЗ определяется путем нажатия ключа « $I_{\Sigma KЗ}$ ». Сопротивления на СМП имитируют элементы сети: генераторы, трансформаторы, асинхронные двигатели, нагрузки, линии электропередачи.

Точность результатов, полученных на СМП, как правило, не зависит от выбираемых масштабов. Основные погрешности стенда обусловлены неучетом активных составляющих сопротивлений, фазовых сдвигов и потерь в его элементах.

Если через стабилизатор напряжения протекает недопустимо большой ток, ограниченный 0,6 А (т. е. суммарное эквивалентное сопротивление набранной схемы стремится к нулю и создается реальное КЗ блока питания), то он отключается от шин питания. Загорается лампа аварии соответствующей ЭДС либо индикация общей аварии СМП. После ликвидации причин аварии и нажатии кнопки «сброс аварии», ЭДС готова к работе. Кроме сказанного, на СМП №3 установлен блок диагностики, позволяющий анализировать качество сборки расчетной схемы.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед началом работы на СМП все студенты должны пройти у преподавателя инструктаж по технике безопасности и поставить личные подписи в книге инструктажа, которая находится у преподавателя.
2. Категорически запрещается выполнять работы на неисправном

СМП.

3. Перед выполнением работы студент должен изучить назначение и место расположения устройств в схеме СМП.

4. Во время проведения работы на столешнице СМП не должно быть посторонних предметов: чертежей, книг и т. д.

5. Студент обязан немедленно сообщить преподавателю обо всех нарушениях техники безопасности.

6. Питание СМП осуществляется на переменном напряжении 220 В, опасном для жизни. Рабочее напряжение СМП – 12 В.

7. Работы необходимо проводить только под непосредственным наблюдением преподавателя.

8. Сборку схемы необходимо выполнять только при снятом напряжении. Включение СМП после сборки схемы необходимо производить только под наблюдением преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Общая методика выполнения работы (для лабораторных работ №1÷ 4).

Каждый студент получает индивидуальное задание, приведенное в приложении. Номер варианта исходных данных (таблица П.1) и номер варианта коммутации (таблицы П.2÷ П.4 по рисункам П.1÷ П.4).

К началу проведения каждой лабораторной работы студент обязан составить схемы замещения и рассчитать их элементы в соответствии с требованиями, изложенными в данном методическом указании либо в [1, 2].

Во время пребывания в лаборатории студент обязан строго выполнять все правила техники безопасности.

В начале лабораторных занятий с каждым студентом проводится

собеседование либо аттестация на ПЭВМ с целью проверки степени подготовленности его к проведению работы и правильности предварительных расчетов. При неудовлетворительной подготовке студент к выполнению работы не допускается, отработка пропущенных лабораторных работ выполняется студентами в конце семестра на дополнительных занятиях, назначаемых преподавателем по разрешению декана или заведующего кафедрой.

Приступая к выполнению работы, необходимо ознакомиться с принципом действия и устройством СМП, определить необходимые пределы измерений применяемой измерительной аппаратуры.

Набрать рабочую схему в соответствии с выданным заданием и предварительным расчетом. Тщательно проверить правильность набора и подготовить схему к включению.

В случае включения СМП №3 можно использовать режим диагностики, позволяющий выявлять не полностью собранные сопротивления схемы замещения прямой последовательности.

Стенд включается только под наблюдением преподавателя.

После окончания работы необходимо показать преподавателю результаты, чтобы в случае необходимости можно было повторить опыты. Подписанный преподавателем черновик обязательно прилагать к отчету.

По окончании работы необходимо предупредить об этом преподавателя, разобрать схему, привести в порядок рабочее место.

Выполнив лабораторную работу, необходимо закончить оформление отчета, дополнив его экспериментальными данными. Отчет необходимо обязательно сопровождать выводами о проделанной работе. Одним из выводов должно быть сравнение результатов предварительных расчетов токов короткого замыкания с результатами эксперимента, а для студентов специальностей 100200, 551702 и с результатами расчетов на ПЭВМ. Особое

внимание следует обратить на контрольные вопросы, помещенные в конце описания лабораторной работы.

2. Общий порядок выполнения работы (для лабораторных работ №1÷4).

1) Выключатели мнемосхемы необходимо привести в соответствие с заданием на коммутацию.

2) Полученные сопротивления в относительных единицах умножаются на 100 с целью получения их модельных аналогов в [Ом]. Производится набор этих сопротивлений на наборном поле СМП.

3) Рекомендуемые значения ЭДС в [о. е.] умножаются на 8 с целью получения их модельных аналогов в [В].

4) Для того чтобы выставить ЭДС, необходимо:

а) включить СМП (ключи, определяющие место и вид КЗ должны быть отключены);

б) нажать ключ, соответствующий контрольной точке схемы замещения заданной ЭДС (если, например, точка 1, нажать ключ 101, если 2 – 102 и т. п.);

в) вращением потенциометра установить на приборе расчетную величину ЭДС;

г) нажать кнопку включения соответствующей ЭДС (1÷4);

5) Установить необходимое по заданию место и вид КЗ.

6) Произвести измерения токов и напряжений в каждом элементе схемы прямой последовательности, замеры производятся путем включения ключей с соответствующими номерами, приведенными на схеме замещения. Произвести измерение общего тока КЗ. Обратить внимание на изменение направления токов в сопротивлениях. При изменении направления тока переключается соответствующий выключатель, и это фиксируется в отчете

как изменение знака тока (с + на –, либо – на +).

7) Результаты расчетов и обработки эксперимента поместить в таблицу. В отчете необходимо привести характерные примеры расчетов обработки эксперимента.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

1. Общие требования к отчету и его форме (для лабораторных работ №1÷4).

Отчет по работе выполняется в объеме, предусмотренном требованиями данных методических указаний.

Все таблицы, графики, схемы сопровождаются пояснениями и нумерацией.

Отчет должен иметь титульный лист, на котором указывается:

- наименование вуза, факультета, кафедры;
- номер лабораторной работы, курс, по которому выполняется работа, тема работы;
- номер группы, фамилия и инициалы студента; данные о преподавателе, под руководством которого выполняется работа;
- город, год выполнения.

2. Содержание отчета.

1) Определить действительные токи во всех ветвях расчетной схемы.

Расчеты произвести по формуле:

$$I_{\text{ДЕЙСТ}} = I_{\text{МОД}} \cdot M_I \cdot I_B,$$

(4)

где $I_{\text{МОД}}$ – токи в [мА], полученные в результате измерения на СМП;

$M_I = 0,0125$ [о. е. тока / мА мод] – рекомендуемый масштаб по току.

2) Определить действительные напряжения во всех узловых точках

схемы в [кВ]:

$$U_{\text{ДЕЙСТ}} = U_{\text{МОД}} \cdot M_U \cdot U_{\text{СР Н}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{МОД}}$ – напряжения в [В], полученные в результате измерений,

$M_U = 0,125$ [о. е. напр. / В мод] рекомендуемый масштаб по напряжению.

3) По результатам измерений составить баланс токов в схеме, построить эпюру напряжений любой ветви от конца до начала схемы замещения.

4) Определить в точке повреждения мощность КЗ, соответствующую начальному моменту КЗ.

5) Рассчитать начальное значение тока трехфазного КЗ и сравнить его с результатами измерений.

6) Произвести расчет КЗ на ПЭВМ (программа ТКЗ), сравнить полученные результаты с измеренными и аналитическими расчетами (для студентов специальностей 100200 и 551702).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАЩИТА РАБОТЫ

1. Общие требования к защите работ №1 ÷ 4.

Зачет по лабораторной работе выставляется после сдачи отчета и получения удовлетворительной оценки в результате тестирования. При сдаче отчета выставляется оценка за степень его соответствия требованиям и правильность выполнения работы. Совместно с оценкой, полученной при тестировании, она участвует в суммарном рейтинге курса, влияющем на условия сдачи экзамена либо зачета.

2. Контрольные вопросы к лабораторной работе №1.

- 1) Каков принцип построения СМП?
- 2) Какова точность результатов измерений, получаемых на СМП?
- 3) Чем обусловлена погрешность СМП?

- 4) Зависит ли точность расчета от выбора системы единиц?
- 5) Каковы достоинства расчета токов КЗ на СМП?
- 6) Что называется переходной и сверхпереходной ЭДС?
- 7) Что понимают под обобщенной нагрузкой?
- 8) Как оценивают параметры нагрузки в начальный момент КЗ?
- 9) Что понимают под мощностью КЗ?
- 10) Каким образом представляется синхронная машина в начальный момент КЗ?
- 11) Что такое среднее напряжение?
- 12) Каким образом выбираются базисные условия?

ЛИТЕРАТУРА

1. Демин Ю.И., Киркоров О.Р. Методы расчета КЗ в электрических сетях и системах: Методические указания к курсовому и дипломному проектам, самостоятельной работе для студентов всех форм обучения специальностей 100200 и 100400. СевКавГТУ, Ставрополь, 2002. – 36 с.
2. Демин Ю.И. Типовой расчет электромагнитных переходных процессов в электрических системах напряжением свыше 1 кВ: Методические указания для студентов всех форм обучения специальностей 100200, 100400. СевКавГТУ, Ставрополь, 2003. – 46 с.
3. Короткое замыкание в электроустановках. Методы расчета в электроустановках свыше 1 кВ. ГОСТ 27514-87. М.: Изд-во стандартов, 1988. – 40 с.
4. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору оборудования / Под. Ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ»,

2003. – 283 с.

6. Демин Ю.И., Минченко Ю.Д., Киркоров О.Р. Методические указания по расчетам токов КЗ в электрических сетях на ПЭВМ для студентов всех форм обучения специальностей 1002, 1004. СтПИ, Ставрополь, 1994. – 20 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Исследование несимметричных КЗ в сетях выше 1 кВ

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ

1. Изучение методики расчета режимов электрических систем при однократной поперечной несимметрии.
2. Определение токов и напряжений и их распределение в схеме с несимметричным КЗ.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

1. Общие теоретические предпосылки аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Методика предварительных расчетов.

В настоящей работе исследуются несимметричные режимы, относящиеся к разновидности однократной поперечной несимметрии: двухфазное КЗ, однофазное и двухфазное КЗ на землю. При этом считается, что переходное сопротивление дуги равно нулю, т. е. рассматривается металлическое КЗ. В основу математического анализа несимметричных режимов положен метод симметричных составляющих [5].

Задача расчета несимметричных КЗ состоит в определении:

- симметричных составляющих токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей на основе уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа для каждой последовательности;
- граничных условий, характеризующих, тот или иной вид несимметрии;
- фазных токов и напряжений, определяемых путем векторного суммирования соответствующих составляющих.

На расчетной модели исследуют комплексные схемы замещения,

включающие соединенные в определенном порядке схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей [5].

Основным условием достоверности результатов является правильное определение сопротивлений элементов для различных последовательностей и их объединение в комплексную схему.

АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ

Аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Общая методика выполнения работы аналогична приведенной в лабораторной работе №1.

2. Общий порядок выполнения работы аналогичен приведенному в лабораторной работе №1.

Кроме того необходимо выполнить следующее:

1) Произвести измерение токов и напряжений в каждом элементе схем прямой, обратной и нулевой последовательностей для $K^{(1,1)}$. Для измерения токов и напряжений необходимо: нажать ключ блока «контрольные точки», соответствующий номерам, приведенным на схемах замещения. Для прямой последовательности номер ключа начинается с цифры 1, для обратной – с 2, для нулевой – с 0. Например, необходимо замерить ток и напряжение в точке 1 схем прямой, обратной и нулевой последовательностей; для прямой последовательности нажимаем ключ 101, для обратной – 201, для нулевой – 001.

2) Произвести измерения общего тока прямой последовательности

(ключ $I_{\Sigma K3}$) для всех видов КЗ. Результаты измерений сохранить для оформления отчета следующей лабораторной работы №3.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

1. Общие требования к отчету и его форме аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Содержание отчета.

1) Обработать результаты измерений аналогично приведенным в лабораторной работе №1 методических указаний.

2) Используя 1-й и 2-й законы Кирхгофа, определить суммарные токи обратной и нулевой последовательностей в комплексной схеме замещения [1, 2, 5].

3) Аналитически (и на ПЭВМ для студентов специальностей 100200 и 551702) рассчитать токи и напряжения двухфазного КЗ на землю. Сравнить эти результаты с экспериментальными, полученными на СМП.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАЩИТА РАБОТЫ

1. Общие требования к защите аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Контрольные вопросы к лабораторной работе №2.

1) На каких допущениях основано использование метода симметричных составляющих для расчетов несимметричных КЗ электрических систем?

2) От каких факторов зависит сопротивление нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов?

3) От каких факторов зависит сопротивление нулевой последовательности воздушных и кабельных линий?

4) Как определить сопротивление обратной последовательности

синхронной машины и почему его величину можно принимать практически неизменной во времени?

5) Каковы комплексные схемы замещения для несимметричных КЗ?

6) От каких факторов зависит величина токов любой последовательности и как определяется их распределение?

7) Каковы соотношения между сопротивлениями различных последовательностей для элементов электрической сети?

8) Каковы особенности составления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей?

ЛИТЕРАТУРА

Аналогична приведенной в лабораторной работе №1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Сравнение различных видов КЗ в сетях свыше 1 кВ

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ

Сравнить токи и напряжения в месте повреждения при различных видах КЗ в одной и той же точке системы.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

1. Общие теоретические предпосылки аналогичны приведенным в лабораторных работах №1, 2.

2. Методика предварительных расчетов.

Проектирование электроэнергетических сетей и систем включает в себя, например, выбор: электрической схемы соединения станций и подстанций; аппаратов и проводов по условиям их работы при КЗ; уставок релейной защиты и автоматики и т. п. В связи с этим необходимо установить виды КЗ, при которых токи сопровождаются наибольшими электродинамическими и термическими воздействиями на аппараты и токоведущие части электрических установок. Такой вид КЗ обычно называется расчетным видом КЗ.

В большинстве случаев расчетным видом КЗ является трехфазное. Поэтому силовое оборудование рассчитывается и выбирается по условиям трехфазного КЗ.

Однако, как показывает практика расчетов КЗ, в некоторых случаях расчетными могут быть и другие виды КЗ. В настоящей работе одной из задач является оценка соотношений между токами трехфазного КЗ и одного из сравниваемых несимметричных КЗ (двухфазного, двухфазного на землю, однофазного на землю).

Сравнение проводят в случае, когда КЗ происходит поочередно в одной

и той же точке системы и исходные условия одни и те же.

Знание предельных соотношений между токами представляет определенный практический интерес, т. к. позволяет по известной для данной точки величине тока трехфазного КЗ оценить в первом приближении наибольшие и наименьшие токи при различных несимметричных КЗ.

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности, ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ (n) может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$. Для точки КЗ справедливы следующие неравенства:

для дополнительного сопротивления:

$$\Delta X^{(1)} > \Delta X^{(2)} > \Delta X^{(1.1)} > \Delta X^{(3)} = 0; \quad (6)$$

для токов:

$$I_{K1}^{(1)} < I_{K1}^{(2)} < I_{K1}^{(1.1)} < I_K^{(3)} = I_{K1}^{(3)}; \quad (7)$$

для напряжений:

$$\underline{U}_{K1}^{(1)} > \underline{U}_{K1}^{(2)} > \underline{U}_{K1}^{(1.1)} > \underline{U}_K^{(3)} = \underline{U}_{K1}^{(3)} = 0. \quad (8)$$

Фазные токи в месте КЗ пропорциональны току прямой последовательности. Фазный ток в месте любого (n) несимметричного КЗ можно представить в виде:

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{K1}^{(n)}, \quad (9)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, определяемый по данным [1, 3÷ 5].

Величину отношения токов различных КЗ характеризует, коэффициент, определяемый соотношением:

$$K_0^{(n)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = m^{(n)} \frac{E_{\Sigma}^{(n)}}{E_{\Sigma}^{(3)}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta X^{(n)}}{X_{\Sigma 1}}}; \quad (10)$$

$$K_0^{(n)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = \frac{\frac{E_{\Sigma}^{(n)}}{X_{\Sigma 1} + \Delta X^{(n)}} \cdot m^{(n)}}{\frac{E_{\Sigma}^{(3)}}{X_{\Sigma 1}}} = \alpha \cdot \frac{m^{(n)}}{1 + \frac{\Delta X^{(n)}}{X_{\Sigma 1}}}; \quad (11)$$

$$\text{обычно } \alpha = \frac{E_{\Sigma}^{(n)}}{E_{\Sigma}^{(3)}} \leq 1;$$

где $X_{\Sigma 1}$, $X_{\Sigma 2}$, $X_{\Sigma 0}$ – результирующие реактивности прямой, обратной и нулевой последовательностей.

С учётом принятого значения α выражения (10) и (11) можно переписать в виде:

$$K_0^{(n)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = \frac{m^{(n)}}{1 + \frac{\Delta X^{(n)}}{X_{\Sigma 1}}}. \quad (12)$$

Рассмотрим характер изменения коэффициента $K_0^{(n)}$ в зависимости от вида несимметричного КЗ и параметров сети.

Однофазное КЗ:

$$K_0^{(1)} = \frac{\alpha \cdot 3}{1 + \frac{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 1}}}, \quad 0 \leq K_0^{(1)} < 1,5. \quad (13)$$

Если допустить, что: $\alpha=1$, $X_{\Sigma 2} \cong X_{\Sigma 1}$, $0 < X_{\Sigma 0} < \infty$, то

$$K_0^{(1)} = \frac{3}{2 + \frac{X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 1}}} \text{ при } X_{\Sigma 0} \rightarrow 0, \quad K_0^{(1)} > 1, \quad (14)$$

т. е. ток при однофазном КЗ будет больше, чем при трехфазном КЗ.

Двухфазное КЗ (при допущении: $\alpha=1$, $X_{\Sigma 2} \cong X_{\Sigma 1}$):

$$K_0^{(2)} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{3}}{1 + \frac{X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 1}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87. \quad (15)$$

Ток при двухфазном КЗ без земли равен:

$$I_K^{(2)} = 0,87 \cdot I_K^{(3)}. \quad (16)$$

Двухфазное КЗ на землю (при допущении: $\alpha=1$, $X_{\Sigma 2} \cong X_{\Sigma 1}$,

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \leq K_0^{(1.1)} < \sqrt{3}.):$$

$$K_0^{(1.1)} = \frac{\alpha \cdot \frac{\sqrt{3}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} \cdot \sqrt{X_{\Sigma 2}^2 + X_{\Sigma 0}^2 + X_{\Sigma 2} \cdot X_{\Sigma 0}}}{1 + \frac{X_{\Sigma 2} \cdot X_{\Sigma 0}}{(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}) \cdot X_{\Sigma 1}}}. \quad (17)$$

При $X_{\Sigma 0} \rightarrow 0$ ток однофазного КЗ соизмерим с током двухфазного КЗ на землю, т. е. $K_0^{(1)} = 1,5$, $K_0^{(1.1)} = \sqrt{3}$. Ток двухфазного КЗ на землю будет больше, чем, при трехфазном КЗ.

Изменение отношения $K_0^{(n)}$ в зависимости от $X_{\Sigma 0}/X_{\Sigma 1}$, $X_{\Sigma 2} \cong X_{\Sigma 1}$ характеризует соответствующая кривая (рисунок 2). Как видно, в диапазоне $X_{\Sigma 0}/X_{\Sigma 1} = 0,2 \div 1$ ток однофазного КЗ немного больше тока двухфазного КЗ на землю, в то время как при остальных значениях $X_{\Sigma 0}/X_{\Sigma 1}$ имеет место обратное соотношение, которое увеличивается с ростом $X_{\Sigma 0}/X_{\Sigma 1}$.

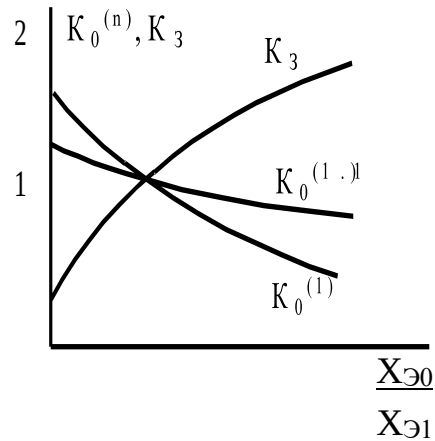


Рисунок 2

АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ

Аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Использовать данные, схемы замещения и результаты экспериментов на СМП, полученные в лабораторной работе № 2.
2. Для всех видов КЗ, т. е. $K^{(3)}$, $K^{(1.1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1)}$ произвести расчеты:
 - общего тока КЗ;
 - остаточного напряжения, токов и напряжений в узлах и элементах всех последовательностей.
3. В соответствии с граничными условиями, рассчитать в комплексном виде токи и напряжения всех последовательностей для вида КЗ, заданного в таблице П.4. Сравнить полученные результаты с экспериментальными (а также расчетами на ПЭВМ для специальностей 100200 и 551702).
4. Используя полученные результаты, построить векторные диаграммы

для токов и напряжений в масштабе именованных единиц в месте КЗ для $K^{(1.1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1)}$ (рисунки П.5÷ П.10).

5. В соответствии с [1, 3÷ 5] определить $\Delta X^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для заданного в предыдущей работе варианта коммутации и всех видов КЗ.

6. Изменяя коммутации нейтралей в соответствии с вариантами, приведенными в таблице П.4, снять показания токов $I_{K1}^{(n)}$ для всех видов КЗ.

Найти полные токи. Определить коэффициент $K_0^{(n)}$ для всех видов КЗ двумя способами (аналитически и с помощью данных, полученных на СМП) и

сравнить полученные результаты. Построить зависимость $K_0^{(n)} = f\left(\frac{X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 1}}\right)$

(смотри рисунок 2).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

1. Общие требования к отчету и его форме аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Содержание отчета.

Результаты, полученные в п.п. 1÷ 6 предыдущего раздела.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАЩИТА РАБОТЫ

1. Общие требования к защите аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Контрольные вопросы к лабораторной работе №3.

1) Какую опасность представляет собой любое несимметричное КЗ?

2) Что такое граничные условия?

3) Какова практическая применимость результатов сравнения КЗ?

ЛИТЕРАТУРА

Аналогична приведенной в лабораторной работе №1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование влияния нейтрали на токи КЗ на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ

Исследовать величины токов КЗ на землю в сетях с глухим заземлением нейтрали.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

1. Общие теоретические предпосылки аналогичны приведенным в лабораторных работах №1.

2. Методика предварительных расчетов.

В России с глухим заземлением нейтрали работают электроустановки с номинальным напряжением 110 кВ включительно и выше. Замыкания одной или двух фаз на землю в сетях с глухим заземлением нейтрали называют однофазным или двухфазным. Токи КЗ на землю могут достигать значительной величины, поэтому сети с глухим заземлением нейтрали называют сетями с большими токами замыкания на землю.

Величина токов КЗ на землю в большей степени зависит от результирующего сопротивления нулевой последовательности $X_{\Sigma 0}$, которое в свою очередь определяется количеством заземленных нейтралей трансформаторов сети. Сопротивление $X_{\Sigma 0}$ может меняться в очень широких пределах: при заземлении нейтралей всех имеющихся в схеме трансформаторов $X_{\Sigma 0} \rightarrow 0$, при разземлении нейтралей всех трансформаторов сети, результирующее сопротивление нулевой последовательности $X_{\Sigma 0}$ становится бесконечно большим. В последнем случае двухфазное КЗ на землю вырождается в замыкание между двумя фазами (двухфазное КЗ).

Одним из эффективных мероприятий по ограничению токов КЗ на

землю является частичное заземление нейтралей силовых трансформаторов.

Существуют следующие принципы заземления нейтралей трансформаторов:

1. Всегда заземляются нейтралей автотрансформаторов, т. к. у автотрансформатора обмотки среднего и высокого напряжения связаны электрически.

2. Всегда заземляются нейтралей трансформаторов, работающих в блоке с генератором.

3. На подстанциях и станциях типа ТЭЦ, имеющих два трансформатора, заземляется нейтраль одного из них. Если четыре трансформатора, то заземляются нейтралей у двух.

4. Кроме того, нейтралей можно заземлить через небольшое активное и индуктивное сопротивления, за счет чего увеличивается $X_{Э0}$.

Очевидно, что повышение тока при КЗ на землю недопустимо для обеспечения надежной работы оборудования. Поэтому в сетях с глухим заземлением нейтралей должны быть приняты меры по ограничению токов однофазного и двухфазного КЗ на землю.

Практический интерес представляет сравнение величин токов в земле ($I_3^{(n)}$) при однофазном и двухфазном КЗ на землю:

$$K_3 = \frac{I_3^{(1)}}{I_3^{(1.1)}} = \frac{I_{K0}^{(1)}}{I_{K0}^{(1.1)}}, \quad (18)$$

где $I_{K0}^{(n)}$ – ток нулевой последовательности для n-го вида КЗ.

Из (18) можно K_3 представить в виде:

$$K_3 = \frac{X_{Э1} \cdot X_{Э2} + X_{Э1} \cdot X_{Э0} + X_{Э2} \cdot X_{Э0}}{X_{Э1} \cdot X_{Э2} + X_{Э2}^2 + X_{Э2} \cdot X_{Э0}}, \quad (19)$$

откуда следует, что в зависимости от соотношений между $X_{Э2}^2$ и $X_{Э2} \cdot X_{Э0}$

может быть $K_3 \geq 1$.

При $X_{\varepsilon 2} = X_{\varepsilon 1}$ выражение (19) принимает вид:

$$K_3 = \frac{1 + 2 \cdot \frac{X_{\varepsilon 0}}{X_{\varepsilon 1}}}{2 + \frac{X_{\varepsilon 0}}{X_{\varepsilon 1}}}. \quad (20)$$

В данном случае K_3 изменяется в пределах: $0,5 < K_3 < 2$.

Изменение K_3 в функции от $X_{\varepsilon 0}/X_{\varepsilon 1}$ показано на рисунке 2. При $X_{\varepsilon 0} = X_{\varepsilon 1}$ токи в земле при сравниваемых видах КЗ одинаковы, при $X_{\varepsilon 0} > X_{\varepsilon 1}$ ток в земле, больше при однофазном КЗ, а при $X_{\varepsilon 0} < X_{\varepsilon 1}$, напротив, больше ток при двухфазном КЗ на землю.

Соотношения (19) и (20) справедливы для токов нулевой последовательности любой ветви схемы, так как они пропорциональны токам в месте КЗ.

АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ

Аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. В соответствии с вариантами, приведенными в таблице П.4, произвести измерение на СМП тока КЗ на землю (тока нулевой последовательности для $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$).
2. Для заданных вариантов коммутаций ключей нейтралей (таблица П.4) использовать $X_{\varepsilon 0}$, полученные в лабораторной работе №3.
3. Для всех вариантов определить K_3 аналитически и

экспериментально.

4. Построить кривую $K_3 = f\left(\frac{X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 1}}\right)$ (смотри рисунок 2).

5. Сравнить результаты аналитических расчетов и эксперимента (для специальностей 100200 и 551702 расчетов на ПЭВМ).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

1. Общие требования к отчету и его форме аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Содержание отчета.

Результаты, полученные в п.п. 1÷ 5 предыдущего раздела.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАЩИТА РАБОТЫ

1. Общие требования к защите аналогичны приведенным в лабораторной работе №1.

2. Контрольные вопросы к лабораторной работе №4.

1) От чего зависит ток нулевой последовательности (ток в земле) при несимметричном КЗ на землю?

2) Из каких соображений выбирают режим заземления нейтралей?

3) Каким образом можно ограничить ток нулевой последовательности (ток в земле)?

ЛИТЕРАТУРА

Аналогична приведенной в лабораторной работе №1.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1 – Задания на лабораторные работы

№ ва- ри- ан- та	Генераторы Г-1–Г-6					Трансформаторы Т1-Т3					
	Р _Н , МВт	cosφ _Н	X'' _d , о. е.	X ₂ , о. е.	U _Н , кВ	K _Р =3,5		Т1-Т2		Т-3	
						S _Н , МВА	U _{НН} , кВ	U _{НВ} , кВ	U _К , %	U _{НВ} , кВ	U _К , %
1	30	0,8	0,23	0,29	10,5	100	10,5	242	12	121	10,5
2	40	0,8	0,23	0,29	10,5	100	10,5	236	12	121	10,5
3	60	0,9	0,21	0,26	10,5	160	10,5	218	12	121	10,5
4	100	0,85	0,21	0,26	13,8	250	13,8	347	11	121	10,5
5	120	0,9	0,18	0,22	11	250	11	347	11	121	10,5
6	150	0,85	0,17	0,21	13,8	400	13,8	347	11	230	11
7	200	0,85	0,21	0,26	15,75	500	15,75	525	12	230	11
8	300	0,85	0,25	0,22	15,75	630	15,75	525	14	230	11
9	500	0,85	0,25	0,3	15,75	1250	15,75	525	14	230	11
№ ва- ри- ан- та	Автотрансформатор АТ							Асинхронный двигатель			
	S _Н , МВА	U _{НВ} , кВ	U _{НС} , кВ	U _{НН} , кВ	U _{КВ-С} , %	U _{КВ-Н} , %	U _{КС-Н} , %	Р, МВт	cosφ _Н	U _Н , кВ	X'' _{АД} , о. е.
1	100	230	135,5	6,3	11	31	19	32	0,9	6	0,1
2	100	230	128,7	6,3	11	31	19	40	0,91	6	0,2
3	160	230	123,4	6,3	11	31	19	50	0,91	6	0,3
4	200	347	106,5	6,3	10	34	22	40	0,91	6	0,4
5	200	347	113,7	6,3	10	34	22	30	0,91	6	0,5
6	250	347	253	6,3	10	34	22	80	0,91	6	0,6
7	400	525	242,5	11	10	29	17	80	0,91	6	0,7
8	500	525	236,2	11	10	29	17	80	0,91	6	0,8
9	630	525	242,5	11	9,5	29	17,5	50	0,91	6	0,9
№ ва- ри- ан- та	Линии				Нагрузки		Примечания				
	Л-1		Л-2		Н-1	Н-2					
	X _{уд} , Ом/км	L, км	X _{уд} , Ом/км	L, км	S _Н , МВА	S _Н , МВА					
1	0,43	80	0,4	30	20	100	1. S _Б =1000 МВА. 2. E _С =1 о. е. 3. E _Н =0,85 о. е. 4. E _Г =1,08 для вариантов 1-4; E _Г =1,13 для вариантов 5-9. 5. Л-1, Л-2 – двухцепные ЛЭП без тросов X ₀ /X=3. 6. E _{АД} =0,9; X'' _{АД} =X _{АД 1} =X _{АД 2} . 7. Н-1, Н-2: X _{Н-1} =X _{Н-2} =0,35 – для прямой и обратной последовательностей; X _{Н-1} =X _{Н-2} =0,2 – для нулевой последовательности.				
2	0,41	100	0,4	30	25	100					
3	0,41	150	0,4	40	30	120					
4	0,41	200	0,4	50	40	150					
5	0,41	200	0,4	100	40	160					
6	0,29	250	0,42	150	100	250					
7	0,29	650	0,42	120	100	250					
8	0,29	650	0,42	140	100	250					
9	0,29	600	0,42	150	150	300					

Таблица П.2 – Варианты коммутаций для лабораторной работы №1

№ варианта	Точка короткого замыкания	Номера выключателей, находящихся во включенном состоянии
1	К-1	В-2 В-7
2	К-2	В-2 В-3 В-6
3	К-2	В-1 В-7
4	К-3	В-1 В-3 В-6
5	К-4	В-3 В-4 В-5 В-8
6	К-4	В-3 В-4 В-5 В-6
7	К-5	В-3 В-4 В-5 В-8

Таблица П.3 – Варианты коммутаций для лабораторной работы №2

№ варианта	Точка КЗ	Номера выключателей, находящихся во включенном состоянии	Номера нейтралей, находящихся во включенном состоянии
1	К-5	В-8 В-5	НР-7
2	К-2	В-2	НР-2
3	К-2	В-1 В-7	НР-4
4	К-2	В-2	НР-3
5	К-6	В-8 В-5	НР-5
6	К-2	В-1 В-7	НР-3
7	К-2	В-3 В-6 В-7	НР-3 НР-4

Таблица П.4 – Варианты коммутаций для лабораторной работы №3, 4

№ варианта	Номера нейтралей, находящихся во включенном состоянии	Варианты замкнутых нейтралей			Вид рассматриваемых КЗ
		1	2	3	
1	НР-7 НР-5	НР-7	НР-5	НР-7 НР-5	1
2	НР-2 НР-3	НР-2	НР-3	НР-2 НР-3	1,1
3	НР-4 НР-3 НР-1	НР-4	НР-1	НР-3 НР-1	1
4	НР-3 НР-2	НР-3	НР-2	НР-3 НР-2	1,1
5	НР-5 НР-7	НР-5	НР-7	НР-7 НР-5	1
6	НР-3 НР-4 НР-1	НР-3	НР-1	НР-3 НР-4	1,1
7		НР-3	НР-6	НР-3 НР-4	1

Примечание: Все выключателя и нейтралей, не указанные в таблицах, считать разомкнутыми.

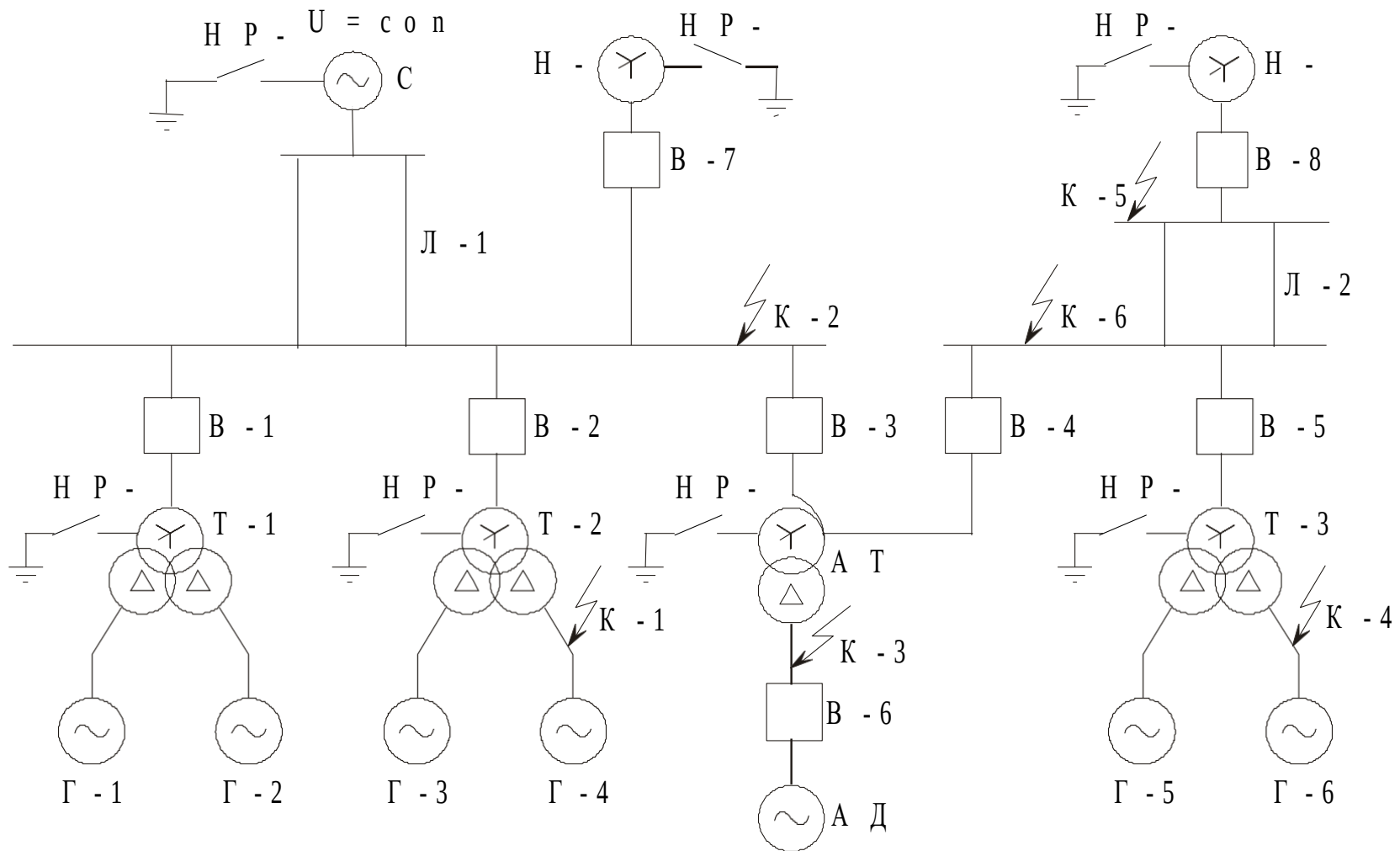


Рисунок П.1 – Расчетная схема сети

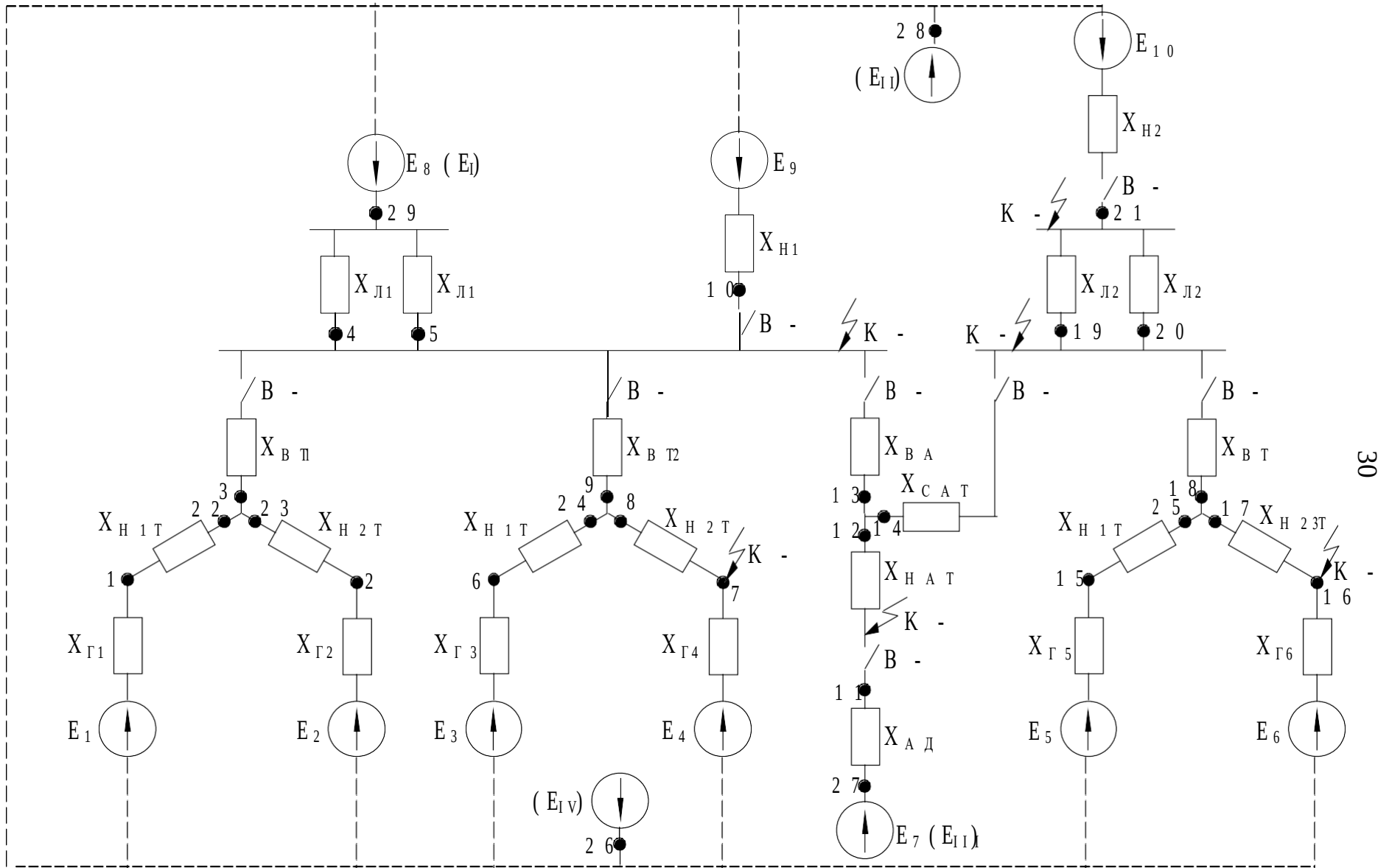


Рисунок П.2 – Схема замещения прямой последовательности

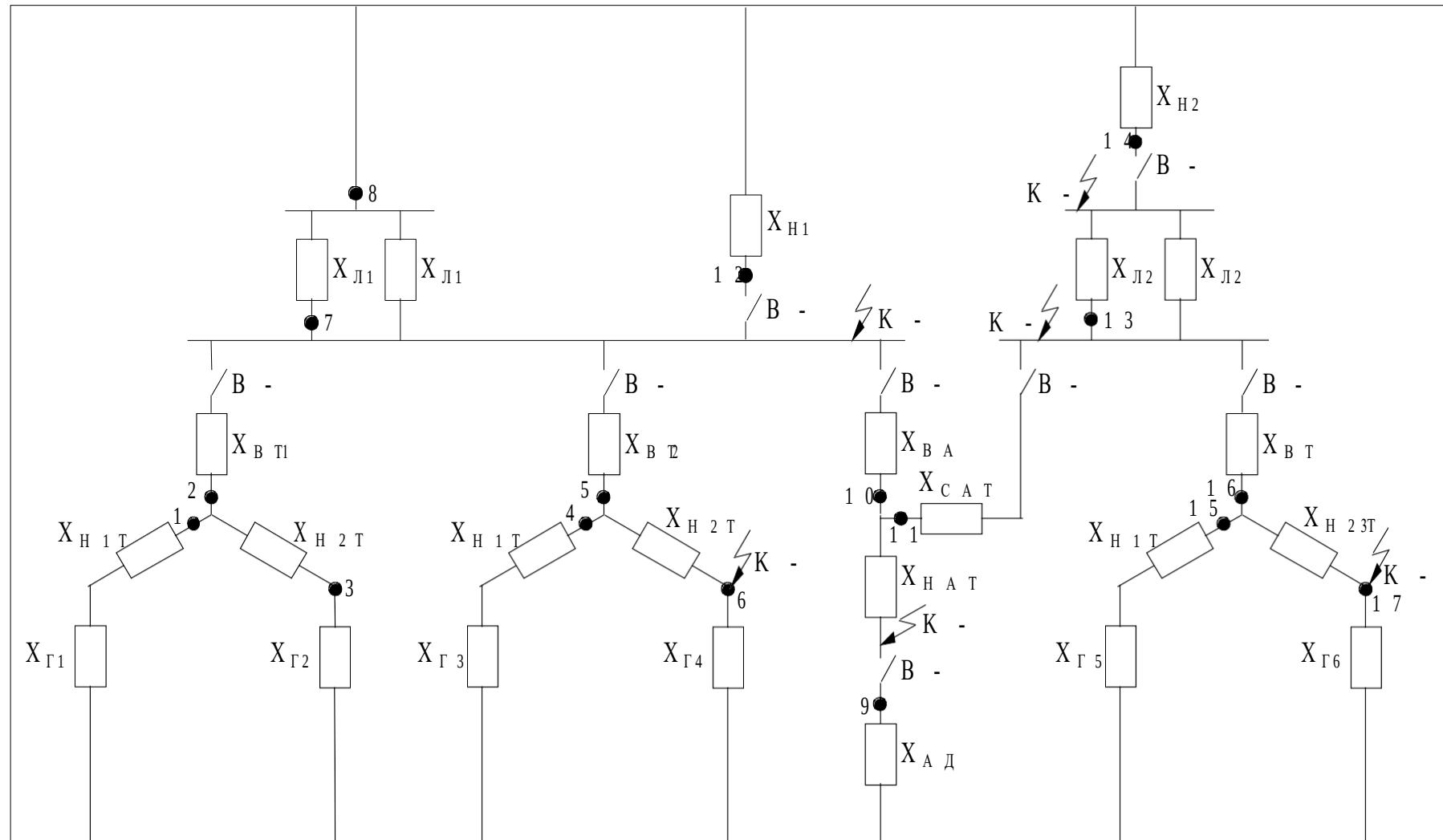


Рисунок П.3 – Схема замещения обратной последовательности

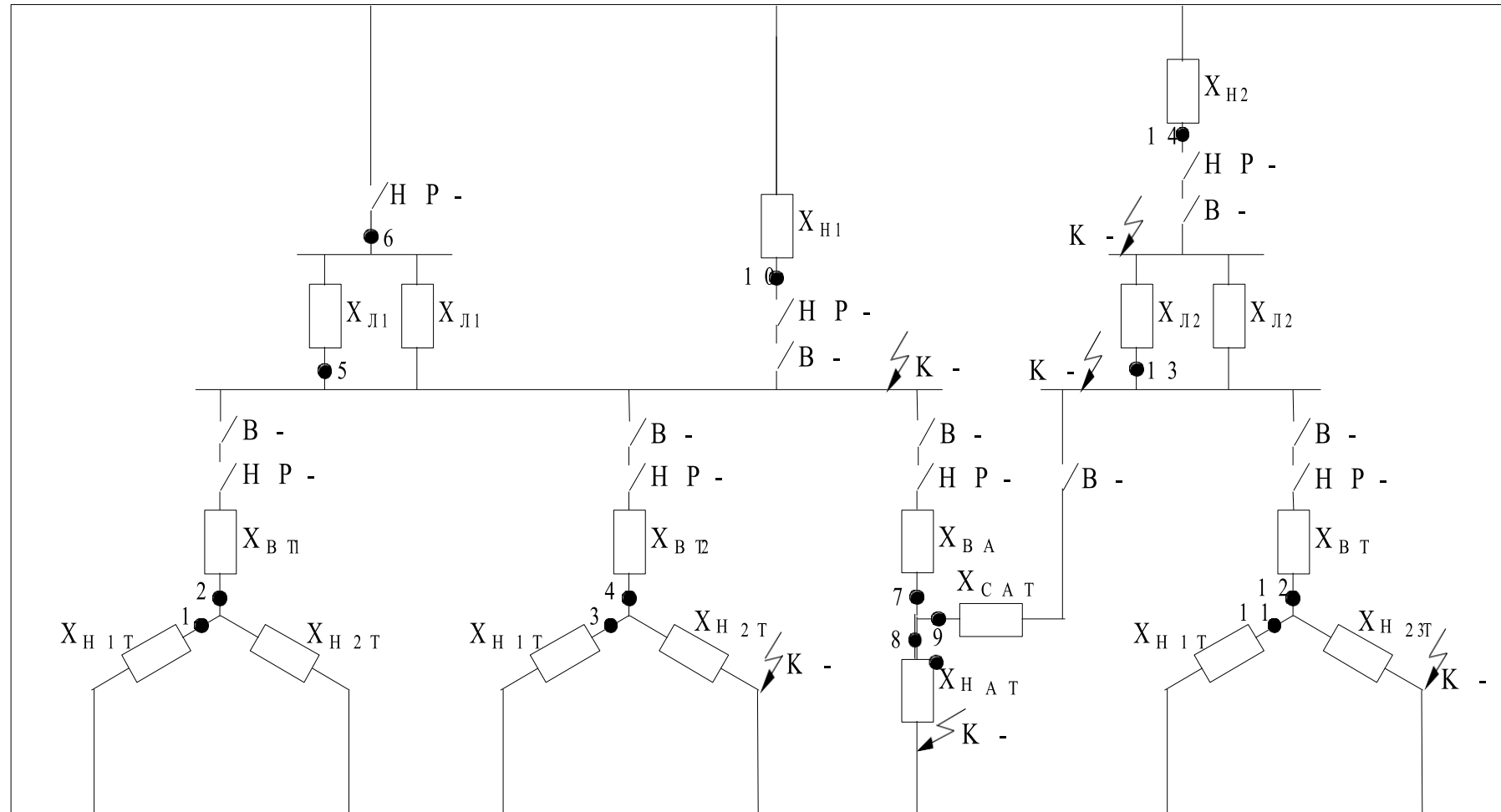


Рисунок П.4 – Схема замещения нулевой последовательности

Примечание: обозначения, применяемые на схемах замещения: 1) (•) – обозначены контрольные точки на СМП; 2) модели ЭДС на СМП обозначены следующим образом: E_I (E_8 – ЭДС системы); E_{II} (E_9, E_{10} – ЭДС нагрузок Н-1 и Н-

2); E_{III} ($E_7 - \text{ЭДС АД}$); E_{IV} ($E_1 \div E_6 - \text{ЭДС генераторов}$).

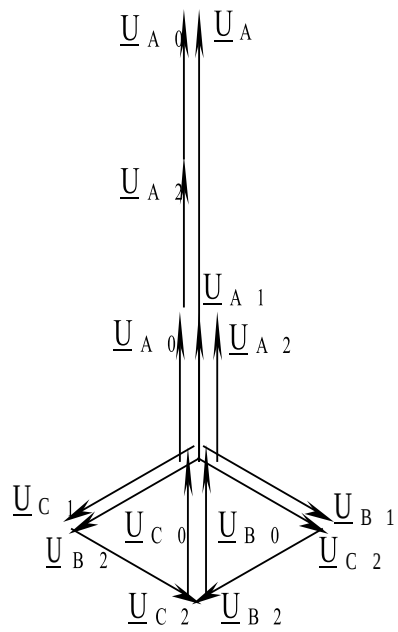


Рисунок П.5 – Векторная диаграмма напряжений для $K^{(1.1)}$

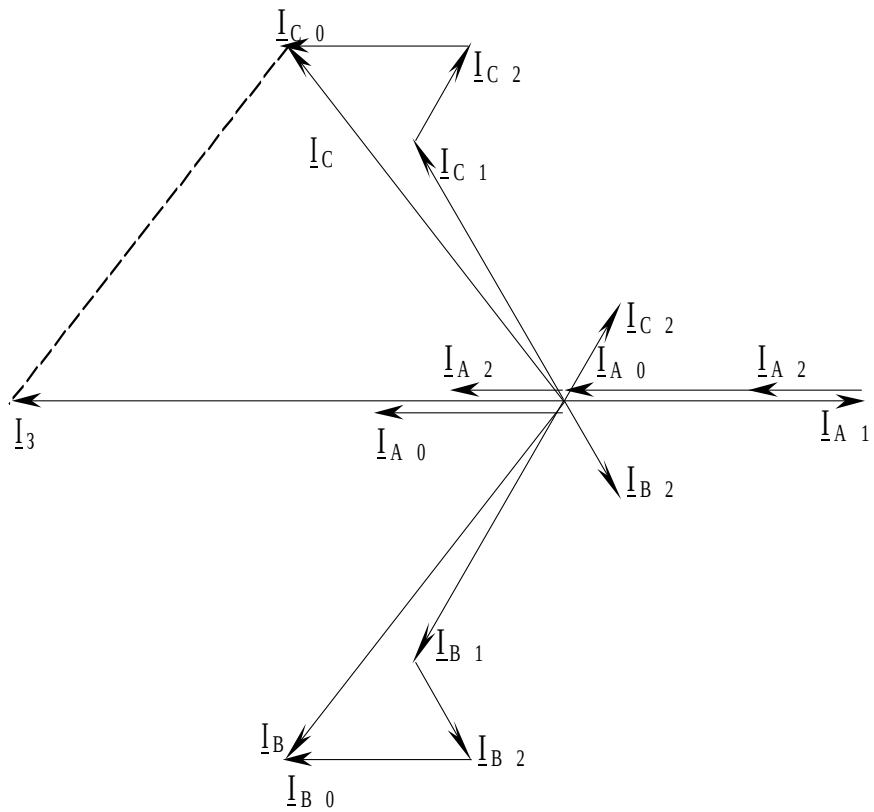


Рисунок П.6 – Векторная диаграмма токов для $K^{(1.1)}$

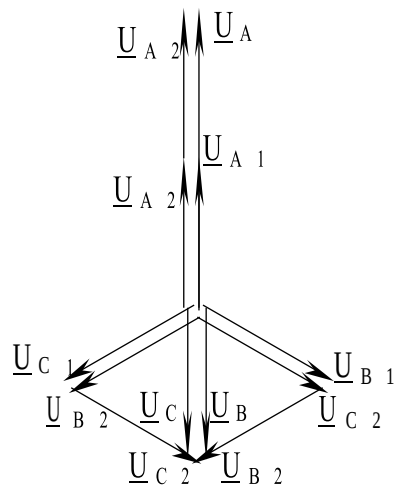


Рисунок П.7 – Векторная диаграмма напряжений для $K^{(2)}$

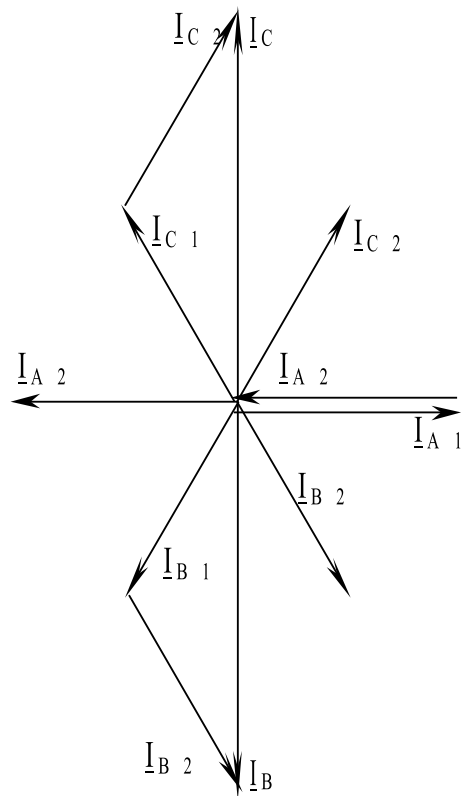


Рисунок П.8 – Векторная диаграмма токов для $K^{(2)}$

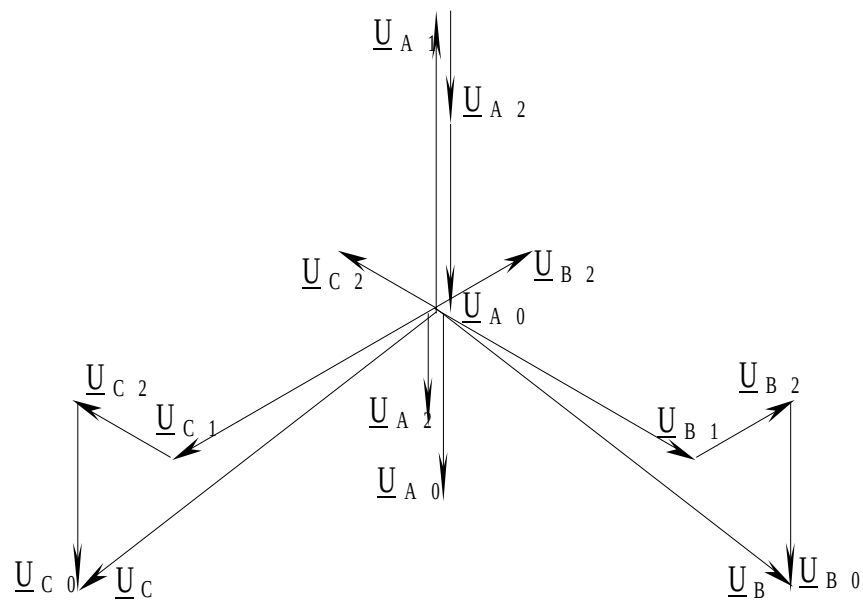


Рисунок П.9 – Векторная диаграмма напряжений для $K^{(1)}$

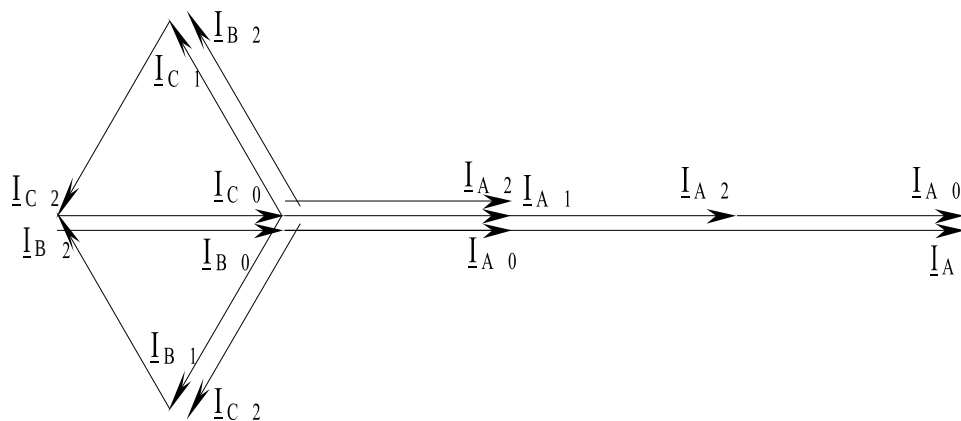


Рисунок П.10 – Векторная диаграмма токов для $K^{(1)}$

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Демин М.С.

Методические указания
по выполнению практических работ
по дисциплине
Электромагнитные переходные процессы

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) «Цифровые технологии в электроэнергетике»

Квалификация выпускника бакалавр
Изучается в 6 семестре

Ставрополь
2025

Определение параметров элементов электрических систем при отсутствии трансформаторных связей

Для отдельных элементов электроэнергетических систем составить схемы замещения и определить их параметры в относительных единицах при базисных условиях.

Типы элементов:

Синхронный генератор *T-6-2УЗ*.

Синхронный компенсатор *КС-10-6УЗ*.

Асинхронный двигатель *АТД-630 (4А3М-630)*.

Синхронный двигатель *СТД-630*.

Система – с номинальным напряжением *115 кВ* и мощностью короткого замыкания на шинах системы *630 МВА*.

Обобщенная нагрузка – с номинальным напряжением *6,3 кВ* и номинальной мощностью *150 МВА*.

Линия электропередачи – воздушная ЛЭП номинальным напряжением *35 кВ*, длиной *120 км*, выполнена проводом *АС-70*.

Одинарный реактор *РБ 10-400-0.45*.

Сдвоенный реактор *РБСД10-2×1000-0.35*.

Двухобмоточный трансформатор *ТМ-6300/10*.

Трехобмоточный трансформатор *ТДТН-16000/150*.

Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения *ТРДН-25000/110*.

Автотрансформатор *АТДЦТН-125000/220/110*.

Решение

Сначала выберем базисные условия:

$$S_{\bar{o}} = 100 \text{ МВА}; \quad U_{\bar{o}i} = U_{\text{ном}i},$$

где $S_{\bar{o}}$ – базисная полная мощность;

$U_{\bar{o}i}$ – базисное напряжение i -ой ступени трансформации;

$U_{\text{ном}i}$ – среднее номинальное напряжение i -ой ступени трансформации.

При определении реактивных сопротивлений для перевода из относительных единиц при номинальных условиях в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$x_{*\bar{\sigma}} = x_{*ном} \cdot \frac{S}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\bar{\sigma}}} \right)^2,$$

где $x_{*\bar{\sigma}}$ – реактивное сопротивление в относительных единицах при базисных условиях;

$x_{*ном}$ – реактивное сопротивление в относительных единицах при номинальных условиях;

$S_{ном}, U_{ном}$ – номинальные полная мощность и напряжение рассматриваемого элемента.

Для перевода из именованных единиц в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$x_{*\bar{\sigma}} = x \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2},$$

где x – реактивное сопротивление рассматриваемого элемента в именованных единицах.

Аналогичные выражения используются и при определении активных сопротивлений.

При определении э. д. с. для перевода из относительных единиц при номинальных условиях в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$E_{*\bar{\sigma}} = E_{*ном} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\bar{\sigma}}},$$

где $E_{*\bar{\sigma}}$ – э. д. с. в относительных единицах при базисных условиях;

$E_{*ном}$ – э. д. с. в относительных единицах при номинальных условиях.

Теперь составим схемы замещения и определим их параметры в относительных единицах при базисных условиях.

1. Синхронный генератор

Используя справочники, найдем каталожные данные генератора Т-6-2У3:

$$\begin{aligned} S_{ном} &= 7,5 \text{ МВА}; & U_{ном} &= 6,3 \text{ кВ}; & \cos \varphi_{ном} &= 0,8; \\ x_d &= 1,651; & x_d' &= 0,1708; & x_d'' &= 0,1208, \end{aligned}$$

где $S_{ном}$ – номинальная полная мощность;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение;

$\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности;

x_d – реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_d' – переходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_d'' – сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

Схема замещения генератора будет иметь вид, показанный на рисунке 1, а параметры этой схемы определяются из выражений:

сверхпереходное сопротивление генератора при базисных условиях:

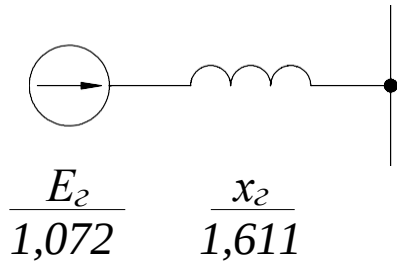


Рисунок 1

$$x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_{\delta}} \right)^2 =$$

$$= 0,1208 \cdot \frac{100}{7,5} \cdot \left(\frac{6,3}{6,3} \right)^2 = 1,611$$

Отметим, что множитель $\left(\frac{U_{ном}}{U_{\delta}} \right)^2$ при вы-

боре в качестве базисного среднего номинального напряжения каждой ступени трансформации принимает значение равное единице и поэтому в дальнейших расчетах может быть опущен. Величина сверхпереходной э. д. с. определится:

$$E_2 = (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{ном}) \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\delta}} = (1 + 0,1208 \cdot 0,6) \cdot \frac{6,3}{6,3} = 1,072.$$

И в этом выражении множитель $\frac{U_{ном}}{U_{\delta}}$ принимает значение равное единице, и поэтому в дальнейших расчетах может быть опущен.

2. Синхронный компенсатор

Используя справочники, найдем каталожные данные синхронного компенсатора КС-10-6У3:

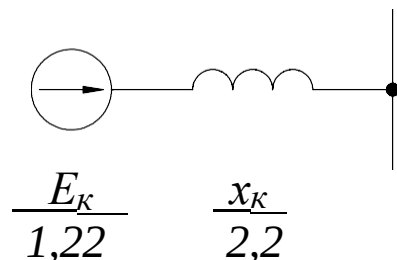


Рисунок 2

$$S_{ном} = 10 \text{ МВА}; \quad U_{ном} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$x_d = 1,85; \quad x_d' = 0,32; \quad x_d'' = 0,22.$$

Схема замещения компенсатора будет иметь вид, показанный на рисунке 2, а параметры этой схемы определяются из выражений:
сверхпереходное сопротивление компенсатора при базисных условиях:

$$x_{\kappa} = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = 0,22 \cdot \frac{100}{10} = 2,2.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. в относительных единицах при базисных условиях определится:

$$E_{\kappa} = 1 + x_d'' = 1 + 0,22 = 1,22.$$

3. Асинхронный двигатель

Каталожные данные асинхронного двигателя АТД-630 (4А3М-630):

$$P_{\text{ном}} = 630 \text{ кВт}; \quad U_{\text{ном}} = 6,3 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,88;$$

$$n_{\text{ном}} = 2979 \frac{\text{об}}{\text{мин}}; \quad k_n = 5,3; \quad S_{\text{ном}} = 0,7 \%,$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость вращения электродвигателя;

k_n – кратность пускового тока равная отношению пускового тока двигателя к номинальному: $k_n = \frac{J_n}{J_{\text{ном}}}$;

$S_{\text{ном}}$ – номинальное скольжение двигателя.

Схема замещения асинхронного двигателя будет иметь вид, показанный на рисунке 3. Определим полную мощность асинхронного двигателя:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{630}{0,88} = 716 \text{ кВА}.$$

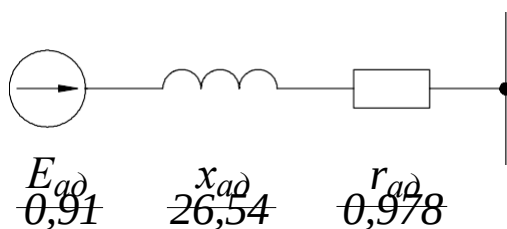


Рисунок 3

Значение реактивного сопротивления в относительных единицах при номинальных условиях определится:

$$x_{* \text{ ном}} = \frac{1}{k_n} = \frac{1}{5,3} = 0,19$$

и тогда найдем реактивное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_{a\partial} = x_{* \text{ ном}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = 0,19 \cdot \frac{100}{0,716} = 26,54.$$

Активное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при номинальных условиях:

$$r_{*ном} = S_{ном} = \frac{0,7}{100} = 0,007$$

и тогда активное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях:

$$r_{a\partial} = r_{*ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,007 \cdot \frac{100}{0,716} = 0,978.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях определится:

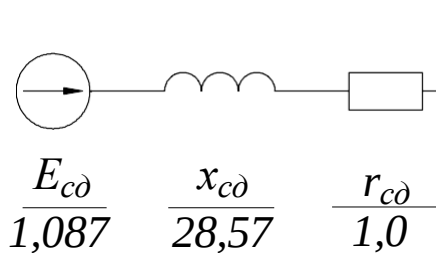
$$E_{a\partial} = 1 - x_{*ном} \cdot \sin \varphi_{ном} = 1 - 0,19 \cdot 0,475 = 0,91.$$

4. Синхронный двигатель

Каталожные данные синхронного двигателя *СТД-630*:

$$P_{ном} = 630 \text{ кВт}; \quad U_{ном} = 6,3 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{ном} = 0,9; \quad n_{ном} = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Схема замещения синхронного двигателя будет иметь вид, показанный на рисунке 4. Определим полную мощность синхронного двигателя:



$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном}} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ кВА}.$$

При отсутствии данных о сверхпереходном реактивном сопротивлении его значение принимается равным:

$$x_{*''ном} = 0,2.$$

Рисунок 4

Тогда реактивное сопротивление синхронного двигателя в относительных

единицах при базисных условиях:

$$x_{c\partial} = x_{*''ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,2 \cdot \frac{100}{0,7} = 28,57.$$

Активное сопротивление синхронного двигателя можно принять равным активному сопротивлению асинхронного двигателя ближайшему по мощности и приблизительно той же скорости. Для синхронного двигателя *СТД-630* таким асинхронным двигателем является *АТД-630 (4АЗМ-630)* с номинальным скольжением $S_{ном} = 0,007$, тогда

$$r_{c\partial} = S_{ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,007 \cdot \frac{100}{0,7} = 1,0.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. синхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях определится:

$$E_{C\partial} = 1 + x_{*''\text{ном}} \cdot \sin \varphi_{\text{ном}} = 1 + 0,2 \cdot 0,436 = 1,087.$$

5. Система

Схема замещения системы будет иметь вид, показанный на рисунке 5.

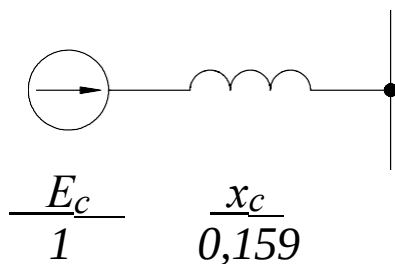


Рисунок 5

Для системы обычно задаются номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ и мощностью короткого замыкания на шинах системы S_{κ} . Тогда реактивное сопротивление системы в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_C = \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\kappa}} = \frac{100}{630} = 0,159.$$

Величина э. д. с. системы в относительных единицах при базисных условиях определится:

лится:

$$E_C = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\bar{6}}} = \frac{115}{115} = 1.$$

при отсутствии данных можно принять $x_C \approx 0$.

6. Обобщенная нагрузка

Схема замещения обобщенной нагрузки приведена на рисунке 6. Установлено, что в начальный момент переходного процесса обобщенную нагрузку можно приближенно характеризовать следующими величинами, выраженными в относительных единицах при номинальных условиях:

Рисунок 6

$$x_{н''\text{агр}} = 0,35,$$

$$E_{н''\text{агр}} = 0,85.$$

Тогда реактивное сопротивление обобщенной нагрузки в относительных единицах при базисных условиях определится:

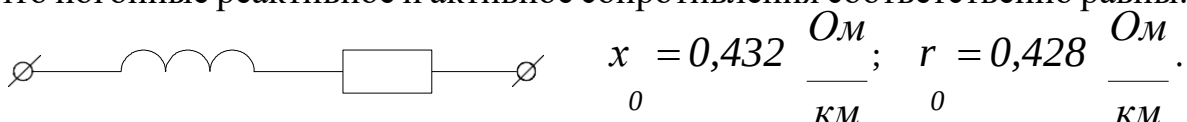
$$x_{\text{нагр}} = x_{н''\text{агр}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}} = 0,35 \cdot \frac{100}{150} = 0,233,$$

а величина э. д. с., так как базисное напряжение равно номинальному, определится:

$$E_{\text{наг}p} = E''_{\text{наг}p} = 0,85.$$

7. Линия электропередачи

Схема замещения линии электропередач приведена на рисунке 7. Из справочников для воздушной ЛЭП, выполненной проводом АС-70, найдем, что погонные реактивное и активное сопротивления соответственно равны:



x_l	r_l
4,232	4,193

Сопровождающие ЛЭП в именованных единицах находятся:

$$x = x_0 \cdot /; \quad r = r_0 \cdot /,$$

Рисунок 7

где l — длина линии электропередачи.

Тогда сопротивления ЛЭП в относительных единицах при базисных условиях можно определить:

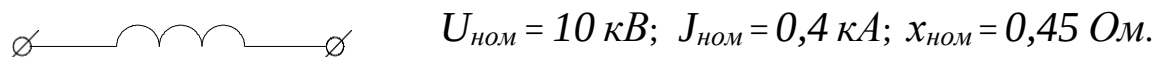
$$x_n = x_0 \cdot \frac{S_0}{U_0^2} = 0,432 \cdot 120 \cdot \frac{100}{35^2} = 4,232;$$

$$r_n = r_0 \cdot \frac{S_0}{U_0^2} = 0,428 \cdot 120 \cdot \frac{100}{35^2} = 4,193.$$

8. Одинарный реактор

Схема замещения одинарного реактора приведена на рисунке 8.

Из типа реактора *РБ 10-400-0,45* определяем его каталожные данные:



Тогда, так как базисное напряжение равно номинальному, определится сопротивление одинарного реактора в относительных единицах при базисных условиях:

$$\frac{x_p}{0,45}$$

$$x_p = x_{ном} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,45.$$

Рисунок 8

9. Сдвоенный реактор

Каталожные данные сдвоенного реактора РБСД10-2×1000-0.35:

$$U_{HOM} = 10 \text{ } \kappa B; \quad J_{HOM} = 960 \text{ } A; \quad x_{\theta} = 0,35 \text{ } OM; \quad k_p = 0,55,$$

где x_δ – номинальное сопротивление ветви реактора;

k_p – коэффициент связи.

Схема замещения сдвоенного реактора приведена на рисунке 9.

Сопротивления ветвей реактора в относительных единицах при базисных условиях находятся по формулам:

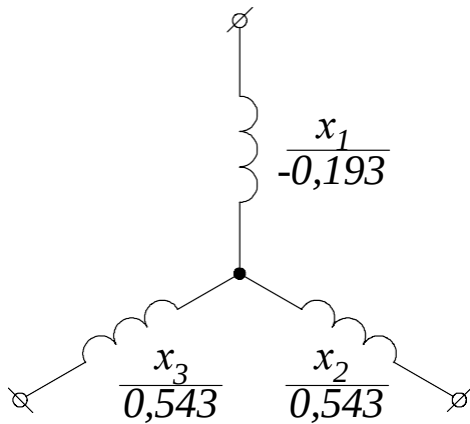


Рисунок 9

$$x_1 = -k_p \cdot x_\delta \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2} =$$

$$= -0,55 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{10^2} = -0,193;$$

$$x_2 = x_3 = (1 + k_p) \cdot x_\delta \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2} =$$

$$= (1 + 0,55) \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,543.$$

10. Двухобмоточный трансформатор

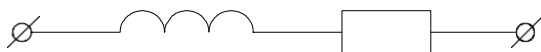
Используя справочники, найдем каталожные данные двухобмоточного трансформатора ТМ-6300/10:

$$S_{ном} = 6300 \text{ кВА}; \quad U_{ном} = 10 \text{ кВ}; \quad P_k = 46,5 \text{ кВт}; \quad u_k = 7,5 \%,$$

где P_k – потери в меди трансформатора;

u_k – напряжение короткого замыкания.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рисунке 10. Сопротивления трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях определяются по каталожным данным следующим образом:



$$\frac{x_m}{1,19} \quad \frac{r_m}{0,117}$$

Рисунок 10

$$r_{*ном} = \frac{P_k}{S_{ном}} = \frac{46,5}{6300} = 0,0074;$$

$$x_{*ном} = \frac{u_k}{100} = \frac{7,5}{100} = 0,075.$$

Тогда можем получить сопротивления трансформатора в относительных единицах при базисных условиях:

$$r_m = r_{*ном} \cdot \frac{S_\delta}{S_{ном}} = 0,0074 \cdot \frac{100}{6,3} = 0,117;$$

$$x_m = x_{*ном} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = 0,075 \cdot \frac{100}{6,3} = 1,19.$$

11. Трехобмоточный трансформатор

По справочнику найдем каталожные данные трехобмоточного трансформатора *ТДТН-16000/150*:

$$S_{ном} = 16 \text{ МВА}; U_{в ном} = 158 \text{ кВ}; U_{с ном} = 38,5 \text{ кВ}; U_{н ном} = 6,6 \text{ кВ};$$

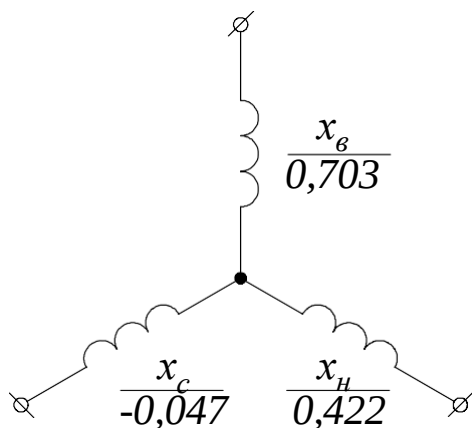
$$u_{к в с} = 10,5 \%; \quad u_{к в н} = 18 \%; \quad u_{к с н} = 6 \%,$$

где $U_{в ном}, U_{с ном}, U_{н ном}$ — соответственно высшее, среднее и низшее номинальные напряжения трансформатора;

$u_{к в с}, u_{к в н}, u_{к с н}$ — напряжение короткого замыкания между обмотками разного напряжения.

Обычно это мощные трансформаторы и активными сопротивлениями в них пренебрегают. Схема замещения трехобмоточного трансформатора приведена на рисунке 11.

Предварительно необходимо сделать пересчет напряжений короткого замыкания для обмоток различного напряжения:



$$u_{к в} = 0,5 \cdot (u_{к в с} + u_{к в н} - u_{к с н}) = 0,5 \cdot (10,5 + 18 - 6) = 11,25 \%;$$

$$u_{к с} = 0,5 \cdot (u_{к в с} + u_{к с н} - u_{к в н}) = 0,5 \cdot (10,5 + 6 - 18) = -0,75 \%;$$

$$u_{к н} = 0,5 \cdot (u_{к в н} + u_{к с н} - u_{к в с}) = 0,5 \cdot (18 + 6 - 10,5) = 6,75 \%.$$

Рисунок 11

Теперь можно определить сопротивления трехобмоточного трансформатора:

$$x_v = \frac{u_{к в}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{11,25}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,703;$$

$$x_c = \frac{u_{к с}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{-0,75}{100} \cdot \frac{100}{16} = -0,047;$$

$$x_n = \frac{u_{кн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,422.$$

12. Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения

Каталожные данные двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения *ТДТН-16000/150*:

$$S_{ном} = 25 \text{ МВА}; \quad U_{ном} = 115 \text{ кВ}; \quad u_{квн} = 10,5 \text{ \%}.$$

Обычно активными сопротивлениями для таких трансформаторов пренебрегают. Схема замещения двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения приведена на рисунке 12. Параметры этой схемы определяют следующим образом:

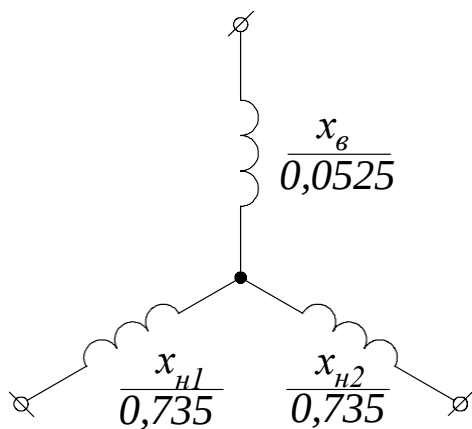


Рисунок 12

$$\begin{aligned} x_{\text{в}} &= 0,125 \cdot \frac{u_{квн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \\ &= 0,125 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,0525; \\ x_{н1} = x_{н2} &= 1,75 \cdot \frac{u_{квн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \\ &= 1,75 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,735. \end{aligned}$$

13. Автотрансформатор

По справочнику найдем каталожные данные автотрансформатора *АТ-ДЦТН-125000/220/110*:

$$\begin{aligned} S_{ном} &= 125 \text{ МВА}; \quad U_{\text{в ном}} = 230 \text{ кВ}; \quad U_{\text{с ном}} = 121 \text{ кВ}; \quad U_{\text{н ном}} = 6,6 \text{ кВ}; \\ u_{к\text{вс}} &= 11 \text{ \%}; \quad u'_{к\text{вн}} = 45 \text{ \%}; \quad u'_{к\text{сн}} = 28 \text{ \%,} \end{aligned}$$

где $u_{к\text{вс}}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и среднего напряжения;

$u'_{к\text{вн}}$, $u'_{к\text{сн}}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и низшего, и среднего и низшего напряжения отнесенные к типовой мощности S_m .

Активным сопротивлением автотрансформаторов пренебрегают. Схема замещения автотрансформатора приведена на рисунке 13.

Предварительно необходимо пересчитать $u'_{к вн}$ и $u'_{к сн}$ к номинальной мощности автотрансформатора.

Для этого сначала определим коэффициент выгоды:

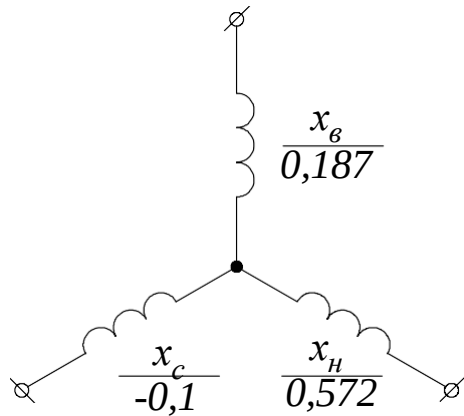


Рисунок 13

$$\alpha = \frac{U_{в ном} - U_{с ном}}{U_{в ном}} = \frac{230 - 121}{230} = 0,474.$$

Теперь найдем типовую мощность автотрансформатора:

$$S_m = \alpha \cdot S_{ном} = 0,474 \cdot 125 = 59,24 \text{ МВА}.$$

Определим напряжения короткого замыкания между обмотками высшего и низшего, и среднего и низшего напряжения отнесенные к номинальной мощности автотрансформатора:

$$u_{к вн} = u'_{к вн} \cdot \frac{S_{ном}}{S_m} = 45 \cdot \frac{125}{59,24} = 94,95 \%;$$

$$u_{к сн} = u'_{к сн} \cdot \frac{S_{ном}}{S_m} = 28 \cdot \frac{125}{59,24} = 59,08 \%.$$

Пересчитаем напряжения короткого замыкания для обмоток различного напряжения:

$$u_{к в} = 0,5 \cdot (u_{к вс} + u_{к вн} - u_{к сн}) = 0,5 \cdot (11 + 94,95 - 59,08) = 23,43 \%;$$

$$u_{к с} = 0,5 \cdot (u_{к вс} + u_{к сн} - u_{к вн}) = 0,5 \cdot (11 + 59,08 - 94,95) = -12,44 \%;$$

$$u_{к н} = 0,5 \cdot (u_{к вн} + u_{к сн} - u_{к вс}) = 0,5 \cdot (94,95 + 59,08 - 11) = 71,52 \%.$$

Теперь определим сопротивления трехобмоточного трансформатора:

$$x_{\text{в}} = \frac{u_{к в}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{23,43}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,187;$$

$$x_{\text{с}} = \frac{u_{к с}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{-12,44}{100} \cdot \frac{100}{125} = -0,1;$$

$$x_{\text{н}} = \frac{u_{к н}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{71,52}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,572.$$

Задание для самостоятельного решения

Цепь состоит из последовательно соединенных реактора с x_{LR} при I_{LRh} и $U_{LRh} = 6$ кВ и кабеля длиной l , удельные сопротивления которого $x_{0\text{ кл}}$ и $r_{0\text{ кл}}$.
 Определить активное, индуктивное и полное сопротивления цепи, выразив их: а) в именованных единицах; б) в относительных единицах при номинальных условиях реактора.

Вариант	$x_{LR}, \%$	I_{LRh}, A	$l, \text{км}$	$x_0, \text{Ом/км}$	$r_0, \text{Ом/км}$
1	2	120	1	0,064	0,123
2	2,5	125	1,05	0,065	0,124
3	3	130	1,1	0,066	0,125
4	3,5	135	1,15	0,067	0,126
5	4	140	1,2	0,068	0,127
6	4,5	145	1,25	0,069	0,128
7	5	150	1,3	0,07	0,129
8	5,5	155	1,35	0,071	0,13
9	6	160	1,4	0,072	0,131
10	2	165	1,45	0,073	0,132
11	2,5	170	1,5	0,074	0,133
12	3	175	1,55	0,075	0,134
13	3,5	180	1,6	0,076	0,135
14	4	185	1,65	0,077	0,136
15	4,5	190	1,7	0,078	0,137
16	5	195	1,75	0,079	0,138
17	5,5	200	1,8	0,08	0,139
18	6	205	1,85	0,081	0,14
19	2	210	1,9	0,082	0,141
20	2,5	215	1,95	0,083	0,142
21	3	220	2	0,084	0,143
22	3,5	225	2,05	0,085	0,144
23	4	230	2,1	0,086	0,145
24	4,5	235	2,15	0,087	0,146
25	5	240	2,2	0,088	0,147
26	5,5	245	2,25	0,089	0,148
27	6	250	2,3	0,09	0,149
28	2	255	2,35	0,091	0,15
29	2,5	260	2,4	0,092	0,151
30	3	265	2,45	0,093	0,152
31	3,5	270	2,5	0,094	0,153

Вариант	$\chi_{LR}, \%$	I_{LRh}, A	$l, \text{км}$	$\chi_0, \text{Ом/км}$	$r_0, \text{Ом/км}$
32	4	275	2,55	0,095	0,154
33	4,5	280	2,6	0,096	0,155
34	5	285	2,65	0,097	0,156
35	5,5	290	2,7	0,098	0,157
36	6	295	2,75	0,099	0,158
37	2	300	2,8	0,1	0,159
38	2,5	305	2,85	0,101	0,16
39	3	310	2,9	0,102	0,161
40	3,5	315	2,95	0,103	0,162
41	4	320	3	0,104	0,163
42	4,5	325	3,05	0,105	0,164
43	5	330	3,1	0,106	0,165
44	5,5	335	3,15	0,107	0,166
45	6	340	3,2	0,108	0,167
46	2	345	3,25	0,109	0,168
47	2,5	350	3,3	0,11	0,169
48	3	355	3,35	0,111	0,17
49	3,5	360	3,4	0,112	0,171
50	4	365	3,45	0,113	0,172

Определение параметров элементов электрических систем при наличии трансформаторных связей

Для отдельных элементов электроэнергетических систем составить схемы замещения и определить их параметры в относительных единицах при базисных условиях.

Типы элементов:

Синхронный генератор *Т-6-2УЗ*.

Синхронный компенсатор *КС-10-6УЗ*.

Асинхронный двигатель *АТД-630 (4А3М-630)*.

Синхронный двигатель *СТД-630*.

Система – с номинальным напряжением *115 кВ* и мощностью короткого замыкания на шинах системы *630 МВА*.

Обобщенная нагрузка – с номинальным напряжением *6,3 кВ* и номинальной мощностью *150 МВА*.

Линия электропередачи – воздушная ЛЭП номинальным напряжением *35 кВ*, длиной *120 км*, выполнена проводом *АС-70*.

Одинарный реактор *РБ 10-400-0.45*.

Сдвоенный реактор *РБСД10-2×1000-0.35*.

Двухобмоточный трансформатор *ТМ-6300/10*.

Трехобмоточный трансформатор *ТДТН-16000/150*.

Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения *ТРДН-25000/110*.

Автотрансформатор *АТДЦТН-125000/220/110*.

Решение

Сначала выберем базисные условия:

$$S_{\bar{o}} = 100 \text{ МВА}; \quad U_{\bar{o}i} = U_{\text{ном}i},$$

где $S_{\bar{o}}$ – базисная полная мощность;

$U_{\bar{o}i}$ – базисное напряжение i -ой ступени трансформации;

$U_{\text{ном}i}$ – среднее номинальное напряжение i -ой ступени трансформации.

При определении реактивных сопротивлений для перевода из относительных единиц при номинальных условиях в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$x_{*\bar{\delta}} = x_{*ном} \cdot \frac{S}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\bar{\delta}}} \right)^2,$$

где $x_{*\bar{\delta}}$ – реактивное сопротивление в относительных единицах при базисных условиях;

$x_{*ном}$ – реактивное сопротивление в относительных единицах при номинальных условиях;

$S_{ном}, U_{ном}$ – номинальные полная мощность и напряжение рассматриваемого элемента.

Для перевода из именованных единиц в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$x_{*\bar{\delta}} = x \cdot \frac{S_{\bar{\delta}}}{U_{\bar{\delta}}^2},$$

где x – реактивное сопротивление рассматриваемого элемента в именованных единицах.

Аналогичные выражения используются и при определении активных сопротивлений.

При определении э. д. с. для перевода из относительных единиц при номинальных условиях в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$E_{*\bar{\delta}} = E_{*ном} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\bar{\delta}}},$$

где $E_{*\bar{\delta}}$ – э. д. с. в относительных единицах при базисных условиях;

$E_{*ном}$ – э. д. с. в относительных единицах при номинальных условиях.

Теперь составим схемы замещения и определим их параметры в относительных единицах при базисных условиях.

1. Синхронный генератор

Используя справочники, найдем каталожные данные генератора Т-6-2У3:

$$\begin{aligned} S_{ном} &= 7,5 \text{ МВА}; & U_{ном} &= 6,3 \text{ кВ}; & \cos \varphi_{ном} &= 0,8; \\ x_d &= 1,651; & x_d' &= 0,1708; & x_d'' &= 0,1208, \end{aligned}$$

где $S_{ном}$ – номинальная полная мощность;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение;

$\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности;

x_d – реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_d' – переходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_d'' – сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

Схема замещения генератора будет иметь вид, показанный на рисунке 1, а параметры этой схемы определяются из выражений:

сверхпереходное сопротивление генератора при базисных условиях:

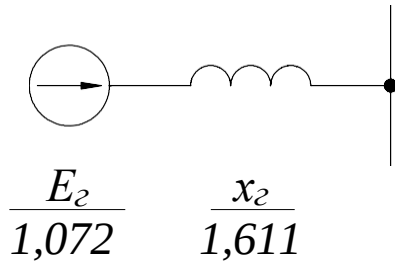


Рисунок 1

$$x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_{\delta}} \right)^2 =$$

$$= 0,1208 \cdot \frac{100}{7,5} \cdot \left(\frac{6,3}{6,3} \right)^2 = 1,611$$

Отметим, что множитель $\left(\frac{U_{ном}}{U_{\delta}} \right)^2$ при вы-

боре в качестве базисного среднего номинального напряжения каждой ступени трансформации принимает значение равное единице и поэтому в дальнейших расчетах может быть опущен. Величина сверхпереходной э. д. с. определится:

$$E_2 = \left(1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{ном} \right) \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\delta}} = \left(1 + 0,1208 \cdot 0,6 \right) \cdot \frac{6,3}{6,3} = 1,072.$$

И в этом выражении множитель $\frac{U_{ном}}{U_{\delta}}$ принимает значение равное единице, и поэтому в дальнейших расчетах может быть опущен.

2. Синхронный компенсатор

Используя справочники, найдем каталожные данные синхронного компенсатора КС-10-6У3:

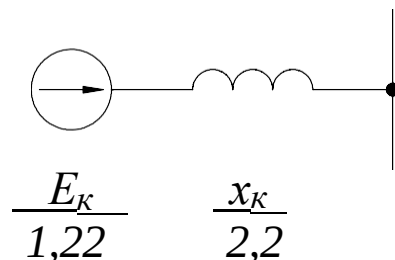


Рисунок 2

$$S_{ном} = 10 \text{ МВА}; \quad U_{ном} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$x_d = 1,85; \quad x_d' = 0,32; \quad x_d'' = 0,22.$$

Схема замещения компенсатора будет иметь вид, показанный на рисунке 2, а параметры этой схемы определяются из выражений:
сверхпереходное сопротивление компенсатора при базисных условиях:

$$x_{\kappa} = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = 0,22 \cdot \frac{100}{10} = 2,2.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. в относительных единицах при базисных условиях определится:

$$E_{\kappa} = 1 + x_d'' = 1 + 0,22 = 1,22.$$

3. Асинхронный двигатель

Каталожные данные асинхронного двигателя АТД-630 (4А3М-630):

$$\begin{aligned} P_{\text{ном}} &= 630 \text{ кВт}; & U_{\text{ном}} &= 6,3 \text{ кВ}; & \cos \varphi_{\text{ном}} &= 0,88; \\ n_{\text{ном}} &= 2979 \frac{\text{об}}{\text{мин}}; & k_n &= 5,3; & S_{\text{ном}} &= 0,7 \% , \end{aligned}$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость вращения электродвигателя;

k_n – кратность пускового тока равная отношению пускового тока двигателя к номинальному: $k_n = \frac{J_n}{J_{\text{ном}}}$;

$S_{\text{ном}}$ – номинальное скольжение двигателя.

Схема замещения асинхронного двигателя будет иметь вид, показанный на рисунке 3. Определим полную мощность асинхронного двигателя:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{630}{0,88} = 716 \text{ кВА}.$$

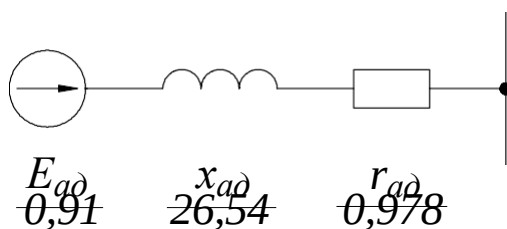


Рисунок 3

Значение реактивного сопротивления в относительных единицах при номинальных условиях определится:

$$x_{* \text{ном}} = \frac{1}{k_n} = \frac{1}{5,3} = 0,19$$

и тогда найдем реактивное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_{a\partial} = x_{* \text{ном}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = 0,19 \cdot \frac{100}{0,716} = 26,54.$$

Активное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при номинальных условиях:

$$r_{*ном} = S_{ном} = \frac{0,7}{100} = 0,007$$

и тогда активное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях:

$$r_{a\partial} = r_{*ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,007 \cdot \frac{100}{0,716} = 0,978.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях определится:

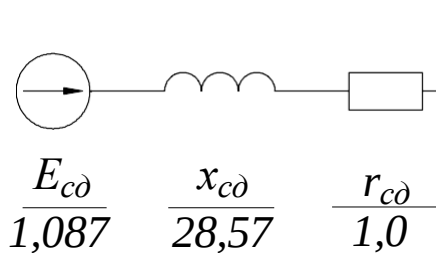
$$E_{a\partial} = 1 - x_{*ном} \cdot \sin \varphi_{ном} = 1 - 0,19 \cdot 0,475 = 0,91.$$

4. Синхронный двигатель

Каталожные данные синхронного двигателя *СТД-630*:

$$P_{ном} = 630 \text{ кВт}; \quad U_{ном} = 6,3 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{ном} = 0,9; \quad n_{ном} = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Схема замещения синхронного двигателя будет иметь вид, показанный на рисунке 4. Определим полную мощность синхронного двигателя:



$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном}} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ кВА}.$$

При отсутствии данных о сверхпереходном реактивном сопротивлении его значение принимается равным:

$$x_{*''ном} = 0,2.$$

Рисунок 4

Тогда реактивное сопротивление синхронного двигателя в относительных

единицах при базисных условиях:

$$x_{с\partial} = x_{*''ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,2 \cdot \frac{100}{0,7} = 28,57.$$

Активное сопротивление синхронного двигателя можно принять равным активному сопротивлению асинхронного двигателя ближайшему по мощности и приблизительно той же скорости. Для синхронного двигателя *СТД-630* таким асинхронным двигателем является *АТД-630 (4А3М-630)* с номинальным скольжением $S_{ном} = 0,007$, тогда

$$r_{с\partial} = S_{ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,007 \cdot \frac{100}{0,7} = 1,0.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. синхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях определится:

$$E_{C\partial} = 1 + x_{*''\text{ном}} \cdot \sin \varphi_{\text{ном}} = 1 + 0,2 \cdot 0,436 = 1,087.$$

5. Система

Схема замещения системы будет иметь вид, показанный на рисунке 5.

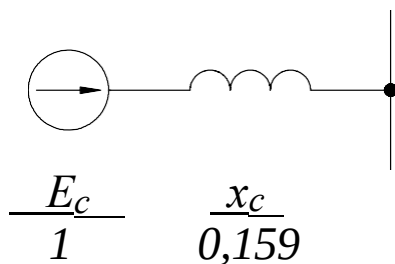


Рисунок 5

Для системы обычно задаются номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ и мощностью короткого замыкания на шинах системы S_{κ} . Тогда реактивное сопротивление системы в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_C = \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\kappa}} = \frac{100}{630} = 0,159.$$

Величина э. д. с. системы в относительных единицах при базисных условиях определится:

лится:

$$E_C = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\bar{6}}} = \frac{115}{115} = 1.$$

при отсутствии данных можно принять $x_C \approx 0$.

6. Обобщенная нагрузка

Схема замещения обобщенной нагрузки приведена на рисунке 6. Установлено, что в начальный момент переходного процесса обобщенную нагрузку можно приближенно характеризовать следующими величинами, выраженными в относительных единицах при номинальных условиях:

Рисунок 6

$$x_{н''\text{агр}} = 0,35,$$

$$E_{н''\text{агр}} = 0,85.$$

Тогда реактивное сопротивление обобщенной нагрузки в относительных единицах при базисных условиях определится:

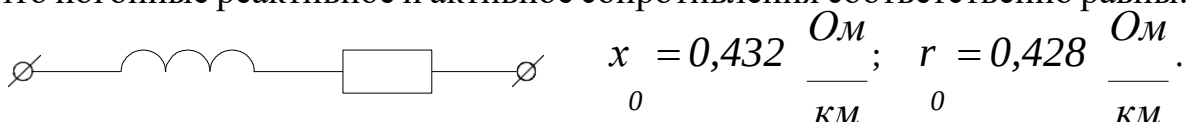
$$x_{\text{нагр}} = x_{н''\text{агр}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}} = 0,35 \cdot \frac{100}{150} = 0,233,$$

а величина э. д. с., так как базисное напряжение равно номинальному, определится:

$$E_{\text{наг}p} = E''_{\text{наг}p} = 0,85.$$

7. Линия электропередачи

Схема замещения линии электропередач приведена на рисунке 7. Из справочников для воздушной ЛЭП, выполненной проводом АС-70, найдем, что погонные реактивное и активное сопротивления соответственно равны:



x_l	r_l
4,232	4,193

Сопротивления ЛЭП в именованных единицах находятся:

$$x = x_0 \cdot /; \quad r = r_0 \cdot /,$$

Рисунок 7

где l — длина линии электропередачи.

Тогда сопротивления ЛЭП в относительных единицах при базисных условиях можно определить:

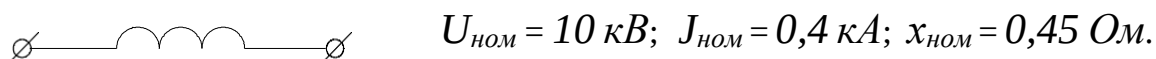
$$x_n = x_0 \cdot \frac{S_{\hat{\sigma}}}{U_{\hat{\sigma}}^2} = 0,432 \cdot 120 \cdot \frac{100}{35^2} = 4,232;$$

$$r_n = r_0 \cdot \frac{S_{\hat{\sigma}}}{U_{\hat{\sigma}}^2} = 0,428 \cdot 120 \cdot \frac{100}{35^2} = 4,193.$$

8. Одинарный реактор

Схема замещения одинарного реактора приведена на рисунке 8.

Из типа реактора *РБ 10-400-0,45* определяем его каталожные данные:



Тогда, так как базисное напряжение равно номинальному, определится сопротивление одинарного реактора в относительных единицах при базисных условиях:

$$\frac{x_p}{0,45}$$

$$x_p = x_{ном} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,45.$$

Рисунок 8

9. Сдвоенный реактор

Каталожные данные сдвоенного реактора *РБСД10-2×1000-0.35*:

$$U_{HOM} = 10 \text{ } \kappa B; \quad J_{HOM} = 960 \text{ } A; \quad x_{\theta} = 0,35 \text{ } OM; \quad k_p = 0,55,$$

где x_δ – номинальное сопротивление ветви реактора;

k_p – коэффициент связи.

Схема замещения сдвоенного реактора приведена на рисунке 9.

Сопротивления ветвей реактора в относительных единицах при базис-

ных условиях находятся по формулам:

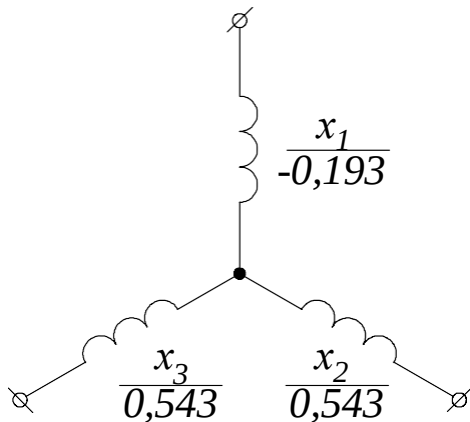


Рисунок 9

$$x_1 = -k_p \cdot x_\delta \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2} =$$

$$= -0,55 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{10^2} = -0,193;$$

$$x_2 = x_3 = (1 + k_p) \cdot x_\delta \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2} =$$

$$= (1 + 0,55) \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,543.$$

10. Двухобмоточный трансформатор

Используя справочники, найдем каталожные данные двухобмоточного трансформатора ТМ-6300/10:

$$S_{ном} = 6300 \text{ кВА}; \quad U_{ном} = 10 \text{ кВ}; \quad P_k = 46,5 \text{ кВт}; \quad u_k = 7,5 \%,$$

где P_k – потери в меди трансформатора;

u_k – напряжение короткого замыкания.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рисунке 10. Сопротивления трансформатора в относительных единицах при но-

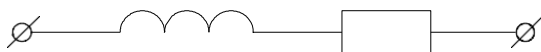


Рисунок 10

минальных условиях определяются по каталожным данным следующим образом:

$$r_{*ном} = \frac{P_k}{S_{ном}} = \frac{46,5}{6300} = 0,0074;$$

$$x_{*ном} = \frac{u_k}{100} = \frac{7,5}{100} = 0,075.$$

Тогда можем получить сопротивления трансформатора в относительных единицах при базисных условиях:

$$r_m = r_{*ном} \cdot \frac{S_\delta}{S_{ном}} = 0,0074 \cdot \frac{100}{6,3} = 0,117;$$

$$x_m = x_{*ном} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = 0,075 \cdot \frac{100}{6,3} = 1,19.$$

11. Трехобмоточный трансформатор

По справочнику найдем каталожные данные трехобмоточного трансформатора *ТДТН-16000/150*:

$$S_{ном} = 16 \text{ МВА}; U_{в ном} = 158 \text{ кВ}; U_{с ном} = 38,5 \text{ кВ}; U_{н ном} = 6,6 \text{ кВ};$$

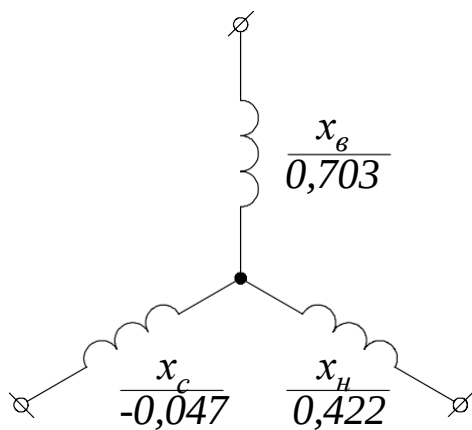
$$u_{к в с} = 10,5 \%; \quad u_{к в н} = 18 \%; \quad u_{к с н} = 6 \%,$$

где $U_{в ном}, U_{с ном}, U_{н ном}$ — соответственно высшее, среднее и низшее номинальные напряжения трансформатора;

$u_{к в с}, u_{к в н}, u_{к с н}$ — напряжение короткого замыкания между обмотками разного напряжения.

Обычно это мощные трансформаторы и активными сопротивлениями в них пренебрегают. Схема замещения трехобмоточного трансформатора приведена на рисунке 11.

Предварительно необходимо сделать пересчет напряжений короткого замыкания для обмоток различного напряжения:



$$u_{к в} = 0,5 \cdot (u_{к в с} + u_{к в н} - u_{к с н}) = 0,5 \cdot (10,5 + 18 - 6) = 11,25 \%;$$

$$u_{к с} = 0,5 \cdot (u_{к в с} + u_{к с н} - u_{к в н}) = 0,5 \cdot (10,5 + 6 - 18) = -0,75 \%;$$

$$u_{к н} = 0,5 \cdot (u_{к в н} + u_{к с н} - u_{к в с}) = 0,5 \cdot (18 + 6 - 10,5) = 6,75 \%.$$

Рисунок 11

Теперь можно определить сопротивления трехобмоточного трансформатора:

$$x_v = \frac{u_{к в}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{11,25}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,703;$$

$$x_c = \frac{u_{к с}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{-0,75}{100} \cdot \frac{100}{16} = -0,047;$$

$$x_n = \frac{u_{кн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,422.$$

12. Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения

Каталожные данные двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения *ТДТН-16000/150*:

$$S_{ном} = 25 \text{ МВА}; \quad U_{ном} = 115 \text{ кВ}; \quad u_{квн} = 10,5 \text{ \%}.$$

Обычно активными сопротивлениями для таких трансформаторов пренебрегают. Схема замещения двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения приведена на рисунке 12. Параметры этой схемы определяют следующим образом:

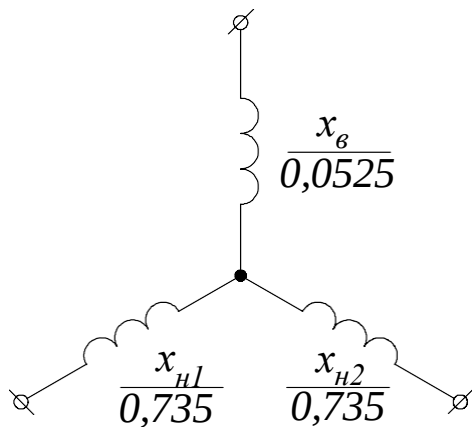


Рисунок 12

$$\begin{aligned} x_{\text{в}} &= 0,125 \cdot \frac{u_{квн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \\ &= 0,125 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,0525; \\ x_{н1} = x_{н2} &= 1,75 \cdot \frac{u_{квн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \\ &= 1,75 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,735. \end{aligned}$$

13. Автотрансформатор

По справочнику найдем каталожные данные автотрансформатора *АТ-ДЦТН-125000/220/110*:

$$S_{ном} = 125 \text{ МВА}; \quad U_{\text{в ном}} = 230 \text{ кВ}; \quad U_{\text{с ном}} = 121 \text{ кВ}; \quad U_{\text{н ном}} = 6,6 \text{ кВ};$$

$$u_{к\text{вс}} = 11 \text{ \%}; \quad u'_{к\text{вн}} = 45 \text{ \%}; \quad u'_{к\text{сн}} = 28 \text{ \%},$$

где $u_{к\text{вс}}$ — напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и среднего напряжения;

$u'_{к\text{вн}}$, $u'_{к\text{сн}}$ — напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и низшего, и среднего и низшего напряжения отнесенные к типовой мощности S_m .

Активным сопротивлением автотрансформаторов пренебрегают. Схема замещения автотрансформатора приведена на рисунке 13.

Предварительно необходимо пересчитать $u'_{к вн}$ и $u'_{к сн}$ к номинальной мощности автотрансформатора.

Для этого сначала определим коэффициент выгоды:

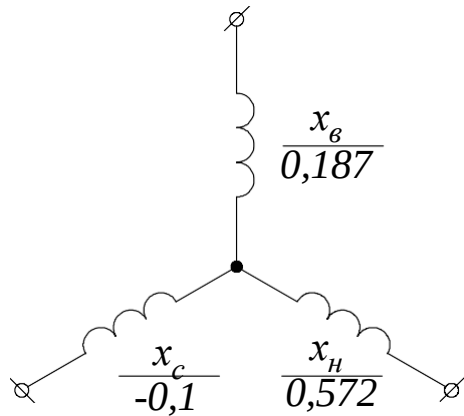


Рисунок 13

$$\alpha = \frac{U_{в ном} - U_{с ном}}{U_{в ном}} = \frac{230 - 121}{230} = 0,474.$$

Теперь найдем типовую мощность автотрансформатора:

$$S_m = \alpha \cdot S_{ном} = 0,474 \cdot 125 = 59,24 \text{ МВА}.$$

Определим напряжения короткого замыкания между обмотками высшего и низшего, и среднего и низшего напряжения отнесенные к номинальной мощности автотрансформатора:

$$u_{к вн} = u'_{к вн} \cdot \frac{S_{ном}}{S_m} = 45 \cdot \frac{125}{59,24} = 94,95 \%;$$

$$u_{к сн} = u'_{к сн} \cdot \frac{S_{ном}}{S_m} = 28 \cdot \frac{125}{59,24} = 59,08 \%.$$

Пересчитаем напряжения короткого замыкания для обмоток различного напряжения:

$$u_{к в} = 0,5 \cdot (u_{к вс} + u_{к вн} - u_{к сн}) = 0,5 \cdot (11 + 94,95 - 59,08) = 23,43 \%;$$

$$u_{к с} = 0,5 \cdot (u_{к вс} + u_{к сн} - u_{к вн}) = 0,5 \cdot (11 + 59,08 - 94,95) = -12,44 \%;$$

$$u_{к н} = 0,5 \cdot (u_{к вн} + u_{к сн} - u_{к вс}) = 0,5 \cdot (94,95 + 59,08 - 11) = 71,52 \%.$$

Теперь определим сопротивления трехобмоточного трансформатора:

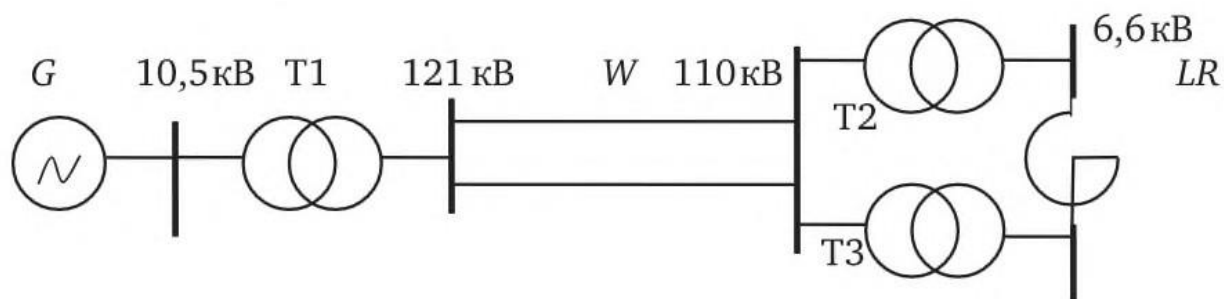
$$x_{\text{в}} = \frac{u_{к в}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{23,43}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,187;$$

$$x_{\text{с}} = \frac{u_{к с}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{-12,44}{100} \cdot \frac{100}{125} = -0,1;$$

$$x_{\text{н}} = \frac{u_{к н}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{71,52}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,572.$$

Задание для самостоятельного решения

Для системы составить схему замещения, выразив ее элементы в относительных единицах, приняв $S_{\text{б}} = 100$ МВА, $U_{\text{б}} = 6,3$ кВ на стороне низшего напряжения трансформаторов Т2 и Т3, имеющих одинаковые параметры. Решение провести: а) с учетом заданных номинальных напряжений элементов; б) приближенно, принимая для каждой ступени среднее номинальное напряжение. Дано: $U_{LRh} = 6$ кВ; I_{LRh} , кА; x_{LR} , %; S_G , МВА; S_{T1} , МВА; $S_{T2} = S_{T3}$, МВА; l_w , 100 км; x_G ; $u_{\text{кт}1} = 10,5\%$; $u_{\text{кт}2} = u_{\text{кт}3} = 10,5\%$; $x_0 = 0,4$ Ом/км; $E = 1,15$.



Вариант	I_{LRh}	x_{LR}	S_G	S_{T1}	S_{T2}	l_w	x_G
1	1,5	10	80	20	10	87	0,28
2	2	6	90	30	14	67	0,23
3	1,7	10	90	20	13	70	0,29
4	1,5	5	80	30	18	62	0,22
5	1,8	5	70	40	10	72	0,28
6	1,8	8	50	40	14	75	0,27
7	1,5	6	50	30	20	94	0,25
8	1,4	6	60	30	11	83	0,31
9	1,9	8	70	30	15	66	0,24
10	1,3	6	50	40	19	71	0,22
11	1,2	8	50	40	11	50	0,28
12	1,2	5	80	20	15	89	0,22
13	1,8	9	50	20	14	58	0,29
14	2	9	80	20	11	79	0,25
15	1,7	6	90	20	15	77	0,22
16	1,2	8	90	20	13	58	0,26
17	1,6	10	90	40	10	82	0,31
18	1,6	7	80	30	10	50	0,26
19	1,6	9	90	30	13	78	0,31
20	2	10	60	30	16	59	0,26

Вариант	I_{LRh}	x_{LR}	S_G	S_{T1}	S_{T2}	l_w	x_G
21	1,1	8	50	30	14	52	0,3
22	1,9	10	80	40	19	100	0,31
23	1	8	60	30	17	52	0,32
24	1	10	50	20	10	54	0,25
25	1,6	10	60	20	19	51	0,25
26	1,2	9	90	20	18	57	0,32
27	1	9	70	30	11	99	0,25
28	1,2	5	60	40	17	100	0,28
29	1,4	7	80	20	19	78	0,31
30	1,1	6	70	30	16	76	0,21
31	1,1	6	80	30	17	95	0,23
32	1,7	7	80	40	18	98	0,3
33	1,1	8	90	40	17	58	0,27
34	1,5	9	60	30	16	53	0,21
35	1,4	8	70	20	13	51	0,28
36	1,4	9	80	30	12	99	0,25
37	1,5	5	60	40	16	70	0,25
38	2	9	90	20	12	73	0,21
39	1,1	10	70	40	10	50	0,29
40	2	7	80	30	12	56	0,28
41	1,1	8	50	20	16	78	0,27
42	1,3	6	70	30	14	87	0,32
43	1,4	6	90	30	18	86	0,24
44	1,8	10	80	40	13	97	0,31
45	1,7	9	90	20	13	79	0,28
46	1	5	80	40	18	71	0,31
47	1,9	6	70	20	14	58	0,26
48	1,9	7	70	30	12	96	0,31
49	2	8	80	40	17	69	0,23
50	1,1	8	70	20	17	86	0,26

Определение ударного тока короткого замыкания

Ударным током короткого замыкания называют максимальное мгновенное значение полного тока при наиболее неблагоприятных условиях.

Для электрических схем с преобладанием индуктивности таковые имеют место, если доаварийным режимом был холостой ход, а короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения через нуль (рис. 1).

При этом периодическая составляющая тока КЗ начинается с амплитудного значения. Согласно законам коммутации в первый момент КЗ начальное значение апериодической составляющей оказывается максимально возможным и равным амплитуде периодической составляющей тока КЗ

$$I_a(0) = I_{nm}$$

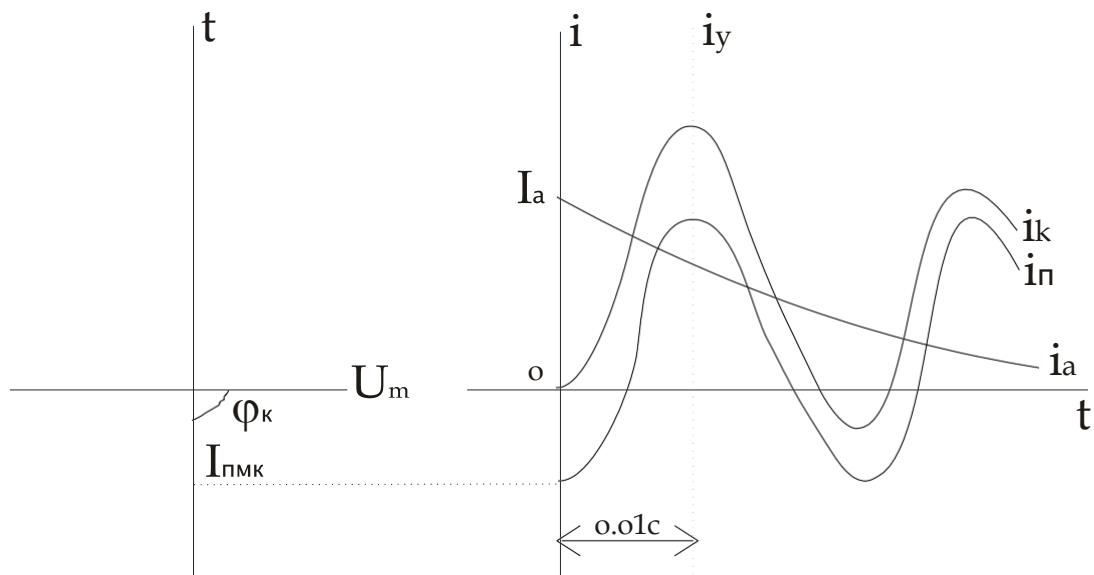


Рис. 1. Ударный ток КЗ

Наибольшее мгновенное значение полного тока короткого замыкания – ударный ток возникает при первом наибольшем значении апериодической составляющей, совпадающей по знаку с периодической составляющей тока короткого замыкания. Этот момент наступает примерно через полпериода после появления короткого замыкания. При этом условии ударный ток

$$I_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-0,01/Ta} = I_{nm} (1 + e^{-0,01/Ta}) = I_{nm} k_y.$$

Величину $k_y = 1 + e^{-0,01/Ta}$ называют ударным коэффициентом, характеризующим превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ

$$k_y = 1 + e^{-0,01/Ta} = i_y / I_{nm}.$$

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени затухания апериодической составляющей $T_a = x_k / (314r_k)$. При $x_k/r_k \rightarrow 0$ $k_y \rightarrow 1$, а при $x_k/r_k \rightarrow \infty$ $k_y \rightarrow 2$, т.е. значения ударного коэффициента изменяются в пределах

$$1 < k_y < 2.$$

Зависимость ударного коэффициента от отношения x_k/r_k (постоянной времени T_a) изображена на рис. 2. За интервал $3T_a$ апериодическая составляющая тока КЗ практически затухает.

В практических расчетах ударный ток определяют по формуле

$$i_y = k_y \sqrt{2I'}$$

где I' - сверхпереходный ток КЗ (действующее значение периодической

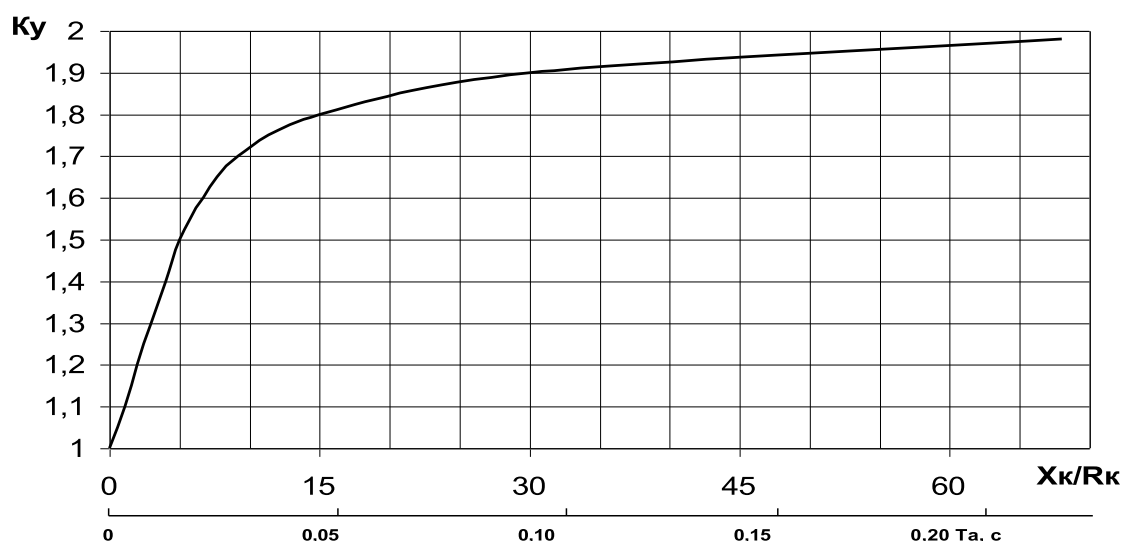


Рис. 2. Зависимость ударного коэффициента от отношения x_k/r_k и постоянной времени короткозамкнутой цепи

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени t переходного процесса можно определить как среднеквадратичное значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент, т.к. в течение всего переходного процесса полный ток представляет собой несинусоидальную кривую. При этом считают, что за рассматриваемый период амплитуда периодической составляющей и апериодическая составляющие неизменны и равны их среднему значению в рассматриваемый момент времени.

$$I^t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t+\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt}$$

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y приходится на первый период переходного процесса. Оно определяется в предположении,

что апериодическая составляющая в течение этого периода равна ее мгновенному значению в середине периода, т.е. через 0,01 с после возникновения короткого замыкания, а периодическая составляющая - своему начальному значению.

$$I_y = \sqrt{i_{n0}^2 + (i_{a0} e^{-\frac{0.01}{T_a}})^2}.$$

Считая, что $i_{a0} = I_{n \max} = \sqrt{2}I'$, получаем

$$I_y = \sqrt{(I')^2 + (\sqrt{2}I' e^{-\frac{0.01}{T_a}})^2}.$$

Так как $e^{-\frac{0.01}{T_a}} = k_y - 1$, действующее значение полного тока КЗ

$$I_y = I' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

При изменении ударного коэффициента в пределах $1 < k_y < 2$ отношение I_y/I' остается в пределах

$$1 \leq \frac{I_y}{I'} < \sqrt{3}$$

и имеет максимальное значение $\sqrt{3}$ при $k_y = 1,5$.

Задание для самостоятельного решения:

Относительно узла M сети 220 кВ эквивалентное сопротивление системы составляет X_c , Ом. За ней напряжение 220 кВ неизменно. При трехфазном коротком замыкании в узле M величина ударного коэффициента $k_y = 1,8$. К узлу M присоединен понижающий трансформатор мощностью S_T , МВА, напряжениями $U_B/U_H = 220/11$ кВ, $u_k\%$, %, P_k , кВт. При трехфазном коротком замыкании за этим трансформатором требуется определить наибольшее действующее значение тока через $t = 0,04$ с и время, при котором участие апериодической слагающей в действующем значении полного тока сказывается менее 5%.

Вариант	X_c	S_T	$u_k\%$	P_k
1	7,5	55	8,5	450
2	7,55	60	9	470
3	7,6	65	9,5	490
4	7,65	70	10	510
5	7,7	75	10,5	530
6	7,75	80	11	550
7	7,8	85	11,5	570
8	7,85	90	12	590
9	7,9	95	8,5	610
10	7,95	100	9	630
11	8	105	9,5	650
12	8,05	110	10	670

13	8,1	115	10,5	690
14	8,15	120	11	710
15	8,2	125	11,5	730
16	8,25	130	12	750
17	8,3	135	8,5	450
18	8,35	140	9	470
19	8,4	145	9,5	490
20	8,45	150	10	510
21	8,5	55	10,5	530
22	8,55	60	11	550
23	8,6	65	11,5	570
24	8,65	70	12	590
25	8,7	75	8,5	610
26	8,75	80	9	630
27	8,8	85	9,5	650
28	8,85	90	10	670
29	8,9	95	10,5	690
30	8,95	100	11	710
31	9	105	11,5	730
32	9,05	110	12	750
33	9,1	115	8,5	450
34	9,15	120	9	470
35	9,2	125	9,5	490
36	9,25	130	10	510
37	9,3	135	10,5	530
38	9,35	140	11	550
39	9,4	145	11,5	570
40	9,45	150	12	590
41	9,5	55	8,5	610
42	9,55	60	9	630
43	9,6	65	9,5	650
44	9,65	70	10	670
45	9,7	75	10,5	690
46	9,75	80	11	710
47	9,8	85	11,5	730
48	9,85	90	12	750
49	9,9	95	8,5	450
50	9,95	100	9	470

Расчет тока трехфазного короткого замыкания для произвольного момента времени переходного процесса

Для определения тока в месте замыкания широко применяется метод расчетных кривых. Метод основан на применении специальных кривых $\gamma_t = f(t, I_{no}^*(ном))$.

Порядок расчета:

1. Составляют эквивалентную схему для определения начального тока к. з. I_{no} и определяют значения сверхпереходных эдс E'' генераторов и нагрузок и сопротивления элементов схемы, например в относительных базисных единицах.

2. Преобразуют схему замещения к радиальному виду, выделив отдельные генерирующие ветви (рис. 1).

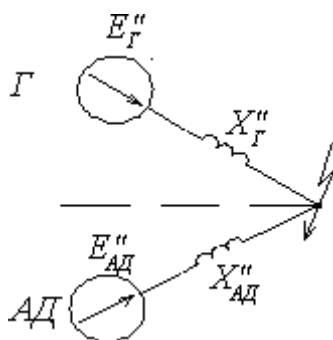


Рис. 1

3. Аналитически определяют начальные значения токов генерирующих ветвей

$$I_{no}^*(\delta) = \frac{E'_*(\delta)}{X'_{*}(\delta)},$$

и относительное значение тока

$$I_{no}^*(ном) = \frac{I_{no}^*(\delta) \cdot I_{\delta}}{I_{ном}},$$

где I_{δ} – базисный ток на той ступени напряжения, где находится точка к. з.;

$I_{ном}$ – номинальный ток генерирующей ветви, приведенный к напряжению ступени, где находится точка к. з.;

$$I_{ном} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.к} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad \text{— для асинхронных двигателей.}$$

$$I_{ном} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.к}} \quad \text{— для синхронных генераторов, двигателей и компенсаторов}$$

$U_{ср.к.}$ – среднее номинальное напряжение ступени где находится точка к. з.

4. По расчетным кривым $\gamma_t = f(t, I_{no} * (ном))$ для заданных t и $I_{no}*(ном)$ находят отношение токов: $\gamma_t = I_{nt} / I_{no}$.

5. Определяют действующее значение периодической составляющей тока к. з. в момент времени t в именованных единицах:

$$I_{nt} = \gamma_t \cdot I_{no}*(ном) \cdot \dot{I}_{ном}.$$

Пример. Для заданной расчетной схемы (рис. 10) определить ток трехфазного к. з. в следующие моменты времени переходного процесса: $t = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ с. Генераторы имеют тиристорную систему самовозбуждения.

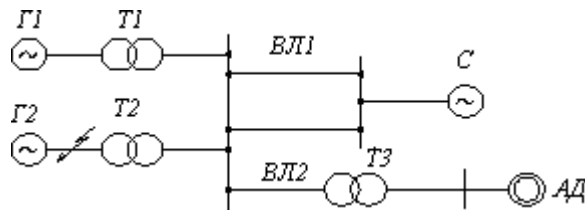


Рис. 10

Исходные данные:

Г1, Г2: $S_n = 36 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_n = 10,5 \text{ кВ}$; $x''_{d*} = 0,15$; $\cos \varphi_{(o)} = 0,9$; $I_{(o)} = 1,0$

Т1, Т2: $S_n = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $10,5/121 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5 \%$;

ВЛ1: $\ell = 50 \text{ км}$; $x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}$;

ВЛ2: $\ell = 25 \text{ км}$; $x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}$;

Т3: $S_n = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $110/6,3 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5 \%$;

С: $x_c = 10 \text{ Ом}$;

АД: $P_n = 4,5 \text{ МВт}$; $U_n = 6 \text{ кВ}$; $\cos \varphi = 0,86$; $\eta = 0,9$; $K_n = 5$; $I_{(o)} = 0,9$.

Намечаем ступени напряжения и устанавливаем на них базисные единицы:

$$S_0 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{0I} = 10,5 \text{ кВ}; \quad I_{0I} = 5,5 \text{ кА};$$

$$U_{0II} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{0III} = 6,3 \text{ кВ}.$$

Составим схему замещения для определения тока I_{no} (рис. 11):

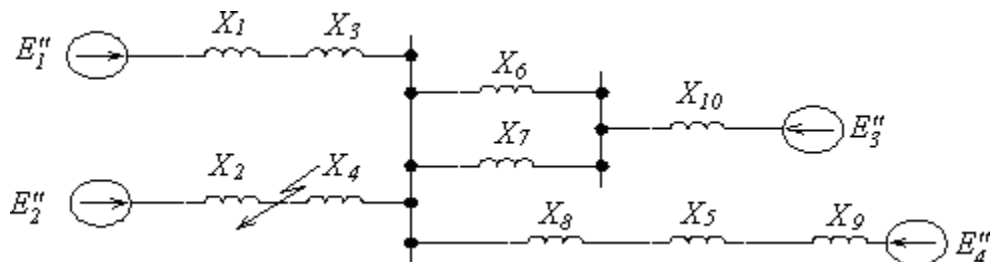


Рис. 11

Определяем сопротивления элементов схемы в относительных базисных единицах. Приведение приближенное. Знак $*$ (б) в расчетах опускаем.

$$\Gamma 1; \Gamma 2: x_1 = x_2 = x'_d * \frac{S_{\delta}}{100} = 0,15 \frac{100}{36} = 0,42;$$

$$T1; T2: x_3 = x_4 = \frac{u_k \% S_{\delta}}{100} = \frac{10,5 \cdot 100}{100} = 0,26;$$

$$T3: x_5 = \frac{u_k \% S_{\delta}}{100} = \frac{10,5 \cdot 100}{100} = 1,06;$$

$$ВЛ1: x_6 = x_7 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15;$$

$$ВЛ2: x_8 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 25 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075;$$

$$АД: x_9 = \frac{1}{K_n} \frac{S_{\delta} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_n} = \frac{1}{5} \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 0,86}{4,5} = 3,44;$$

$$С: x_{10} = x_c \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = 10 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075.$$

Сверхпереходные эдс:

$$\Gamma 1, \Gamma 2: E_1' = E_2' = U_{(o)} * + I_{(o)} * \cdot x'_d * \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 + 1 \cdot 0,15 \cdot 0,44 = 1,07;$$

$$С: E_3'' = 1,0;$$

$$АД: E_4' = U_{(o)} * - I_{(o)} * \cdot \frac{1}{K_n} \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 - 0,9 \cdot \frac{1}{5} \cdot 0,51 = 0,91.$$

Преобразуем схему, выделив в качестве генерирующих ветвей (рис. 12):

I – система С (источник неограниченной мощности, ток определяется аналитически);

II – асинхронный двигатель АД (используются специальные кривые для АД [2]);

III – генератор Г1 – имеет разную удаленность от точки к. з.

IV – генератор Г2 – имеет разную удаленность от точки к. з.

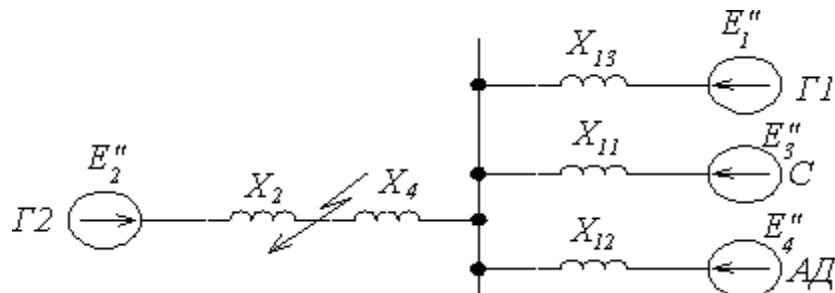


Рис. 12

$$x_{11} = \frac{x_6}{2} = x_{10} = \frac{0,15}{2} + 0,075 = 0,15;$$

$$x_{12} = x_5 + x_8 + x_9 = 1,05 + 0,075 + 3,44 = 4,656;$$

$$x_{13} = x_1 + x_3 = 0,42 + 0,26 = 0,68.$$

Преобразуем схему, приведя ее к радиальному виду (рис. 13):

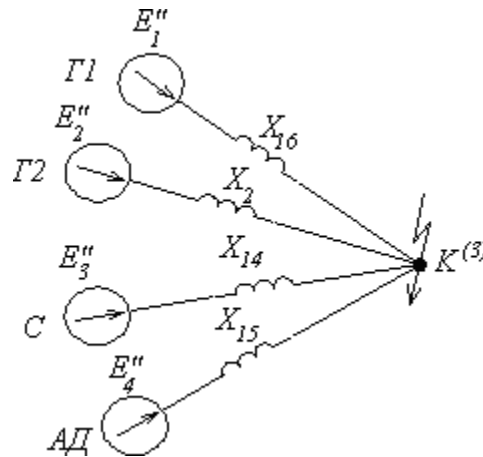


Рис. 13

$$x_{14} = \frac{x_{\Sigma}}{C_I} = \frac{0,38}{0,8} = 0,475; x_{15} = \frac{x_{\Sigma}}{C_{II}} = \frac{0,38}{0,026} = 14,6; x_{16} = \frac{x_{\Sigma}}{C_{III}} = \frac{0,38}{0,174} = 2,18;$$

$$x_{\text{экв}} = x_{11} // x_{12} // x_{13} = \frac{x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}}{x_{11} \cdot x_{12} + x_{11} \cdot x_{13} + x_{12} \cdot x_{13}} =$$

$$= \frac{0,15 \cdot 4,565 \cdot 0,68}{0,15 \cdot 4,565 + 0,15 \cdot 0,68 + 0,68 \cdot 4,565} = 0,12;$$

$$C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{11}} = \frac{0,12}{0,15} = 0,8; C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{12}} = \frac{0,12}{4,565} = 0,026; C_{III} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{13}} = \frac{0,12}{0,68} = 0,174;$$

$$x_{\Sigma} = x_{\text{экв}} + x_4 = 0,12 + 0,26 = 0,38.$$

Определяем начальные значения токов генерирующих ветвей.

I-я ветвь – Система:

$$I'_{14^{*(6)}} = \frac{E_3'}{x_{14^{*(6)}}} = \frac{1,0}{0,475} = 2,1.$$

II-я ветвь – АД:

$$I'_{15^{*(6)}} = \frac{E_4'}{x_{15^{*(6)}}} = \frac{0,91}{14,6} = 0,062.$$

III-я ветвь – Γ1:

$$I'_{16*(\delta)} = \frac{E_1'}{x_{16*(\delta)}} = \frac{1,07}{2,18} = 0,49.$$

IV-я ветвь – Г2:

$$I'_{2*(\delta)} = \frac{E_2'}{x_{2*(\delta)}} = \frac{1,07}{0,42} = 2,55.$$

Ток к. з. от системы неизменен по величине во время переходного процесса и в именованных единицах определяется по выражению

$$I'_{14} = I_{14\infty} = I'_{14*(\delta)} \cdot I_{\delta I} = 2,1 \cdot 5,5 = 11,55 \text{ кА.}$$

От остальных генерирующих ветвей ток в заданные моменты времени определяют по расчетным кривым. Для этого находят относительные значения токов $I_{no*(ном)}$:

$$I_{no*(ном)15} = \frac{I'_{15*(\delta)} \cdot I_{\delta I}}{I_{номАД}} = \frac{0,062 \cdot 5,5}{0,32} = 1,07,$$

где

$$I_{номАД} = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_{ср.к} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{4,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,9 \cdot 0,86} = 0,32 \text{ кА.}$$

$$I_{no*(ном)16} = \frac{I'_{16*(\delta)} \cdot I_{\delta I}}{I_{номГ1}} = \frac{0,49 \cdot 5,5}{1,98} = 1,36,$$

где

$$I_{номГ1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{ср.к}} = \frac{36}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1,98 \text{ кА} = I_{номГ2};$$

$$I_{no*(ном)2} = \frac{I'_{2*(\delta)} \cdot I_{\delta I}}{I_{номГ2}} = \frac{2,55 \cdot 5,5}{1,98} = 7,1.$$

Так как для генерирующих ветвей II(АД) и III(Г1) значения относительного тока $I_{no*(ном)} < 2$, то периодическая составляющая тока к. з. от указанных ветвей принимается неизменной во времени. Следовательно,

$$I'_{15} = I_{15\infty} = I'_{15*(\delta)} \cdot I_{\delta I} = 0,062 \cdot 5,5 = 0,34 \text{ кА};$$

$$I'_{16} = I_{16\infty} = I'_{16*(\delta)} \cdot I_{\delta I} = 0,49 \cdot 5,5 = 2,7 \text{ кА.}$$

Значения периодической составляющей тока к. з. для генерирующей ветви IV(Г2) для заданных моментов времени определены по расчетным кривым и представлены в таблице 1.

Значения полного тока к. з. от всех генерирующих ветвей для заданных моментов времени приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 1

$t, \text{ с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	∞
γ_t	1	0,72	0,66	0,62	0,58	0,56	0,25
$I_{nt} = \gamma_t \cdot I_{no*(ном)} \cdot I_{ном}$	14	10,1	9,2	8,7	8,1	7,8	3,53

Т а б л и ц а 2

$t, \text{ с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	∞
$I_k^{(3)}, \text{ кА}$	28,59	24,69	23,79	23,29	22,69	22,39	18,12

Задание для самостоятельного решения:

От двух однотипных генераторов с параметрами S_G , МВА; $U_G = 13,8$ кВ; $\cos\varphi$; $x_d = 0,132$, работающих на блочный трансформатор с расщепленными обмотками (S_{T1} , МВА; $U_B/U_H = 230/13,8$ кВ; $u_k = 11\%$), по линии электропередачи ($U_{ВЛ} = 230$ кВ; $l_{ВЛ}$, км; $x_{0ВЛ} = 0,4$ Ом/км через двухобмоточный трансформатор (S_{T2} , МВА; $U_B/U_H = 230/6,3$ кВ; $u_k = 10\%$) передается электрическая энергия в узел нагрузки.

К шинам узла нагрузки посредством кабельных линий с характеристиками $l_{КЛ1}$, км; $x_{0КЛ1} = 0,072$ Ом/км; $r_{0КЛ1} = 0,27$ Ом/км подключено четыре асинхронных электродвигателя ($P_{ад} = 1,8$ МВт; $\cos\varphi = 0,83$; $I^*_{пуск} = 5$) и посредством кабельной линий с характеристиками $l_{КЛ2} = 2,2$ км; $x_{0КЛ2} = 0,069$ Ом/км; $r_{0КЛ2} = 0,23$ Ом/км подключено – два синхронных электродвигателя ($P_{сд} = 4,5$ МВт; $\cos\varphi = 0,9$; $x_d = 0,2$).

На шинах узла нагрузки произошло трехфазное короткое замыкание. С помощью типовых кривых требуется определить суммарное значение периодической составляющей тока короткого замыкания от генераторов электростанции и двигателей для момента времени $t = 0,2$ с.

Вар	S_G	$\cos\varphi$	x_d	S_{T1}	$l_{ВЛ}$	S_{T2}	$l_{КЛ1}$
1	101	0,82	1,5	200	151	250	7,52
2	102	0,8	1,06	220	168	270	7,54
3	103	0,79	1,42	250	164	300	7,56
4	104	0,84	1,52	275	178	325	7,58
5	105	0,83	1,21	300	173	350	7,6
6	106	0,84	1,03	200	158	250	7,62
7	107	0,81	1,09	220	154	270	7,64
8	108	0,81	1,4	250	156	300	7,66
9	109	0,79	1,02	275	148	325	7,68
10	110	0,78	1,54	300	134	350	7,7
11	111	0,75	1,39	200	164	250	7,72
12	112	0,85	1,48	220	162	270	7,74
13	113	0,81	1,34	250	152	300	7,76
14	114	0,84	1,31	275	136	325	7,78
15	115	0,78	1,2	300	147	350	7,8
16	116	0,85	1,08	200	176	250	7,82
17	117	0,79	1,13	220	157	270	7,84
18	118	0,82	1,3	250	135	300	7,86
19	119	0,75	1,45	275	135	325	7,88
20	120	0,82	1,4	300	154	350	7,9
21	121	0,77	1,15	200	132	250	7,92
22	122	0,85	1,29	220	165	270	7,94
23	123	0,82	1,34	250	177	300	7,96
24	124	0,79	1,27	275	146	325	7,98

Вар	S_G	$\cos\varphi$	χ_d	S_{T1}	$l_{ВЛ}$	S_{T2}	$l_{КЛП}$
25	125	0,85	1,39	300	136	350	8
26	126	0,78	1,49	200	177	250	8,02
27	127	0,82	1,15	220	157	270	8,04
28	128	0,82	1,18	250	179	300	8,06
29	129	0,78	1,48	275	145	325	8,08
30	130	0,82	1,09	300	150	350	8,1
31	131	0,75	1,06	200	146	250	8,12
32	132	0,84	1,42	220	164	270	8,14
33	133	0,82	1,36	250	136	300	8,16
34	134	0,85	1,09	275	168	325	8,18
35	135	0,78	1,45	300	172	350	8,2
36	136	0,81	1,28	200	165	250	8,22
37	137	0,81	1,19	220	167	270	8,24
38	138	0,78	1,06	250	174	300	8,26
39	139	0,82	1,14	275	171	325	8,28
40	140	0,78	1,36	300	131	350	8,3
41	141	0,79	1,43	200	141	250	8,32
42	142	0,83	1,23	220	156	270	8,34
43	143	0,85	1,23	250	163	300	8,36
44	144	0,76	1,01	275	148	325	8,38
45	145	0,75	1,17	300	153	350	8,4
46	146	0,81	1,37	200	151	250	8,42
47	147	0,83	1,15	220	148	270	8,44
48	148	0,81	1,16	250	169	300	8,46
49	149	0,82	1,48	275	167	325	8,48
50	150	0,85	1,08	300	149	350	8,5

Расчет параметров установившегося режима

Рассмотрим схему, представленную на рисунке 1. Предварительный режим ее характеризовался следующими относительными значениями параметров, отнесенных к номинальным условиям: $x_d = 1,54$; $U_G = U_{ном}$; $I_G = 0,75I_{ном}$; $\cos\varphi = 0,8$; $x_k = 0,58$.

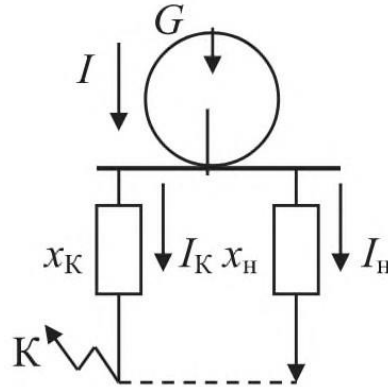


Рисунок 1

Требуется определить ток генератора и ток в точке короткого замыкания и оценить влияние нагрузки.

Решение.

Определим ток возбуждения или ЭДС генератора:

$$I_f = E_G = \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 0,75 \cdot 1,54)^2} = 1,94.$$

Относительное сопротивление нагрузки, приведенное к номинальным условиям генератора:

$$x_{*H} = x_{*H} \frac{I_G}{I_{ном}} = 1,2 \frac{1}{0,75} = 1,6.$$

Результирующая ЭДС схемы:

$$E_x = E_a = 1,94 = 0,99,$$

$$E_\Sigma = E_q \frac{x_H}{x_d + x_H} = 1,94 \frac{1,6}{1,54 + 1,6} = 0,99,$$

т.е. всего на 1% меньше предшествовавшего значения номинального напряжения.

Результирующее сопротивление до точки короткого замыкания:

$$x_\Sigma = (1,54 / 1,6) + 0,58 = 1,37.$$

Искомый ток в точке короткого замыкания:

$$I_K = \frac{E_\Sigma}{x_\Sigma} = \frac{0,99}{1,37} = 0,72.$$

Напряжение на зажимах генератора:

$$U = I_K x_K = 0,72 \cdot 0,58 = 0,42.$$

Ток генератора при коротком замыкании в точке К:

$$I_G = \frac{1,94 - 0,42}{1,54} = 0,98.$$

Если нагрузку исключить, но сохранить предшествующую ЭДС, то получим

$$I_K = \frac{E_q}{x_d + x_K} = \frac{1,94}{1,54 + 0,58} = 0,91.$$

Напряжение на зажимах генератора без учета нагрузки:

$$U = I_K x_K = 0,91 \cdot 0,58 = 0,52,$$

т.е. ток в точке короткого замыкания будет примерно на 20% больше, а в генераторе – на 7% меньше, напряжение на зажимах генератора увеличится почти на 24%.

Если бы генератор работал на холостом ходу, то были бы следующие результаты:

$$I_K = \frac{U}{x_d + x_K} = \frac{1,0}{1,54 + 0,58} = 0,47; \quad U = 0,47 \cdot 0,58 = 0,27.$$

Задание для самостоятельного решения:

Для установившегося режима при коротком замыкании в точке К схемы на рис. 2 определить: а) величину тока в генераторе при коротком замыкании в точке К; б) остаточное напряжение на шинах и ток в точке К; в) сопротивление реактора, исходя из условия, что при коротком замыкании остаточное напряжение на шинах генератора в установившемся режиме было не менее $0,8U_G$.

Дано: $U_{LR} = 6$ кВ; I_{LR} , кА; x_{LR} , %; S_G , МВА; $U_G = 6,3$ кВ; x_d ; $I_{фп} = 3$; S_H , МВА.

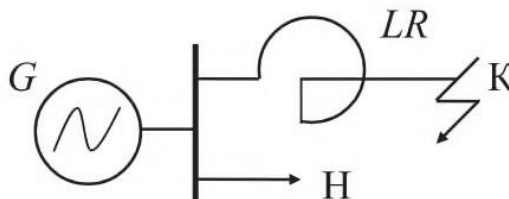


Рисунок 2

Вариант	I_{LR}	x_{LR}	S_G	x_d	S_H
1	0,2	5	20	2	10
2	0,21	6	21	1,99	11
3	0,22	7	22	1,98	12
4	0,23	8	23	1,97	13
5	0,24	9	24	1,96	14
6	0,25	10	25	1,95	15
7	0,26	5	26	1,94	16
8	0,27	6	27	1,93	17
9	0,28	7	28	1,92	18
10	0,29	8	29	1,91	19
11	0,3	9	30	1,9	20
12	0,31	10	31	1,89	21
13	0,32	5	32	1,88	22
14	0,33	6	33	1,87	23
15	0,34	7	34	1,86	24
16	0,35	8	35	1,85	25
17	0,2	9	36	1,84	26
18	0,21	10	37	1,83	27
19	0,22	5	38	1,82	28
20	0,23	6	39	1,81	29
21	0,24	7	40	1,8	30
22	0,25	8	41	1,79	31
23	0,26	9	42	1,78	32
24	0,27	10	43	1,77	33
25	0,28	5	44	1,76	34
26	0,29	6	45	1,75	35

Вариант	I_{LR}	x_{LR}	S_G	x_d	S_H
27	0,3	7	46	1,74	36
28	0,31	8	47	1,73	37
29	0,32	9	48	1,72	38
30	0,33	10	49	1,71	39
31	0,34	5	50	1,7	40
32	0,35	6	51	1,69	41
33	0,2	7	52	1,68	42
34	0,21	8	53	1,67	43
35	0,22	9	54	1,66	44
36	0,23	10	55	1,65	45
37	0,24	5	56	1,64	46
38	0,25	6	57	1,63	47
39	0,26	7	58	1,62	48
40	0,27	8	59	1,61	49
41	0,28	9	60	1,6	50
42	0,29	10	61	1,59	51
43	0,3	5	62	1,58	52
44	0,31	6	63	1,57	53
45	0,32	7	64	1,56	54
46	0,33	8	65	1,55	55
47	0,34	9	66	1,54	56
48	0,35	10	67	1,53	57
49	0,2	5	68	1,52	58
50	0,21	6	69	1,51	59

Расчет двухфазного короткого замыкания

Исследования и расчеты при несимметричных к. з. проводят с помощью метода симметричных составляющих. Расчет состоит в том, что заданный несимметричный режим работы системы представлен как результат наложения трех симметричных режимов, один из которых содержит только составляющие прямой последовательности (эдс, токи, сопротивления), другой – только составляющие обратной последовательности и третий – только составляющие нулевой последовательности.

При расчетах токов несимметричных к. з. применяют правило эквивалентности прямой последовательности, согласно которому ток прямой последовательности любого несимметричного к. з. может быть определен как ток при трехфазном к. з. в точке, удаленной от действительной точки к. з. на дополнительное сопротивление, величина которого в зависимости от вида к. з. определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, т. е.:

$$I_{\kappa 1}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \Delta Z^{(n)}},$$

где $E_{1\Sigma}$, $Z_{1\Sigma}$ – результирующие эдс и сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки к. з.; $\Delta Z^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности.

Полный ток в месте короткого замыкания находят так:

$$I_{\kappa}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{\kappa 1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида к. з.

Из правила эквивалентности следует, что при любом виде к. з. ток $I_{\kappa 1}^{(n)}$ определяется из подобных по структуре схем замещения, рис. 1.

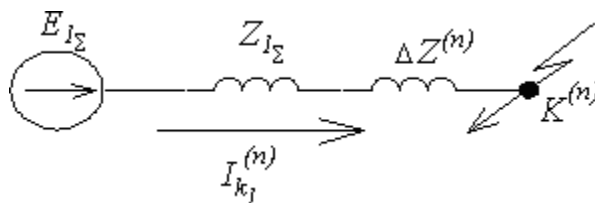


Рис. 1

Установлено, что симметричные составляющие токов и напряжений в месте к. з., а также полные токи и напряжения в здоровых и поврежденных фазах для любого момента времени пропорциональны току прямой последовательности. Основные расчетные соотношения приведены в таблице 6.

Таким образом, для определения токов при несимметричном к. з. необходимо:

составить схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Определить сопротивления элементов и результирующие

сопротивления прямой ($x_{1\Sigma}$), обратной ($x_{2\Sigma}$) и нулевой ($x_{0\Sigma}$) последовательностей;

составить комплексные схемы замещения, в которых $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{3\Sigma}$ соединены между собой определенным образом в зависимости от вида к. з.;

определить ток прямой последовательности в комплексной схеме замещения. Последний является током трехфазного к. з. при эквивалентном трехфазном к. з.;

найти полный ток несимметричного к. з. по выражению (39).

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей находят по соответствующим схемам

Схема прямой последовательности (ПП) – обычная схема, которую составляют для расчета симметричного трехфазного к. з. В зависимости от момента времени переходного процесса генераторы, синхронные компенсаторы и нагрузки в схему замещения вводят соответствующими реактивностями и эдс. По схеме определяют $E_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ генерирующих ветвей, а также коэффициенты распределения для них.

Схема обратной последовательности (ОП) отличается от схемы ПП отсутствием в ней эдс и значением реактивных сопротивлений генераторов и нагрузок. За начало схемы прямой (обратной) последовательности ($H1$, $H2$) принимают точку, в которую объединены свободные концы генерирующих ветвей (точка нулевого потенциала). Концом схемы считают точку, где возникло к. з. (K_1 , K_2).

Для элементов системы с неподвижными магнитосвязанными цепями индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательности равны между собой. Таким образом, для трансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов $x_1 = x_2$. Для вращающихся машин $x_1 \neq x_2$. В практических расчетах принимают:

для синхронных машин без демпферных обмоток $x_2 = 1,45 \cdot x'_d$;

для турбогенераторов и синхронных машин с демпферными обмотками

$$x_2 = 1,22 \cdot x'_d;$$

для асинхронных двигателей $x_2 = x'_d \cdot e^* = \frac{1}{K_n} = \frac{1}{I_{пуск}^*}$;

для комплексной (обобщенной) нагрузки $x_{2*} = 0,35$.

Т а б л и ц а 1

Вид к.з.	$K^{(3)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
Граничные условия	$U_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $I_{KB} = -I_{KC}$ $U_{KB} = U_{KC}$	$U_{KA} = 0$ $I_{KB} = 0$ $I_{KC} = 0$
Соотношение между симметричными составляющими	$I_{KA} = I_{KA1}$ $I_{K2} = 0$ $I_{Ko} = 0$	$U_{KA1} = U_{KA2}$ $U_{KA1} = U_{Ko}$ $I_{KA1} + I_{KA2} + I_{Ko} = 0$	$I_{KA1} = 0$ $U_{KA1} = U_{KA2}$ $I_{KA1} = -I_{KA2}$	$I_{KA1} = I_{KA2}$ $I_{KA1} = I_{Ko}$ $U_{KA1} + U_{KA2} + U_{Ko} = 0$

Дополнительное сопротивление $x^{(n)}$	0	$\frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	x_2	$x_2 + x_o$
Ток прямой последовательности $I_{KA1}^{(n)}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} \parallel x_{\Sigma o}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma o}}$
Ток обратной последовательности $I_{KA2}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_{o\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	$-I_{KA1}$	I_{KA1}
Ток нулевой последовательности $I_{Ko}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	0	I_{KA1}
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma})^2}} \quad (1,5 \div \sqrt{3})$	$\sqrt{3}$	3
Ток к.з. $I_K^{(n)}$	$I_K^{(3)} = I_{KA1}^{(3)}$	$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} \times I_{KA1}^{(1,1)}$	$I_K^{(2)} = m^{(2)} \times I_{KA1}^{(2)}$	$I_K^{(1)} = m^{(1)} \times I_{KA1}^{(1)}$
Напряжение прямой последовательности $U_{KA1}^{(n)}$	0	$I_{KA1} (x_2 \parallel x_o)$	$I_{KA1} \times x_2$	$I_{KA1} (x_2 + x_o)$
Напряжение обратной последовательности $U_{KA2}^{(n)}$	0	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$
Напряжение нулевой последовательности $U_{Ko}^{(n)}$	0	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$

Схема нулевой последовательности (НП). Токи НП по существу являются составляющими однофазного тока, разделенного между тремя фазами и возвращающегося через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочки кабелей). Поэтому путь токов НП существенно отличается от путей, по которым протекают токи ПП и ОП.

Составление схемы НП начинают от точки к. з., считая, что в этой точке фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение НП U_{ko} . Далее выявляют возможные пути протекания токов НП и в схему замещения включаются элементы, через которые протекают токи. Началом схемы (H_o) является точка нулевого потенциала (земля), концом – точка к. з. (K_o).

Схемы ПП, ОП и НП представлены на рис. 2

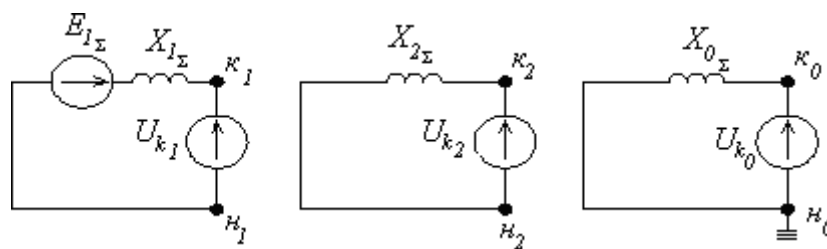


Рис. 2

Система токов НП существенно отличается от схем ПП и ОП и поэтому сопротивления элементов для токов НП совершенно иные.

Синхронные машины: сопротивление НП зависит от конструкции и типа обмоток и колеблется в пределах $x_{0*} = (0,15 \dots 0,6) \cdot x'_d$.

Асинхронные двигатели: достаточно достоверное значение x_0 может быть получено лишь опытным путем, или по данным завода-изготовителя.

Комплексная нагрузка: определяется конкретной схемой соединения элементов нагрузки и питающей сети.

Реакторы: представляют собой однофазный аппарат, поэтому $x_0 = x_1$.

Воздушные ЛЭП: токи НП линий электропередачи возвращаются через землю и по грозозащитным заземляющим тросам, если последние имеются. Для практических расчетов принимают:

одноцепная линия без тросов $x_0 = 3,5 x_1$;

двухцепная линия без тросов $x_0 = 5,5 x_1$;

одноцепная линия со стальным тросом $x_0 = 3 x_1$;

одноцепная линия с медным тросом $x_0 = 2 x_1$;

двухцепная линия со стальным тросом $x_0 = 4,7 x_1$;

двухцепная линия с медным тросом $x_0 = 3 x_1$.

Кабельные линии: приблизительно $x_0 \approx (3,5 \dots 4,6) x_1$, или точное значение из замеров в реальных условиях.

Трансформаторы: индуктивное сопротивление НП трансформатора определяется его конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки трансформатора, соединенной треугольником (Δ) или в звезду без заземленной нейтрали ($\bigwedge$), сопротивление НП трансформатора $x_0 = \infty$, так как в этом случае исключается возможность циркуляции токов НП в данном трансформаторе. Следовательно, конечная величина сопротивления НП трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью ($\bigwedge$).

Для трансформаторов со схемой $\bigwedge / \Delta$

$$x_{0*} = x_{1*} = \frac{u_k \%}{100},$$

причем токи НП не выходят за треугольник.

Для трансформаторов со схемой $\bigwedge / \bigwedge$

$$x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}; x_{I*} = \frac{u_K \%}{200}; x_{\mu*} = 0,3 \dots 1,0.$$

Для трансформаторов со схемой Δ/Δ

$$x_{o*} = x_{I*} + \frac{(x_{II*} + x_{\text{вн}*}) \cdot x_{\mu*}}{x_{II*} + x_{\text{вн}*} + x_{\mu*}}; x_{II*} = \frac{u_K \%}{200},$$

где $x_{\text{вн}}$ – сопротивление НП элементов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора.

Если на вторичной обмотке нет заземленных элементов, то

$$(x_{\text{вн}} = \infty), \text{ то } x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}.$$

Если нейтраль трансформатора заземлена через сопротивление R_N , то оно учитывается в схеме замещения утроенным значением.

Пример решения:

При поочередном к. з. в точке «К» (рис. 3) определить токи двухфазного, однофазного и двухфазного к. з. на землю для момента времени $t = 0$.

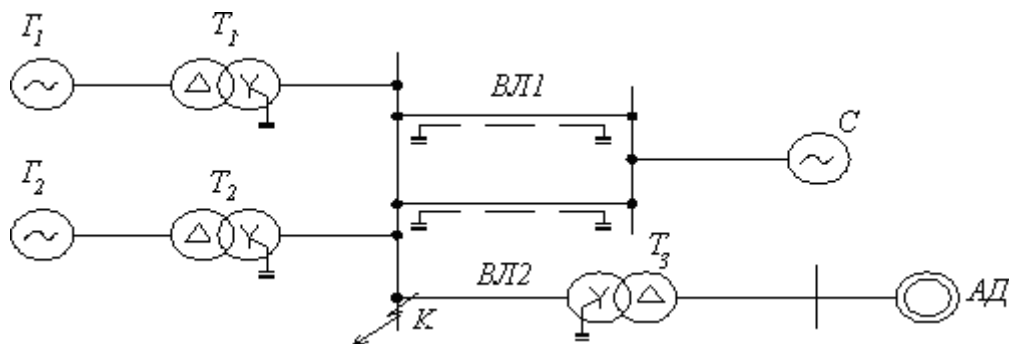


Рис. 3

Исходные данные:

- Г1, Г2: $S_n = 35 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_n = 10,5 \text{ кВ}; x''_{d*} = 0,23;$
 Т1, Т2: $S_n = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 10,5/121 \text{ кВ}; u_K = 10,5 \%;$
 Т3: $S_n = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 110/6,3 \text{ кВ}; u_K = 10,5 \%;$
 ВЛ1: $\ell = 70 \text{ км}; x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ двухцепная со стальным тросом};$
 ВЛ2: $\ell = 25 \text{ км}; x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ одноцепная без троса};$
 АД: $P_n = 3,2 \text{ МВт}; U_n = 6 \text{ кВ}; \eta = 0,94; \cos \varphi = 0,9; K_n = 4,2;$
 С: $x_{c(1)} = x_{c(2)} = 20 \text{ Ом}; x_{c(0)} = 60 \text{ Ом}.$

Расчет проводим в относительных базисных единицах при приближенном приведении.

Намечаем ступени напряжения и устанавливаем базисные единицы:

$$S_0 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{0I} = 10,5 \text{ кВ}; U_{0II} = 115 \text{ кВ}; U_{0III} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$I_{0II} = \frac{S_0}{\sqrt{3}U_{0II}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

Схема замещения ПП, рис. 4:

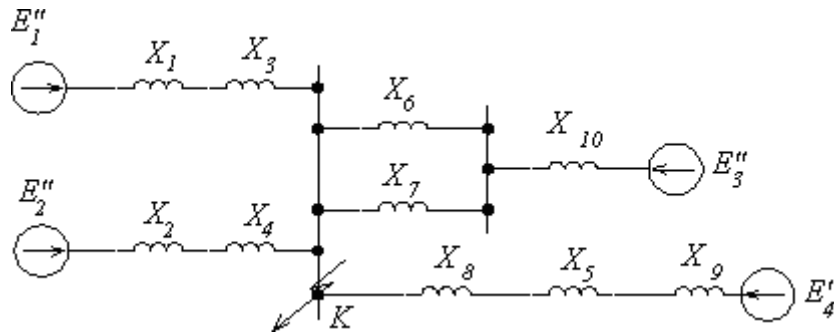


Рис. 4

Сопротивление элементов схемы ПП:

$$\Gamma 1; \Gamma 2: \quad x_{1*}(\delta) = x_{2*}(\delta) = x'_d \frac{S_\delta}{S_H} = 0,23 \frac{100}{35} = 0,66.$$

При дальнейших расчетах знак $*(\delta)$ опускаем.

$$T1; T2: \quad x_3 = x_4 = \frac{u_k \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$T3: \quad x_5 = \frac{u_k \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{6,3} = 1,67;$$

$$ВЛ1: \quad x_6 = x_7 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21;$$

$$ВЛ2: \quad x_8 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 25 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075;$$

$$АД: \quad x_9 = \frac{1}{K_n} \frac{S_\delta \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} = \frac{1}{4,2} \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 0,94}{3,2} = 6,3;$$

$$С: \quad x_{10} = x_{c(1)} \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 20 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15.$$

Эдс генерирующих ветвей:

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad E'_1 = E'_2 = U_{(o)*} + I_{(o)*} \cdot x'_d \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 + 1 \cdot 0,23 \cdot 0,6 = 1,14;$$

$$С: \quad E''_3 = 1,0;$$

$$АД: \quad E'_4 = U_{(o)*} - I_{(o)*} \cdot x'_{A'D} \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 - 1 \cdot \frac{1}{4,2} \cdot 0,435 = 0,9.$$

Преобразуем схему к радиальному виду, выделив три генерирующих ветви (рис. 5): систему, генераторы станции, АД.

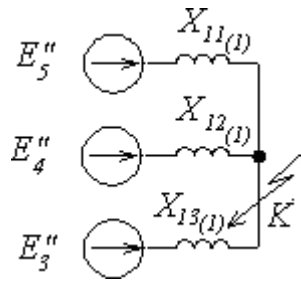


Рис. 5

$$E_5' = \frac{E_1' \cdot (x_1 + x_3) + E_2' \cdot (x_2 + x_4)}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4} = \frac{1,14(0,66 + 0,26) + 1,14(0,66 + 0,26)}{0,66 + 0,26 + 0,66 + 0,26} = 1,14;$$

$$x_{11} = \frac{(x_1 + x_3)(x_2 + x_4)}{x_1 + x_3 + x_2 + x_4} = \frac{(0,66 + 0,26)(0,66 + 0,26)}{0,66 \cdot 2 + 0,26 \cdot 2} = 0,46;$$

$$x_{12} = x_8 + x_5 + x_9 = 0,075 + 1,67 + 6,3 = 8,05;$$

$$x_{13} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + x_{10} = \frac{0,21 \cdot 0,21}{0,21 + 0,21} + 0,15 = 0,255.$$

Коэффициенты распределения генерирующих ветвей:

$$\Gamma_1, \Gamma_2: \quad C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{11}} = \frac{0,161}{0,46} = 0,35;$$

$$\text{АД:} \quad C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{12}} = \frac{0,161}{8,05} = 0,018;$$

$$\text{С:} \quad C_{III} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{13}} = \frac{0,161}{0,255} = 0,631;$$

$$x_{\text{экв}} = x_{11} // x_{12} // x_{13} = \frac{x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}}{x_{11} \cdot x_{12} + x_{11} \cdot x_{13} + x_{12} \cdot x_{13}} =$$

$$= \frac{0,46 \cdot 8,05 \cdot 0,255}{0,46 \cdot 8,05 + 0,46 \cdot 0,255 + 8,05 \cdot 0,255} = 0,161.$$

Схема замещения ОП (рис. 6):

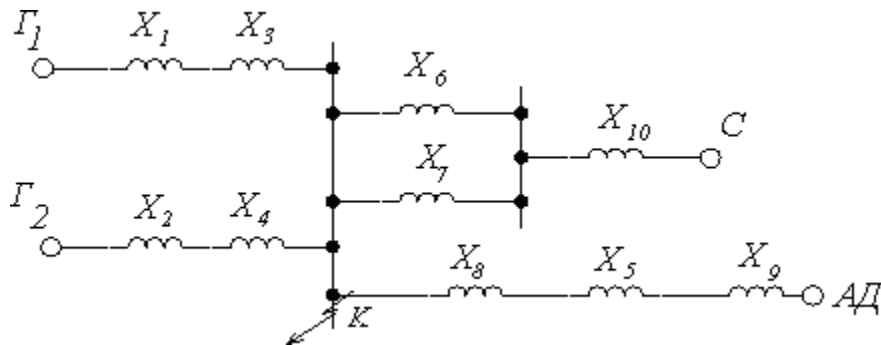


Рис. 6

Сопротивления элементов схемы ОП такие же, как в схеме ПП, кроме генераторов. Для генераторов имеем:

$$x_{1(2)} = x_{2(2)} = 1,45 \cdot x_{1(1)} = 1,45 \cdot 0,66 = 0,96.$$

Преобразуем схему (рис. 7) и определим сопротивления генерирующих ветвей для ОП:

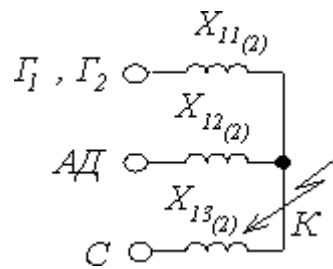


Рис. 7

$$x_{11(2)} = (x_{1(2)} + x_3) // (x_{2(2)} + x_4) = 0,61; x_{12(2)} = x_{12(1)} = 8,05; x_{13(2)} = x_{13(1)} = 0,255.$$

Результирующее сопротивление ОП:

$$x_{2\Sigma} = x_{11(2)} // x_{12(2)} // x_{13(2)} = 0,176.$$

Схема замещения НП (рис. 8):

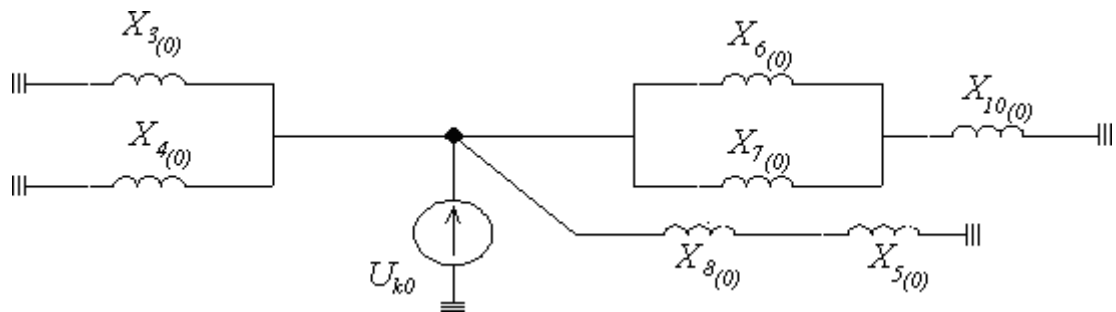


Рис. 8

Сопротивления элементов схемы:

$$\text{T1, T2: } x_{3(o)} = x_{4(o)} = x_{3(1)} = 0,26;$$

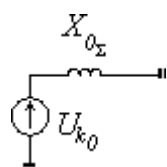
$$\text{T3: } x_{5(o)} = x_{5(1)} = 1,67;$$

$$\text{ВЛ1: } x_{6(o)} = x_{7(o)} = 4,7 \cdot x_{6(1)} = 4,7 \cdot 0,21 = 1,0;$$

$$\text{ВЛ2: } x_{8(o)} = 3,5 \cdot x_{8(1)} = 3,5 \cdot 0,075 = 0,263;$$

$$\text{С: } x_{10(o)} = x_{c(o)} \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,45.$$

Преобразуем схему (рис. 9) и определим результирующее (суммарное) сопротивление схемы относительно точки к. з.:



$$\begin{aligned}
 x_{o\Sigma} &= (x_3 // x_4) // (x_8 + x_5) // \\
 & // [(x_6 // x_7) + x_{10}] = \\
 &= \left(\frac{0,26 \cdot 0,26}{0,26 + 0,26} \right) // (0,263 + 1,67) // \\
 & // \left[\frac{1 \cdot 1}{1 + 1} + 0,45 \right] = 1,08.
 \end{aligned}$$

Рис. 9

Распределим результирующее сопротивление по генерирующим ветвям.

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad x_{11(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_I} = \frac{1,08}{0,35} = 3,08;$$

$$АД: \quad x_{12(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{II}} = \frac{1,08}{0,018} = 60;$$

$$С: \quad x_{13(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{III}} = \frac{1,08}{0,631} = 1,71.$$

Расчет двухфазного к. з. в точке «К».

Комплексная схема для определения токов ПП, рис. 10:

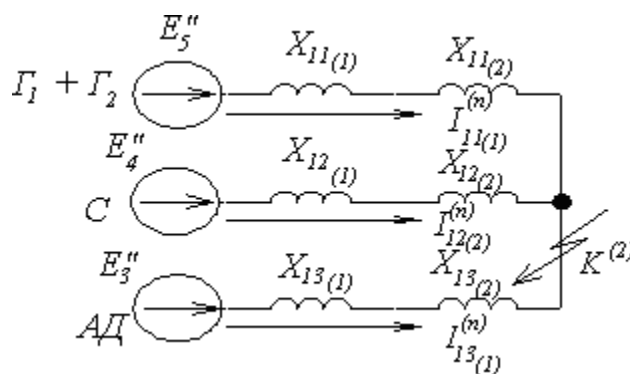


Рис. 10

Токи ПП генерирующих ветвей:

$$I_{11(1)}^{(2)} = \frac{E_5'}{x_{11(1)} + x_{11(2)}} = \frac{1,14}{0,46 + 0,61} = 1,07;$$

$$I_{12(1)}^{(2)} = \frac{E_4'}{x_{12(1)} + x_{12(2)}} = \frac{0,9}{8,05 + 8,05} = 0,05;$$

$$I_{13(1)}^{(2)} = \frac{E_3'}{x_{13(1)} + x_{13(2)}} = \frac{1}{0,255 + 0,255} = 1,96.$$

Полный ток двухфазного к. з.:

$$I_k^{(2)} = m^{(2)} \cdot \left(I_{11(1)}^{(2)} + I_{12(1)}^{(2)} + I_{13(1)}^{(2)} \right) \cdot I_{бII} = \sqrt{3} (1,07 + 0,05 + 1,96) \cdot 0,5 = 2,66 \text{ кА}.$$

Задание для самостоятельного решения:

Найти ток двухфазного короткого замыкания в схеме, приведенной на рис. 11. Дано: S_G , МВА; S_T , МВА; l , км; $x''_d = 0,15$; $x_2 = 0,18$; $E = 1,12$; $u_k = 10,5\%$; $x_{01} = 0,4$ Ом/км

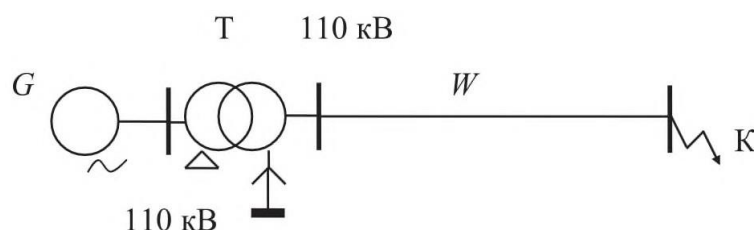


Рис. 11

Вариант	S_G	S_T	l
1	40	65	45
2	41	66	45,2
3	42	67	45,4
4	43	68	45,6
5	44	69	45,8
6	45	70	46
7	46	71	46,2
8	47	72	46,4
9	48	73	46,6
10	49	74	46,8
11	50	75	47
12	51	76	47,2
13	52	77	47,4
14	53	78	47,6
15	54	79	47,8
16	55	80	48
17	56	81	48,2
18	57	82	48,4
19	58	83	48,6
20	59	84	48,8
21	60	85	49
22	61	86	49,2
23	62	87	49,4
24	63	88	49,6
25	64	89	49,8
26	65	90	50

Вариант	S_G	S_T	l
27	66	91	50,2
28	67	92	50,4
29	68	93	50,6
30	69	94	50,8
31	70	95	51
32	71	96	51,2
33	72	97	51,4
34	73	98	51,6
35	74	99	51,8
36	75	100	52
37	76	101	52,2
38	77	102	52,4
39	78	103	52,6
40	79	104	52,8
41	80	105	53
42	81	106	53,2
43	82	107	53,4
44	83	108	53,6
45	84	109	53,8
46	85	110	54
47	86	111	54,2
48	87	112	54,4
49	88	113	54,6
50	89	114	54,8

Расчет двухфазного короткого замыкания на землю

Исследования и расчеты при несимметричных к. з. проводят с помощью метода симметричных составляющих. Расчет состоит в том, что заданный несимметричный режим работы системы представлен как результат наложения трех симметричных режимов, один из которых содержит только составляющие прямой последовательности (эдс, токи, сопротивления), другой – только составляющие обратной последовательности и третий – только составляющие нулевой последовательности.

При расчетах токов несимметричных к. з. применяют правило эквивалентности прямой последовательности, согласно которому ток прямой последовательности любого несимметричного к. з. может быть определен как ток при трехфазном к. з. в точке, удаленной от действительной точки к. з. на дополнительное сопротивление, величина которого в зависимости от вида к. з. определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, т. е.:

$$I_{k1}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \Delta Z^{(n)}},$$

где $E_{1\Sigma}$, $Z_{1\Sigma}$ – результирующие эдс и сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки к. з.; $\Delta Z^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности.

Полный ток в месте короткого замыкания находят так:

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{k1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида к. з.

Из правила эквивалентности следует, что при любом виде к. з. ток $I_{k1}^{(n)}$ определяется из подобных по структуре схем замещения, рис. 1.

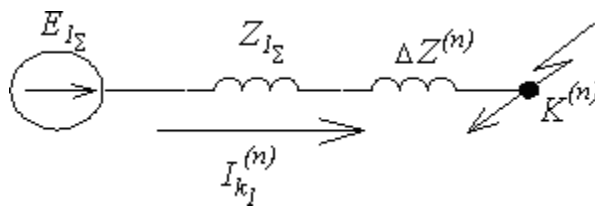


Рис. 1

Установлено, что симметричные составляющие токов и напряжений в месте к. з., а также полные токи и напряжения в здоровых и поврежденных фазах для любого момента времени пропорциональны току прямой последовательности. Основные расчетные соотношения приведены в таблице 6.

Таким образом, для определения токов при несимметричном к. з. необходимо:

составить схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Определить сопротивления элементов и результирующие

сопротивления прямой ($x_{1\Sigma}$), обратной ($x_{2\Sigma}$) и нулевой ($x_{0\Sigma}$) последовательностей;

составить комплексные схемы замещения, в которых $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{3\Sigma}$ соединены между собой определенным образом в зависимости от вида к. з.;

определить ток прямой последовательности в комплексной схеме замещения. Последний является током трехфазного к. з. при эквивалентном трехфазном к. з.;

найти полный ток несимметричного к. з. по выражению (39).

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей находят по соответствующим схемам

Схема прямой последовательности (ПП) – обычная схема, которую составляют для расчета симметричного трехфазного к. з. В зависимости от момента времени переходного процесса генераторы, синхронные компенсаторы и нагрузки в схему замещения вводят соответствующими реактивностями и эдс. По схеме определяют $E_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ генерирующих ветвей, а также коэффициенты распределения для них.

Схема обратной последовательности (ОП) отличается от схемы ПП отсутствием в ней эдс и значением реактивных сопротивлений генераторов и нагрузок. За начало схемы прямой (обратной) последовательности ($H1$, $H2$) принимают точку, в которую объединены свободные концы генерирующих ветвей (точка нулевого потенциала). Концом схемы считают точку, где возникло к. з. (K_1 , K_2).

Для элементов системы с неподвижными магнитосвязанными цепями индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательности равны между собой. Таким образом, для трансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов $x_1 = x_2$. Для вращающихся машин $x_1 \neq x_2$. В практических расчетах принимают:

для синхронных машин без демпферных обмоток $x_2 = 1,45 \cdot x'_d$;

для турбогенераторов и синхронных машин с демпферными обмотками

$$x_2 = 1,22 \cdot x'_d;$$

для асинхронных двигателей $x_2 = x'_d \cdot e^* = \frac{1}{K_n} = \frac{1}{I_{ниск}^*}$;

для комплексной (обобщенной) нагрузки $x_{2*} = 0,35$.

Т а б л и ц а 1

Вид к.з.	$K^{(3)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
Граничные условия	$U_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $I_{KB} = -I_{KC}$ $U_{KB} = U_{KC}$	$U_{KA} = 0$ $I_{KB} = 0$ $I_{KC} = 0$
Соотношение между симметричными составляющими	$I_{KA} = I_{KA1}$ $I_{K2} = 0$ $I_{K0} = 0$	$U_{KA1} = U_{KA2}$ $U_{KA1} = U_{K0}$ $I_{KA1} + I_{KA2} + I_{K0} = 0$	$I_{KA1} = 0$ $U_{KA1} = U_{KA2}$ $I_{KA1} = -I_{KA2}$	$I_{KA1} = I_{KA2}$ $I_{KA1} = I_{K0}$ $U_{KA1} + U_{KA2} + U_{K0} = 0$

Дополнительное сопротивление $x^{(n)}$	0	$\frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	x_2	$x_2 + x_o$
Ток прямой последовательности $I_{KA1}^{(n)}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} \parallel x_{\Sigma o}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma o}}$
Ток обратной последовательности $I_{KA2}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_{o\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	$-I_{KA1}$	I_{KA1}
Ток нулевой последовательности $I_{Ko}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	0	I_{KA1}
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma})^2}} \quad (1,5 \div \sqrt{3})$	$\sqrt{3}$	3
Ток к.з. $I_K^{(n)}$	$I_K^{(3)} = I_{KA1}^{(3)}$	$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} \times I_{KA1}^{(1,1)}$	$I_K^{(2)} = m^{(2)} \times I_{KA1}^{(2)}$	$I_K^{(1)} = m^{(1)} \times I_{KA1}^{(1)}$
Напряжение прямой последовательности $U_{KA1}^{(n)}$	0	$I_{KA1} (x_2 \parallel x_o)$	$I_{KA1} \times x_2$	$I_{KA1} (x_2 + x_o)$
Напряжение обратной последовательности $U_{KA2}^{(n)}$	0	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$
Напряжение нулевой последовательности $U_{Ko}^{(n)}$	0	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$

Схема нулевой последовательности (НП). Токи НП по существу являются составляющими однофазного тока, разделенного между тремя фазами и возвращающегося через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочки кабелей). Поэтому путь токов НП существенно отличается от путей, по которым протекают токи ПП и ОП.

Составление схемы НП начинают от точки к. з., считая, что в этой точке фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение НП U_{ko} . Далее выявляют возможные пути протекания токов НП и в схему замещения включаются элементы, через которые протекают токи. Началом схемы (H_o) является точка нулевого потенциала (земля), концом – точка к. з. (K_o).

Схемы ПП, ОП и НП представлены на рис. 2

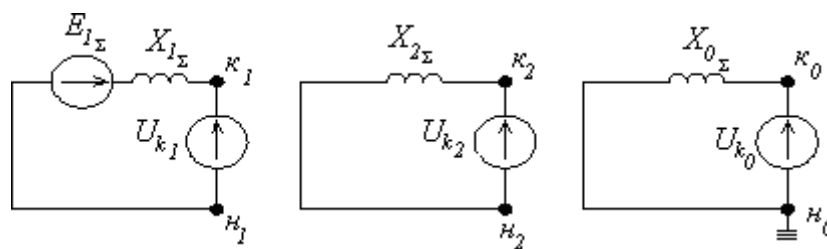


Рис. 2

Система токов НП существенно отличается от схем ПП и ОП и поэтому сопротивления элементов для токов НП совершенно иные.

Синхронные машины: сопротивление НП зависит от конструкции и типа обмоток и колеблется в пределах $x_{0*} = (0,15 \dots 0,6) \cdot x'_d$.

Асинхронные двигатели: достаточно достоверное значение x_0 может быть получено лишь опытным путем, или по данным завода-изготовителя.

Комплексная нагрузка: определяется конкретной схемой соединения элементов нагрузки и питающей сети.

Реакторы: представляют собой однофазный аппарат, поэтому $x_0 = x_1$.

Воздушные ЛЭП: токи НП линий электропередачи возвращаются через землю и по грозозащитным заземляющим тросам, если последние имеются. Для практических расчетов принимают:

одноцепная линия без тросов $x_0 = 3,5 x_1$;

двухцепная линия без тросов $x_0 = 5,5 x_1$;

одноцепная линия со стальным тросом $x_0 = 3 x_1$;

одноцепная линия с медным тросом $x_0 = 2 x_1$;

двухцепная линия со стальным тросом $x_0 = 4,7 x_1$;

двухцепная линия с медным тросом $x_0 = 3 x_1$.

Кабельные линии: приблизительно $x_0 \approx (3,5 \dots 4,6) x_1$, или точное значение из замеров в реальных условиях.

Трансформаторы: индуктивное сопротивление НП трансформатора определяется его конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки трансформатора, соединенной треугольником (Δ) или в звезду без заземленной нейтрали ($\bigwedge$), сопротивление НП трансформатора $x_0 = \infty$, так как в этом случае исключается возможность циркуляции токов НП в данном трансформаторе. Следовательно, конечная величина сопротивления НП трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью ($\bigwedge$).

Для трансформаторов со схемой $\bigwedge / \Delta$

$$x_{0*} = x_{1*} = \frac{u_k \%}{100},$$

причем токи НП не выходят за треугольник.

Для трансформаторов со схемой $\bigwedge / \bigwedge$

$$x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}; x_{I*} = \frac{u_{\kappa} \%}{200}; x_{\mu*} = 0,3 \dots 1,0.$$

Для трансформаторов со схемой Δ/Δ

$$x_{o*} = x_{I*} + \frac{(x_{II*} + x_{\text{вн}*}) \cdot x_{\mu*}}{x_{II*} + x_{\text{вн}*} + x_{\mu*}}; x_{II*} = \frac{u_{\kappa} \%}{200},$$

где $x_{\text{вн}}$ – сопротивление НП элементов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора.

Если на вторичной обмотке нет заземленных элементов, то

$$(x_{\text{вн}} = \infty), \text{ то } x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}.$$

Если нейтраль трансформатора заземлена через сопротивление R_N , то оно учитывается в схеме замещения утроенным значением.

Пример решения:

При поочередном к. з. в точке «К» (рис. 3) определить токи двухфазного, однофазного и двухфазного к. з. на землю для момента времени $t = 0$.

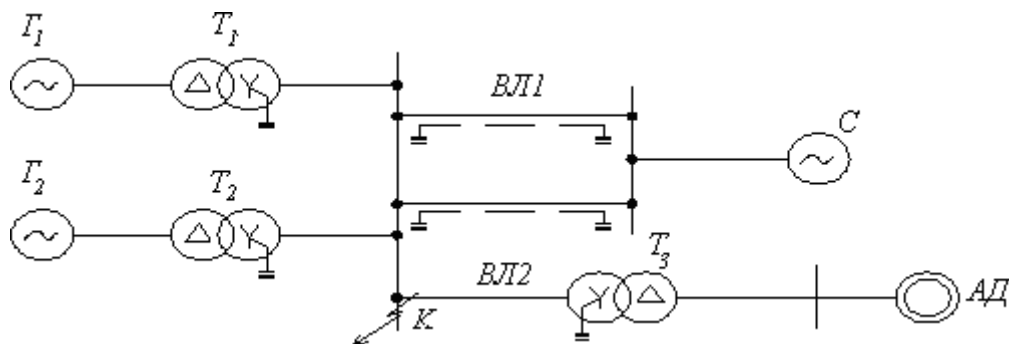


Рис. 3

Исходные данные:

- Г1, Г2: $S_n = 35 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_n = 10,5 \text{ кВ}; x''_{d*} = 0,23;$
 Т1, Т2: $S_n = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 10,5/121 \text{ кВ}; u_{\kappa} = 10,5 \%;$
 Т3: $S_n = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 110/6,3 \text{ кВ}; u_{\kappa} = 10,5 \%;$
 ВЛ1: $\ell = 70 \text{ км}; x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ двухцепная со стальным тросом};$
 ВЛ2: $\ell = 25 \text{ км}; x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ одноцепная без троса};$
 АД: $P_n = 3,2 \text{ МВт}; U_n = 6 \text{ кВ}; \eta = 0,94; \cos \varphi = 0,9; K_n = 4,2;$
 С: $x_{c(1)} = x_{c(2)} = 20 \text{ Ом}; x_{c(0)} = 60 \text{ Ом}.$

Расчет проводим в относительных базисных единицах при приближенном приведении.

Намечаем ступени напряжения и устанавливаем базисные единицы:

$$S_{\delta} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{\delta I} = 10,5 \text{ кВ}; U_{\delta II} = 115 \text{ кВ}; U_{\delta III} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$I_{\delta II} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta II}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

Схема замещения ПП, рис. 4:

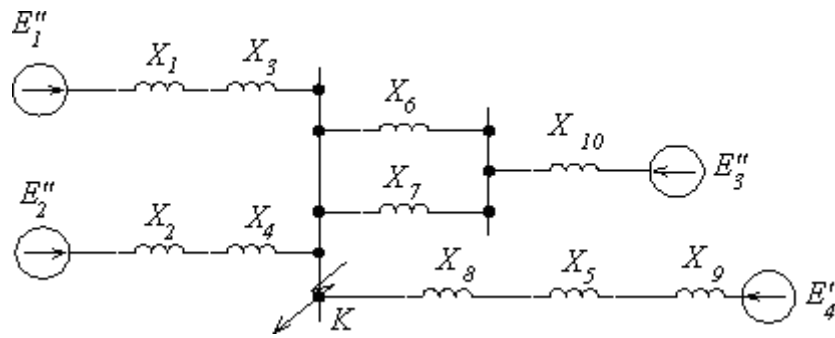


Рис. 4

Сопротивление элементов схемы ПП:

$$\Gamma 1; \Gamma 2: \quad x_{1*}(\delta) = x_{2*}(\delta) = x'_d \frac{S_\delta}{S_H} = 0,23 \frac{100}{35} = 0,66.$$

При дальнейших расчетах знак $*(\delta)$ опускаем.

$$T1; T2: \quad x_3 = x_4 = \frac{u_k \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$T3: \quad x_5 = \frac{u_k \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{6,3} = 1,67;$$

$$ВЛ1: \quad x_6 = x_7 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21;$$

$$ВЛ2: \quad x_8 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 25 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075;$$

$$АД: \quad x_9 = \frac{1}{K_n} \frac{S_\delta \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} = \frac{1}{4,2} \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 0,94}{3,2} = 6,3;$$

$$С: \quad x_{10} = x_{c(1)} \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 20 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15.$$

Эдс генерирующих ветвей:

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad E'_1 = E'_2 = U_{(o)*} + I_{(o)*} \cdot x'_d \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 + 1 \cdot 0,23 \cdot 0,6 = 1,14;$$

$$С: \quad E''_3 = 1,0;$$

$$АД: \quad E'_4 = U_{(o)*} - I_{(o)*} \cdot x'_{A'D} \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 - 1 \cdot \frac{1}{4,2} \cdot 0,435 = 0,9.$$

Преобразуем схему к радиальному виду, выделив три генерирующих ветви (рис. 5): систему, генераторы станции, АД.

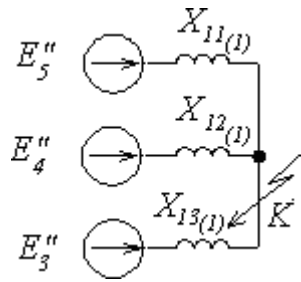


Рис. 5

$$E_5' = \frac{E_1' \cdot (x_1 + x_3) + E_2' \cdot (x_2 + x_4)}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4} = \frac{1,14(0,66 + 0,26) + 1,14(0,66 + 0,26)}{0,66 + 0,26 + 0,66 + 0,26} = 1,14;$$

$$x_{11} = \frac{(x_1 + x_3)(x_2 + x_4)}{x_1 + x_3 + x_2 + x_4} = \frac{(0,66 + 0,26)(0,66 + 0,26)}{0,66 \cdot 2 + 0,26 \cdot 2} = 0,46;$$

$$x_{12} = x_8 + x_5 + x_9 = 0,075 + 1,67 + 6,3 = 8,05;$$

$$x_{13} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + x_{10} = \frac{0,21 \cdot 0,21}{0,21 + 0,21} + 0,15 = 0,255.$$

Коэффициенты распределения генерирующих ветвей:

$$\Gamma_1, \Gamma_2: \quad C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{11}} = \frac{0,161}{0,46} = 0,35;$$

$$\text{АД:} \quad C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{12}} = \frac{0,161}{8,05} = 0,018;$$

$$\text{С:} \quad C_{III} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{13}} = \frac{0,161}{0,255} = 0,631;$$

$$x_{\text{экв}} = x_{11} // x_{12} // x_{13} = \frac{x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}}{x_{11} \cdot x_{12} + x_{11} \cdot x_{13} + x_{12} \cdot x_{13}} =$$

$$= \frac{0,46 \cdot 8,05 \cdot 0,255}{0,46 \cdot 8,05 + 0,46 \cdot 0,255 + 8,05 \cdot 0,255} = 0,161.$$

Схема замещения ОП (рис. 6):

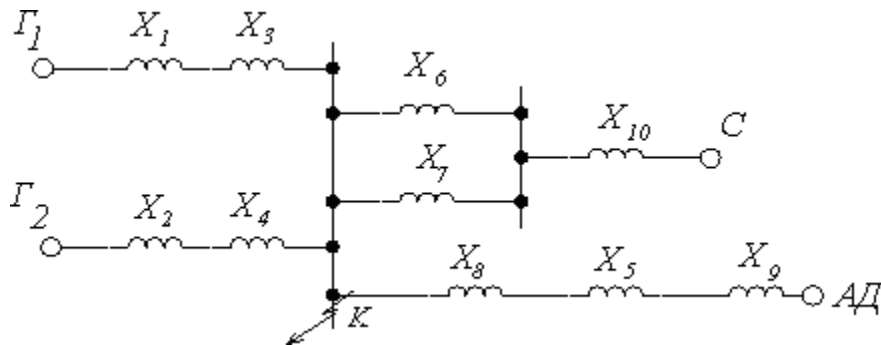


Рис. 6

Сопротивления элементов схемы ОП такие же, как в схеме ПП, кроме генераторов. Для генераторов имеем:

$$x_{1(2)} = x_{2(2)} = 1,45 \cdot x_{1(1)} = 1,45 \cdot 0,66 = 0,96.$$

Преобразуем схему (рис. 7) и определим сопротивления генерирующих ветвей для ОП:

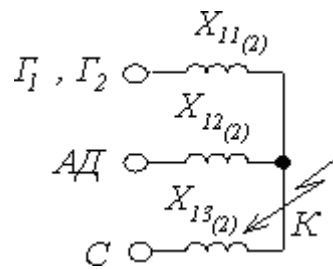


Рис. 7

$$x_{11(2)} = (x_{1(2)} + x_3) // (x_{2(2)} + x_4) = 0,61; x_{12(2)} = x_{12(1)} = 8,05; x_{13(2)} = x_{13(1)} = 0,255.$$

Результирующее сопротивление ОП:

$$x_{2\Sigma} = x_{11(2)} // x_{12(2)} // x_{13(2)} = 0,176.$$

Схема замещения НП (рис. 8):

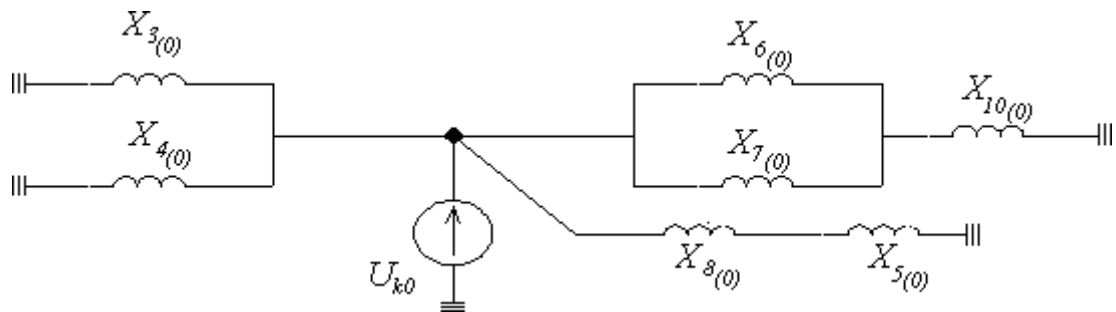


Рис. 8

Сопротивления элементов схемы:

Т1, Т2: $x_{3(o)} = x_{4(o)} = x_{3(1)} = 0,26;$

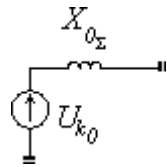
Т3: $x_{5(o)} = x_{5(1)} = 1,67;$

ВЛ1: $x_{6(o)} = x_{7(o)} = 4,7 \cdot x_{6(1)} = 4,7 \cdot 0,21 = 1,0;$

ВЛ2: $x_{8(o)} = 3,5 \cdot x_{8(1)} = 3,5 \cdot 0,075 = 0,263;$

С: $x_{10(o)} = x_{c(o)} \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,45.$

Преобразуем схему (рис. 9) и определим результирующее (суммарное) сопротивление схемы относительно точки к. з.:



$$\begin{aligned}
 x_{o\Sigma} &= (x_3 // x_4) // (x_8 + x_5) // \\
 & // [(x_6 // x_7) + x_{10}] = \\
 &= \left(\frac{0,26 \cdot 0,26}{0,26 + 0,26} \right) // (0,263 + 1,67) // \\
 & // \left[\frac{1 \cdot 1}{1 + 1} + 0,45 \right] = 1,08.
 \end{aligned}$$

Рис. 9

Распределим результирующее сопротивление по генерирующим ветвям.

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad x_{11(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_I} = \frac{1,08}{0,35} = 3,08;$$

$$АД: \quad x_{12(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{II}} = \frac{1,08}{0,018} = 60;$$

$$С: \quad x_{13(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{III}} = \frac{1,08}{0,631} = 1,71.$$

Расчет двухфазного к. з. на землю в точке «К».

Комплексная схема для определения токов ПП (рис. 10):

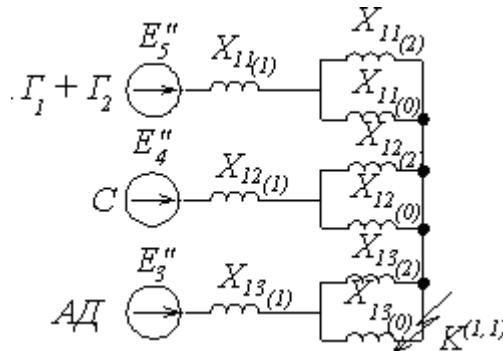


Рис. 10

Токи ПП генерирующих ветвей:

$$I_{11(1)}^{(1,1)} = \frac{E_5'}{x_{11(1)} + x_{11(2)} // x_{11(o)}} = \frac{1,14}{0,46 + \frac{0,61 \cdot 3,08}{0,61 + 3,08}} = 1,17;$$

$$I_{12(1)}^{(1,1)} = \frac{E_4'}{x_{12(1)} + x_{12(2)} // x_{12(o)}} = \frac{0,9}{8,05 + \frac{8,05 \cdot 60}{8,05 + 60}} = 0,06;$$

$$I_{13(1)}^{(1,1)} = \frac{E_3'}{x_{13(1)} + x_{13(2)} // x_{13(o)}} = \frac{1}{0,255 + \frac{0,255 \cdot 1,71}{0,255 + 1,71}} = 2,1.$$

Полный ток двухфазного к. з. на землю:

$$I_{\kappa}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot \left(I_{11(1)}^{(1,1)} + I_{12(1)}^{(1,1)} + I_{13(1)}^{(1,1)} \right) \cdot I_{\text{бл}} = 1,62(1,17 + 0,06 + 2,1) \cdot 0,5 = 2,69 \text{ кА}$$

где

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,176 \cdot 1,08}{(0,176 + 1,08)^2}} = 1,62.$$

Задание для самостоятельного решения:

Найти ток двухфазного короткого замыкания на землю в схеме, приведенной на рис. 11. Дано: S_G , МВА; S_T , МВА; l , км; $x''_d = 0,15$; $x_2 = 0,18$; $E = 1,12$; $u_k = 10,5\%$; $x_{01} = 0,4 \text{ Ом/км}$; $x_{00} = 4x_{01}$

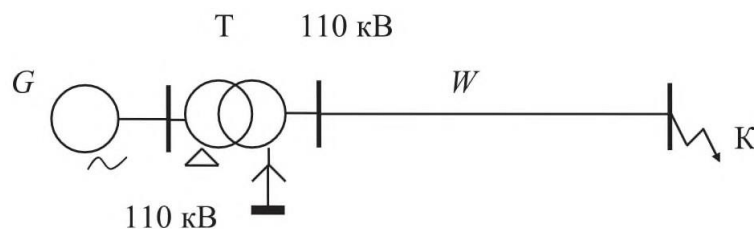


Рис. 11

Вариант	S_G	S_T	l
1	40	65	45
2	41	66	45,2
3	42	67	45,4
4	43	68	45,6
5	44	69	45,8
6	45	70	46
7	46	71	46,2
8	47	72	46,4
9	48	73	46,6
10	49	74	46,8
11	50	75	47
12	51	76	47,2
13	52	77	47,4
14	53	78	47,6
15	54	79	47,8
16	55	80	48
17	56	81	48,2
18	57	82	48,4
19	58	83	48,6

Вариант	S_G	S_T	l
20	59	84	48,8
21	60	85	49
22	61	86	49,2
23	62	87	49,4
24	63	88	49,6
25	64	89	49,8
26	65	90	50
27	66	91	50,2
28	67	92	50,4
29	68	93	50,6
30	69	94	50,8
31	70	95	51
32	71	96	51,2
33	72	97	51,4
34	73	98	51,6
35	74	99	51,8
36	75	100	52
37	76	101	52,2
38	77	102	52,4
39	78	103	52,6
40	79	104	52,8
41	80	105	53
42	81	106	53,2
43	82	107	53,4
44	83	108	53,6
45	84	109	53,8
46	85	110	54
47	86	111	54,2
48	87	112	54,4
49	88	113	54,6
50	89	114	54,8

Расчет однофазного короткого замыкания

Исследования и расчеты при несимметричных к. з. проводят с помощью метода симметричных составляющих. Расчет состоит в том, что заданный несимметричный режим работы системы представлен как результат наложения трех симметричных режимов, один из которых содержит только составляющие прямой последовательности (эдс, токи, сопротивления), другой – только составляющие обратной последовательности и третий – только составляющие нулевой последовательности.

При расчетах токов несимметричных к. з. применяют правило эквивалентности прямой последовательности, согласно которому ток прямой последовательности любого несимметричного к. з. может быть определен как ток при трехфазном к. з. в точке, удаленной от действительной точки к. з. на дополнительное сопротивление, величина которого в зависимости от вида к. з. определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, т. е.:

$$I_{\kappa 1}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \Delta Z^{(n)}},$$

где $E_{1\Sigma}$, $Z_{1\Sigma}$ – результирующие эдс и сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки к. з.; $\Delta Z^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности.

Полный ток в месте короткого замыкания находят так:

$$I_{\kappa}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{\kappa 1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида к. з.

Из правила эквивалентности следует, что при любом виде к. з. ток $I_{\kappa 1}^{(n)}$ определяется из подобных по структуре схем замещения, рис. 1.

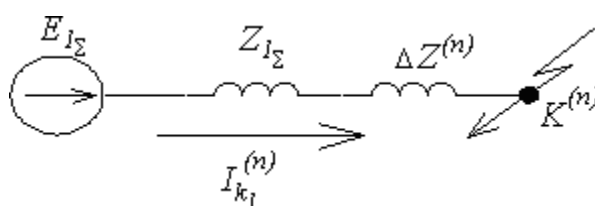


Рис. 1

Установлено, что симметричные составляющие токов и напряжений в месте к. з., а также полные токи и напряжения в здоровых и поврежденных фазах для любого момента времени пропорциональны току прямой последовательности. Основные расчетные соотношения приведены в таблице 6.

Таким образом, для определения токов при несимметричном к. з. необходимо:

составить схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Определить сопротивления элементов и результирующие

сопротивления прямой ($x_{1\Sigma}$), обратной ($x_{2\Sigma}$) и нулевой ($x_{0\Sigma}$) последовательностей;

составить комплексные схемы замещения, в которых $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{3\Sigma}$ соединены между собой определенным образом в зависимости от вида к. з.;

определить ток прямой последовательности в комплексной схеме замещения. Последний является током трехфазного к. з. при эквивалентном трехфазном к. з.;

найти полный ток несимметричного к. з. по выражению (39).

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей находят по соответствующим схемам

Схема прямой последовательности (ПП) – обычная схема, которую составляют для расчета симметричного трехфазного к. з. В зависимости от момента времени переходного процесса генераторы, синхронные компенсаторы и нагрузки в схему замещения вводят соответствующими реактивностями и эдс. По схеме определяют $E_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ генерирующих ветвей, а также коэффициенты распределения для них.

Схема обратной последовательности (ОП) отличается от схемы ПП отсутствием в ней эдс и значением реактивных сопротивлений генераторов и нагрузок. За начало схемы прямой (обратной) последовательности ($H1$, $H2$) принимают точку, в которую объединены свободные концы генерирующих ветвей (точка нулевого потенциала). Концом схемы считают точку, где возникло к. з. (K_1 , K_2).

Для элементов системы с неподвижными магнитосвязанными цепями индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательности равны между собой. Таким образом, для трансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов $x_1 = x_2$. Для вращающихся машин $x_1 \neq x_2$. В практических расчетах принимают:

для синхронных машин без демпферных обмоток $x_2 = 1,45 \cdot x'_d$;

для турбогенераторов и синхронных машин с демпферными обмотками

$$x_2 = 1,22 \cdot x'_d;$$

для асинхронных двигателей $x_2 = x'_d \cdot e^* = \frac{1}{K_n} = \frac{1}{I_{пуск}^*}$;

для комплексной (обобщенной) нагрузки $x_{2*} = 0,35$.

Т а б л и ц а 1

Вид к.з.	$K^{(3)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
Граничные условия	$U_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $I_{KB} = -I_{KC}$ $U_{KB} = U_{KC}$	$U_{KA} = 0$ $I_{KB} = 0$ $I_{KC} = 0$
Соотношение между симметричными составляющими	$I_{KA} = I_{KA1}$ $I_{K2} = 0$ $I_{Ko} = 0$	$U_{KA1} = U_{KA2}$ $U_{KA1} = U_{Ko}$ $I_{KA1} + I_{KA2} + I_{Ko} = 0$	$I_{KA1} = 0$ $U_{KA1} = U_{KA2}$ $I_{KA1} = -I_{KA2}$	$I_{KA1} = I_{KA2}$ $I_{KA1} = I_{Ko}$ $U_{KA1} + U_{KA2} + U_{Ko} = 0$

Дополнительное сопротивление $x^{(n)}$	0	$\frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	x_2	$x_2 + x_o$
Ток прямой последовательности $I_{KA1}^{(n)}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} \parallel x_{\Sigma o}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma o}}$
Ток обратной последовательности $I_{KA2}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_{o\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	$-I_{KA1}$	I_{KA1}
Ток нулевой последовательности $I_{Ko}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma}}$	0	I_{KA1}
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma})^2}}$ (1,5÷√3)	√3	3
Ток к.з. $I_K^{(n)}$	$I_K^{(3)} = I_{KA1}^{(3)}$	$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} \times I_{KA1}^{(1,1)}$	$I_K^{(2)} = m^{(2)} \times I_{KA1}^{(2)}$	$I_K^{(1)} = m^{(1)} \times I_{KA1}^{(1)}$
Напряжение прямой последовательности $U_{KA1}^{(n)}$	0	$I_{KA1} (x_2 \parallel x_o)$	$I_{KA1} \times x_2$	$I_{KA1} (x_2 + x_o)$
Напряжение обратной последовательности $U_{KA2}^{(n)}$	0	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$
Напряжение нулевой последовательности $U_{Ko}^{(n)}$	0	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$

Схема нулевой последовательности (НП). Токи НП по существу являются составляющими однофазного тока, разделенного между тремя фазами и возвращающегося через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочки кабелей). Поэтому путь токов НП существенно отличается от путей, по которым протекают токи ПП и ОП.

Составление схемы НП начинают от точки к. з., считая, что в этой точке фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение НП U_{ko} . Далее выявляют возможные пути протекания токов НП и в схему замещения включаются элементы, через которые протекают токи. Началом схемы (H_o) является точка нулевого потенциала (земля), концом – точка к. з. (K_o).

Схемы ПП, ОП и НП представлены на рис. 2

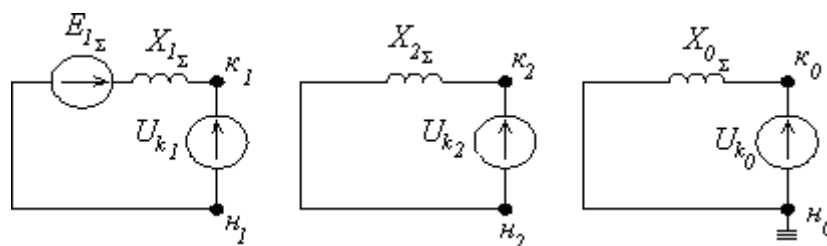


Рис. 2

Система токов НП существенно отличается от схем ПП и ОП и поэтому сопротивления элементов для токов НП совершенно иные.

Синхронные машины: сопротивление НП зависит от конструкции и типа обмоток и колеблется в пределах $x_{0*} = (0,15 \dots 0,6) \cdot x'_d$.

Асинхронные двигатели: достаточно достоверное значение x_0 может быть получено лишь опытным путем, или по данным завода-изготовителя.

Комплексная нагрузка: определяется конкретной схемой соединения элементов нагрузки и питающей сети.

Реакторы: представляют собой однофазный аппарат, поэтому $x_0 = x_1$.

Воздушные ЛЭП: токи НП линий электропередачи возвращаются через землю и по грозозащитным заземляющим тросам, если последние имеются. Для практических расчетов принимают:

одноцепная линия без тросов $x_0 = 3,5 x_1$;

двухцепная линия без тросов $x_0 = 5,5 x_1$;

одноцепная линия со стальным тросом $x_0 = 3 x_1$;

одноцепная линия с медным тросом $x_0 = 2 x_1$;

двухцепная линия со стальным тросом $x_0 = 4,7 x_1$;

двухцепная линия с медным тросом $x_0 = 3 x_1$.

Кабельные линии: приблизительно $x_0 \approx (3,5 \dots 4,6) x_1$, или точное значение из замеров в реальных условиях.

Трансформаторы: индуктивное сопротивление НП трансформатора определяется его конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки трансформатора, соединенной треугольником (Δ) или в звезду без заземленной нейтрали ($\bigwedge$), сопротивление НП трансформатора $x_0 = \infty$, так как в этом случае исключается возможность циркуляции токов НП в данном трансформаторе. Следовательно, конечная величина сопротивления НП трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью ($\bigwedge$).

Для трансформаторов со схемой $\bigwedge / \Delta$

$$x_{0*} = x_{1*} = \frac{u_k \%}{100},$$

причем токи НП не выходят за треугольник.

Для трансформаторов со схемой $\bigwedge / \bigwedge$

$$x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}; x_{I*} = \frac{u_{\kappa} \%}{200}; x_{\mu*} = 0,3 \dots 1,0.$$

Для трансформаторов со схемой Δ/Δ

$$x_{o*} = x_{I*} + \frac{(x_{II*} + x_{\text{вн}*}) \cdot x_{\mu*}}{x_{II*} + x_{\text{вн}*} + x_{\mu*}}; x_{II*} = \frac{u_{\kappa} \%}{200},$$

где $x_{\text{вн}}$ – сопротивление НП элементов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора.

Если на вторичной обмотке нет заземленных элементов, то

$$(x_{\text{вн}} = \infty), \text{ то } x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}.$$

Если нейтраль трансформатора заземлена через сопротивление R_N , то оно учитывается в схеме замещения утроенным значением.

Пример решения:

При поочередном к. з. в точке «К» (рис. 3) определить токи двухфазного, однофазного и двухфазного к. з. на землю для момента времени $t = 0$.

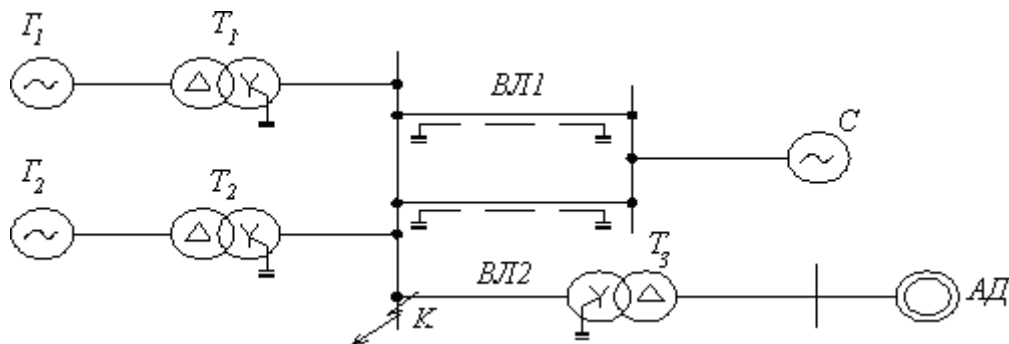


Рис. 3

Исходные данные:

- Г1, Г2: $S_n = 35 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_n = 10,5 \text{ кВ}; x''_{d*} = 0,23;$
 Т1, Т2: $S_n = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 10,5/121 \text{ кВ}; u_{\kappa} = 10,5 \%;$
 Т3: $S_n = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 110/6,3 \text{ кВ}; u_{\kappa} = 10,5 \%;$
 ВЛ1: $\ell = 70 \text{ км}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ двухцепная со стальным тросом};$
 ВЛ2: $\ell = 25 \text{ км}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ одноцепная без троса};$
 АД: $P_n = 3,2 \text{ МВт}; U_n = 6 \text{ кВ}; \eta = 0,94; \cos \varphi = 0,9; K_n = 4,2;$
 С: $x_{c(1)} = x_{c(2)} = 20 \text{ Ом}; x_{c(0)} = 60 \text{ Ом}.$

Расчет проводим в относительных базисных единицах при приближенном приведении.

Намечаем ступени напряжения и устанавливаем базисные единицы:

$$S_{\delta} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{\delta I} = 10,5 \text{ кВ}; U_{\delta II} = 115 \text{ кВ}; U_{\delta III} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$I_{\delta II} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta II}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

Схема замещения ПП, рис. 4:

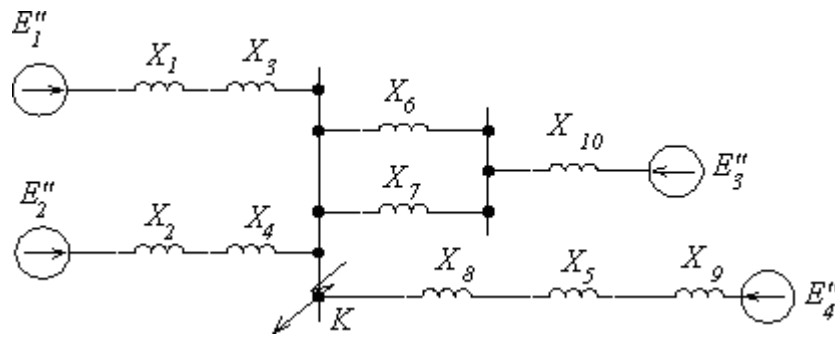


Рис. 4

Сопротивление элементов схемы ПП:

$$\Gamma 1; \Gamma 2: \quad x_{1*}(\delta) = x_{2*}(\delta) = x'_d \frac{S_\delta}{S_H} = 0,23 \frac{100}{35} = 0,66.$$

При дальнейших расчетах знак $*(\delta)$ опускаем.

$$T1; T2: \quad x_3 = x_4 = \frac{u_k \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$T3: \quad x_5 = \frac{u_k \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{6,3} = 1,67;$$

$$ВЛ1: \quad x_6 = x_7 = x_{y\delta} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21;$$

$$ВЛ2: \quad x_8 = x_{y\delta} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 25 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075;$$

$$АД: \quad x_9 = \frac{1}{K_n} \frac{S_\delta \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} = \frac{1}{4,2} \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 0,94}{3,2} = 6,3;$$

$$С: \quad x_{10} = x_{c(1)} \cdot \frac{S_\delta}{U_{\delta II}^2} = 20 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15.$$

Эдс генерирующих ветвей:

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad E'_1 = E'_2 = U_{(o)*} + I_{(o)*} \cdot x'_d \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 + 1 \cdot 0,23 \cdot 0,6 = 1,14;$$

$$С: \quad E''_3 = 1,0;$$

$$АД: \quad E'_4 = U_{(o)*} - I_{(o)*} \cdot x'_{A'D} \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 - 1 \cdot \frac{1}{4,2} \cdot 0,435 = 0,9.$$

Преобразуем схему к радиальному виду, выделив три генерирующих ветви (рис. 5): систему, генераторы станции, АД.

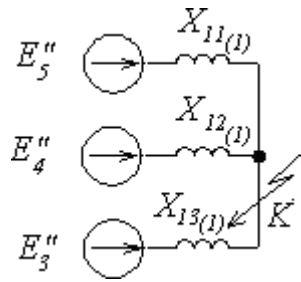


Рис. 5

$$E_5' = \frac{E_1' \cdot (x_1 + x_3) + E_2' \cdot (x_2 + x_4)}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4} = \frac{1,14(0,66 + 0,26) + 1,14(0,66 + 0,26)}{0,66 + 0,26 + 0,66 + 0,26} = 1,14;$$

$$x_{11} = \frac{(x_1 + x_3)(x_2 + x_4)}{x_1 + x_3 + x_2 + x_4} = \frac{(0,66 + 0,26)(0,66 + 0,26)}{0,66 \cdot 2 + 0,26 \cdot 2} = 0,46;$$

$$x_{12} = x_8 + x_5 + x_9 = 0,075 + 1,67 + 6,3 = 8,05;$$

$$x_{13} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + x_{10} = \frac{0,21 \cdot 0,21}{0,21 + 0,21} + 0,15 = 0,255.$$

Коэффициенты распределения генерирующих ветвей:

$$\Gamma_1, \Gamma_2: \quad C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{11}} = \frac{0,161}{0,46} = 0,35;$$

$$\text{АД:} \quad C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{12}} = \frac{0,161}{8,05} = 0,018;$$

$$\text{С:} \quad C_{III} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{13}} = \frac{0,161}{0,255} = 0,631;$$

$$x_{\text{экв}} = x_{11} // x_{12} // x_{13} = \frac{x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}}{x_{11} \cdot x_{12} + x_{11} \cdot x_{13} + x_{12} \cdot x_{13}} =$$

$$= \frac{0,46 \cdot 8,05 \cdot 0,255}{0,46 \cdot 8,05 + 0,46 \cdot 0,255 + 8,05 \cdot 0,255} = 0,161.$$

Схема замещения ОП (рис. 6):

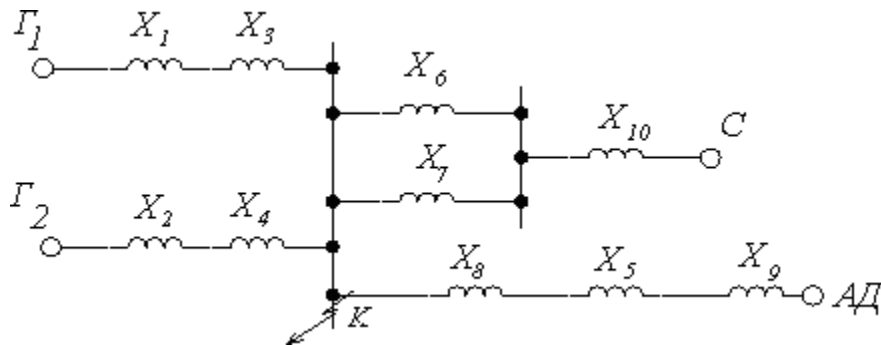


Рис. 6

Сопротивления элементов схемы ОП такие же, как в схеме ПП, кроме генераторов. Для генераторов имеем:

$$x_{1(2)} = x_{2(2)} = 1,45 \cdot x_{1(1)} = 1,45 \cdot 0,66 = 0,96.$$

Преобразуем схему (рис. 7) и определим сопротивления генерирующих ветвей для ОП:

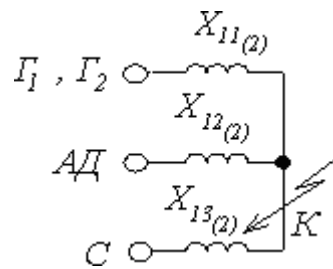


Рис. 7

$$x_{11(2)} = (x_{1(2)} + x_3) // (x_{2(2)} + x_4) = 0,61; x_{12(2)} = x_{12(1)} = 8,05; x_{13(2)} = x_{13(1)} = 0,255.$$

Результирующее сопротивление ОП:

$$x_{2\Sigma} = x_{11(2)} // x_{12(2)} // x_{13(2)} = 0,176.$$

Схема замещения НП (рис. 8):

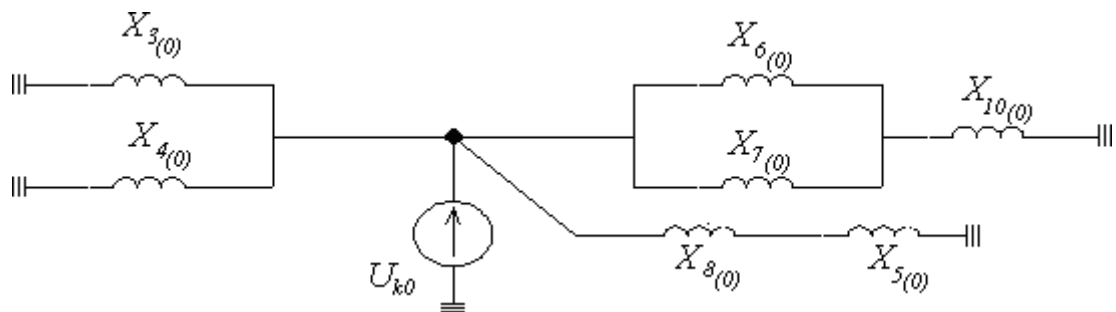


Рис. 8

Сопротивления элементов схемы:

$$\text{T1, T2: } x_{3(o)} = x_{4(o)} = x_{3(1)} = 0,26;$$

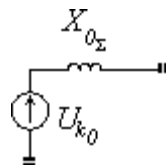
$$\text{T3: } x_{5(o)} = x_{5(1)} = 1,67;$$

$$\text{ВЛ1: } x_{6(o)} = x_{7(o)} = 4,7 \cdot x_{6(1)} = 4,7 \cdot 0,21 = 1,0;$$

$$\text{ВЛ2: } x_{8(o)} = 3,5 \cdot x_{8(1)} = 3,5 \cdot 0,075 = 0,263;$$

$$\text{С: } x_{10(o)} = x_{c(o)} \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,45.$$

Преобразуем схему (рис. 9) и определим результирующее (суммарное) сопротивление схемы относительно точки к. з.:



$$\begin{aligned}
 x_{o\Sigma} &= (x_3 // x_4) // (x_8 + x_5) // \\
 & // [(x_6 // x_7) + x_{10}] = \\
 &= \left(\frac{0,26 \cdot 0,26}{0,26 + 0,26} \right) // (0,263 + 1,67) // \\
 & // \left[\frac{1 \cdot 1}{1 + 1} + 0,45 \right] = 1,08.
 \end{aligned}$$

Рис. 9

Распределим результирующее сопротивление по генерирующим ветвям.

$$\Gamma_1, \Gamma_2: \quad x_{11(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_I} = \frac{1,08}{0,35} = 3,08;$$

$$\text{АД:} \quad x_{12(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{II}} = \frac{1,08}{0,018} = 60;$$

$$\text{С:} \quad x_{13(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{III}} = \frac{1,08}{0,631} = 1,71.$$

Расчет однофазного к. з. в точке «К».

Комплексная схема для определения токов ПП, рис. 10:

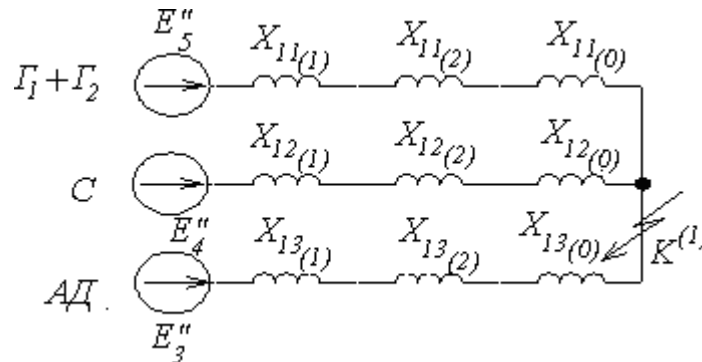


Рис. 10

Токи прямой последовательности генерирующих ветвей:

$$I_{11(1)}^{(1)} = \frac{E_5'}{x_{11(1)} + x_{11(2)} + x_{11(o)}} = \frac{1,14}{0,46 + 0,61 + 3,08} = 0,275;$$

$$I_{12(1)}^{(1)} = \frac{E_4'}{x_{12(1)} + x_{12(2)} + x_{12(o)}} = \frac{0,9}{8,05 + 8,05 + 60} = 0,0118;$$

$$I_{13(1)}^{(1)} = \frac{E_3'}{x_{13(1)} + x_{13(2)} + x_{13(o)}} = \frac{1}{0,255 + 0,255 + 1,71} = 0,45.$$

Полный ток однофазного к. з.:

$$I_{\kappa}^{(1)} = m^{(1)} \cdot \left(I_{11(1)}^{(1)} + I_{12(1)}^{(1)} + I_{13(1)}^{(1)} \right) \cdot I_{\text{бл}} = \sqrt{3} (0,275 + 0,0118 + 0,45) \cdot 0,5 = 1,1 \text{ кА}.$$

Задание для самостоятельного решения:

Найти ток однофазного короткого замыкания в схеме, приведенной на рис. 11. Дано: S_G , МВА; S_T , МВА; l , км; $x''_d = 0,15$; $x_2 = 0,18$; $E = 1,12$; $u_k = 10,5\%$; $x_{01} = 0,4$ Ом/км; $x_{00} = 4x_{01}$

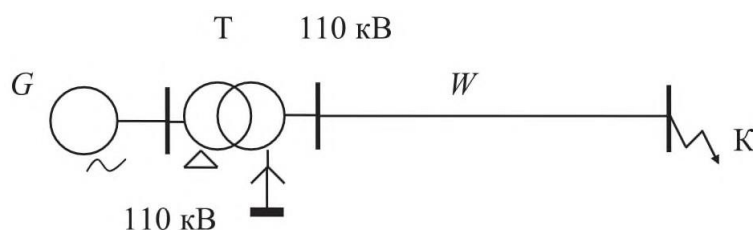


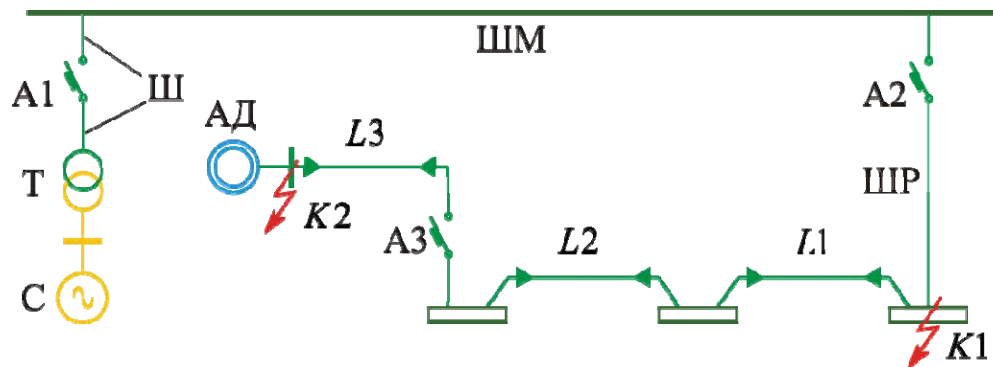
Рис. 11

Вариант	S_G	S_T	l
1	40	65	45
2	41	66	45,2
3	42	67	45,4
4	43	68	45,6
5	44	69	45,8
6	45	70	46
7	46	71	46,2
8	47	72	46,4
9	48	73	46,6
10	49	74	46,8
11	50	75	47
12	51	76	47,2
13	52	77	47,4
14	53	78	47,6
15	54	79	47,8
16	55	80	48
17	56	81	48,2
18	57	82	48,4
19	58	83	48,6
20	59	84	48,8
21	60	85	49
22	61	86	49,2

Вариант	S_G	S_T	l
23	62	87	49,4
24	63	88	49,6
25	64	89	49,8
26	65	90	50
27	66	91	50,2
28	67	92	50,4
29	68	93	50,6
30	69	94	50,8
31	70	95	51
32	71	96	51,2
33	72	97	51,4
34	73	98	51,6
35	74	99	51,8
36	75	100	52
37	76	101	52,2
38	77	102	52,4
39	78	103	52,6
40	79	104	52,8
41	80	105	53
42	81	106	53,2
43	82	107	53,4
44	83	108	53,6
45	84	109	53,8
46	85	110	54
47	86	111	54,2
48	87	112	54,4
49	88	113	54,6
50	89	114	54,8

Расчет токов короткого замыкания в сети ниже 1 кВ

Для схемы, представленной на рисунке определить наибольшие и наименьшие значения токов при коротких замыканиях поочередно в точках $K1$ и $K2$.



Исходные данные

Трансформатор Т: 1000 кВА, 10/0,4 кВ, $Y/Y_0 - 12$.

Шины Ш: 3,5 м, А-2(80/8), расстояние между фазами – 200 мм.

Шинопровод магистральный ШМ: 50 м, $I_{ном} = 1600$ А.

Шинопровод распределительный ШР: 4 м, $I_{ном} = 600$ А.

Кабели: $L1 = 10$ м, А(3 / 50 + 1 / 25); $L2 = 8$ м, А(3 / 35 + 1 / 16);

$L3 = 11$ м, А(3 / 16 + 1 / 10); все кабели с алюминиевой оболочкой. Автоматы:

А1 – 1500 А; А2 – 600 А; А3 – 50 А.

Решение. Используя справочный материал прил., табл. ПЗ, П4, П6, находим сопротивления элементов заданной схемы:

- для трансформатора Т

$$r_1 = 1,7 \text{ мОм}, \quad x_1 = 8,6 \text{ мОм}, \quad r_0 = 0,9 \text{ мОм}, \quad x_0 = 80 \text{ мОм};$$

- для шины Ш

$$r_1 = 3,5 \cdot 0,034 = 0,12 \text{ мОм};$$

$$x_1 = 3,5 \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{1,26 \cdot 200}{0,23(80 + 24)} = 0,51 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 10 \cdot 0,12 = 1,2 \text{ мОм}, \quad x_0 = 8,5 \cdot 0,51 = 44 \text{ мОм};$$

- для шинпровода ШМ

$$r_1 = 50 \cdot 0,034 = 1,7 \text{ мОм}, \quad x_1 = 50 \cdot 0,023 = 1,15 \text{ мОм};$$

- для нулевой последовательности примем:

$$r_0 \approx 10 \cdot r_1 = 17 \text{ мОм}; \quad x_0 \approx 10 \cdot x_1 = 11,5 \text{ мОм};$$

- для шинпровода ШР

$$r_1 = 4 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ мОм}, \quad x_1 = 4 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ мОм};$$

- для нулевой последовательности, аналогично предыдущему, имеем

$$r_0 = x_0 = 4 \text{ мОм};$$

- для кабелей

$$\text{L1: } r_1 = 10 \cdot 0,77 = 7,7 \text{ мОм}, \quad x_1 = 10 \cdot 0,068 = 0,68 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ мОм}, \quad x_0 = 10 \cdot 0,19 = 1,9 \text{ мОм};$$

$$\text{L2: } r_1 = 8 \cdot 1,1 = 8,8 \text{ мОм}, \quad x_1 = 8 \cdot 0,065 = 0,52 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 8 \cdot 1,8 = 14,4 \text{ мОм}, \quad x_0 = 8 \cdot 0,23 = 1,84 \text{ мОм};$$

$$\text{L3: } r_1 = 11 \cdot 2,4 = 26,4 \text{ мОм}, \quad x_1 = 11 \cdot 0,084 = 0,92 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 11 \cdot 3,5 = 38,5 \text{ мОм}, \quad x_0 = 11 \cdot 0,33 = 3,63 \text{ мОм};$$

- для автоматов

$$A1: r = x = 0;$$

$$A2: r = 0,12 \text{ мОм}, x = 0,09 \text{ мОм};$$

$$A3: r = 5,5 \text{ мОм}, x = 2,7 \text{ мОм}.$$

При коротком замыкании в точке K1 примем сопротивление контактных соединений $r = 20 \text{ мОм}$. Следовательно, результирующие сопротивления схемы прямой (обратной) и нулевой последовательностей относительно точки K1 будут:

$$r_{1\Lambda} = 1,7 + 0,12 + 1,7 + 0,4 + 0,12 + 20 = 24 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Lambda} = 8,6 + 0,51 + 1,15 + 0,4 + 0,09 = 10,75 \text{ мОм};$$

$$r_{0\Lambda} = 0,9 + 1,2 + 17 + 4 + 0,12 + 20 = 43,22 \text{ мОм};$$

$$x_{0\Lambda} = 80 + 4,4 + 11,5 + 4 + 0,09 = 100 \text{ мОм}.$$

Ток при трехфазном коротком замыкании составит

$$I_K^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{24^2 + 10,75^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 26,5} = 8,7 \text{ кА}$$

и при однофазном коротком замыкании

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 - 24 + 43,22)^2 + (2 - 10,75 + 100)^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{152} = 4,55 \text{ кА}.$$

Без учета переходных сопротивлений контактных соединений эти токи существенно больше: $I_K^{(3)} = 20 \text{ кА}$ и $I_K^{(1)} = 5,5 \text{ кА}$.

При $x/r = 10,75/24 = 0,45$ ударный коэффициент $K_y \gtrsim 1$ и, следовательно, ударный ток

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 8,7 = 12,3 \text{ кА}.$$

При КЗ в точке K2 принимаем для контактных соединений $r = 30 \text{ мОм}$, что дает такие результирующие сопротивления схемы:

$$r_{1\Lambda} = 24 + 7,7 + 8,8 + 26,4 + (30 - 20) + 5,5 = 82,4 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Lambda} = 10,75 + 0,68 + 0,52 + 0,92 + 2,7 = 15,57 \text{ мОм};$$

$$r_{0\Lambda} = 43,22 + 14 + 14,4 + 38,5 + (30 - 20) + 5,5 = 125,5 \text{ мОм};$$

$$x_{0\Lambda} = 100 + 1,9 + 1,84 + 3,63 + 2,7 = 110 \text{ мОм}.$$

Находим значения токов:
для трехфазного короткого замыкания

$$I_K^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{82,4^2 + 15,57^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 83,8} = 2,75 \text{ кА}$$

и однофазного короткого замыкания

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 - 82,4 + 125,5)^2 + (2 - 15,57 + 110)^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{324} = 2,14 \text{ кА}.$$

Без учета сопротивлений контактных соединений эти токи соответственно были бы следующие:

$$I_K^{(3)} = 4,05 \text{ кА} \text{ и } I_K^{(1)} = 2,8 \text{ кА}.$$

Приложение

Справочные данные по расчету токов КЗ в установках до 1000 В

Таблица 1

Ориентировочные значения сопротивлений первичных обмоток катушечных трансформаторов тока напряжением ниже 1 кВ

Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Значение сопротивлений, мОм, для трансформатора тока класса точности			
	x	r	x	r
	1		2	
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	13
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05

Таблица 2

Электрическое сопротивление первичных обмоток трансформаторов тока типа ТКФ, мкОм

$I_{\text{ном}}, \text{А}$	ТКФ-1		ТКФ-3	
	r	x	r	x
7,5	$300 \cdot 10^3$	$480 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$
10	$170 \cdot 10^3$	$270 \cdot 10^3$	$75 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$
15	$75 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$	$33 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$
20	$42 \cdot 10^3$	$67 \cdot 10^3$	$19 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^3$
30	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	8200	8000
40	$11 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^3$	4800	4200
50	7000	$11 \cdot 10^3$	3000	2800
75	3000	4800	1300	1200
100	1700	2700	750	700
150	750	1200	330	300
200	420	670	190	170
300	200	300	80	80
400	110	170	50	40

Таблица 3

Сопротивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением 0,4 кВ

Номинальная мощность, кВа	Схема соединения обмоток	U_K , %	Значения сопротивлений, мОм							
			прямой последовательности			нулевой последовательности		току однофазного КЗ		
			r_{1T}	x_{1T}	z_{1T}	r_{0T}	x_{0T}	r_T^1	x_T^1	z_T^1
25	Y/Y ₀	4,5	154	244	287	1650	1930	1968	2418	3110
25	Y/Z ₀	4,7	177	243	302	73	35,4	—	—	—
40	Y/Y ₀	4,5	88	157	180	952	1269	1128	1583	1944
40	Y/Z ₀	4,7	100	159	18	44	13,4	—	—	—
63	Y/Y ₀	4,5	52	102	114	504	873	608	1077	1237
63	Y/Z ₀	4,7	59	105	119	28	12	—	—	—
100	Y/Y ₀	4,5	31,5	65	72	254	582	317	712	779
100	Y/Z ₀	4,7	36,3	65,7	75	15,6	10,6	—	—	—
160	Y/Y ₀	4,5	16,6	41,7	45	151	367	184	450	486
160	Л/Y ₀	4,5	16,6	41,7	45	16,6	41,7	49,8	125	135
250	Y/Y ₀	4,5	9,4	27,7	28,7	96,5	235	115	298	311
250	Л/Y ₀	4,5	9,4	27,2	28,7	9,4	27,2	28,2	81,6	86,3
400	Y/Y ₀	4,5	5,5	17,1	18	55,6	149	66,6	183	195
400	Л/Y ₀	4,5	5,9	17	18	5,9	17	17,7	51	54
630	Y/Y ₀	5,5	3,1	13,6	14	30,2	95,8	36,4	123	128
630	Л/Y ₀	5,5	3,4	13,5	14	3,4	13,5	10,2	40,5	42
1000	Y/Y ₀	5,5	1,7	8,6	8,8	19,6	60,6	2,3	77,8	81
1000	Л/Y ₀	5,5	1,9	8,6	8,8	1,9	8,6	5,7	25,8	26,4
1600	Y/Y ₀	5,5	1	5,4	5,5	16,3	50	18,3	60,8	63,5
1600	Л/Y ₀	5,5	1,1	5,4	5,5	1,1	5,4	3,3	16,2	16,5
2550	Л/Y ₀	5,5	0,64	3,46	3,52	0,64	3,46	1,92	10,38	10,56

Таблица 4

Значения сопротивлений кабелей до 1 кВ

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление при 20 °С жилы, мОм/м		Индуктивное сопротивление, мОм/м	
	алюминиевой	медной	кабеля с поясной бумажной изоляцией	трех проводов в трубе, кабеля с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией
1	—	18,5	—	0,133
1,5	—	12,3	—	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,256	0,612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	0,1	0,0596	0,078
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Таблица 5

Значение сопротивлений автоматических выключателей

$I_{ном}$, А	R_a , мОм	x_a , мОм	$I_{ном}$, А	R_a , мОм	x_a , мОм
50	7	4,5	600	0,41	0,13
70	3,5	2	1000	0,25	0,1
100	2,15	1,2	1600	0,14	0,08
140	1,3	0,7	2500	0,13	0,07
200	1,1	0,5	4000	0,1	0,05
400	0,65	0,17	—	—	—

Таблица 6

Значения сопротивлений комплектных шинопроводов, мОм

Параметры	ШМА68П		ШМА73		ШМА4		
Номинальный ток, А	2500	4000	1600	1250	1600	2500	3200
Сопротивление на фазу R_w	0,02	0,013	0,031	0,034	0,03	0,017	0,015
Сопротивление на фазу x_w	0,02	0,015	0,022	0,016	0,014	0,008	0,07
Номинальный ток, А	1600	250	400	630	250	400	630
Сопротивление на фазу R_w	0,014	0,21	0,15	0,1	0,21	0,15	0,1
Сопротивление на фазу x_w	0,006	0,221	0,17	0,13	0,21	0,17	0,13

Таблица 7

**Приближенные значения активных сопротивлений
разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ**

Номинальный ток аппарата, А	Активное сопротивление, мОм	
	рубильника	разъединителя
50	—	—
70	—	—
100	0,5	—
150	—	—
200	0,4	—
400	0,2	0,2
600	0,15	0,15
1000	0,08	0,08
2000	—	0,03
3000	—	0,02

Определение параметров элементов электрических систем при отсутствии трансформаторных связей

Для отдельных элементов электроэнергетических систем составить схемы замещения и определить их параметры в относительных единицах при базисных условиях.

Типы элементов:

Синхронный генератор *T-6-2УЗ*.

Синхронный компенсатор *КС-10-6УЗ*.

Асинхронный двигатель *АТД-630 (4А3М-630)*.

Синхронный двигатель *СТД-630*.

Система – с номинальным напряжением *115 кВ* и мощностью короткого замыкания на шинах системы *630 МВА*.

Обобщенная нагрузка – с номинальным напряжением *6,3 кВ* и номинальной мощностью *150 МВА*.

Линия электропередачи – воздушная ЛЭП номинальным напряжением *35 кВ*, длиной *120 км*, выполнена проводом *АС-70*.

Одинарный реактор *РБ 10-400-0.45*.

Сдвоенный реактор *РБСД10-2×1000-0.35*.

Двухобмоточный трансформатор *ТМ-6300/10*.

Трехобмоточный трансформатор *ТДТН-16000/150*.

Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения *ТРДН-25000/110*.

Автотрансформатор *АТДЦТН-125000/220/110*.

Решение

Сначала выберем базисные условия:

$$S_{\bar{o}} = 100 \text{ МВА}; \quad U_{\bar{o}i} = U_{\text{ном}i},$$

где $S_{\bar{o}}$ – базисная полная мощность;

$U_{\bar{o}i}$ – базисное напряжение i -ой ступени трансформации;

$U_{\text{ном}i}$ – среднее номинальное напряжение i -ой ступени трансформации.

При определении реактивных сопротивлений для перевода из относительных единиц при номинальных условиях в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$x_{*\bar{\delta}} = x_{*ном} \cdot \frac{S}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\bar{\delta}}} \right)^2,$$

где $x_{*\bar{\delta}}$ – реактивное сопротивление в относительных единицах при базисных условиях;

$x_{*ном}$ – реактивное сопротивление в относительных единицах при номинальных условиях;

$S_{ном}, U_{ном}$ – номинальные полная мощность и напряжение рассматриваемого элемента.

Для перевода из именованных единиц в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$x_{*\bar{\delta}} = x \cdot \frac{S_{\bar{\delta}}}{U_{\bar{\delta}}^2},$$

где x – реактивное сопротивление рассматриваемого элемента в именованных единицах.

Аналогичные выражения используются и при определении активных сопротивлений.

При определении э. д. с. для перевода из относительных единиц при номинальных условиях в относительные единицы при базисных условиях используется выражение:

$$E_{*\bar{\delta}} = E_{*ном} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\bar{\delta}}},$$

где $E_{*\bar{\delta}}$ – э. д. с. в относительных единицах при базисных условиях;

$E_{*ном}$ – э. д. с. в относительных единицах при номинальных условиях.

Теперь составим схемы замещения и определим их параметры в относительных единицах при базисных условиях.

1. Синхронный генератор

Используя справочники, найдем каталожные данные генератора Т-6-2УЗ:

$$\begin{aligned} S_{ном} &= 7,5 \text{ МВА}; & U_{ном} &= 6,3 \text{ кВ}; & \cos \varphi_{ном} &= 0,8; \\ x_d &= 1,651; & x_d' &= 0,1708; & x_d'' &= 0,1208, \end{aligned}$$

где $S_{ном}$ – номинальная полная мощность;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение;

$\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности;

x_d – реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_d' – переходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_d'' – сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

Схема замещения генератора будет иметь вид, показанный на рисунке 1, а параметры этой схемы определяются из выражений:

сверхпереходное сопротивление генератора при базисных условиях:

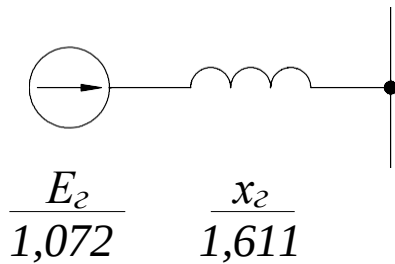


Рисунок 1

$$x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_{\delta}} \right)^2 =$$

$$= 0,1208 \cdot \frac{100}{7,5} \cdot \left(\frac{6,3}{6,3} \right)^2 = 1,611$$

Отметим, что множитель $\left(\frac{U_{ном}}{U_{\delta}} \right)^2$ при вы-

боре в качестве базисного среднего номинального напряжения каждой ступени трансформации принимает значение равное единице и поэтому в дальнейших расчетах может быть опущен. Величина сверхпереходной э. д. с. определится:

$$E_2 = (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{ном}) \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\delta}} = (1 + 0,1208 \cdot 0,6) \cdot \frac{6,3}{6,3} = 1,072.$$

И в этом выражении множитель $\frac{U_{ном}}{U_{\delta}}$ принимает значение равное единице, и поэтому в дальнейших расчетах может быть опущен.

2. Синхронный компенсатор

Используя справочники, найдем каталожные данные синхронного компенсатора КС-10-6У3:

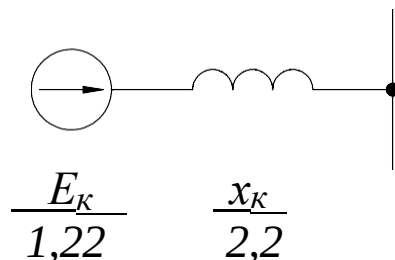


Рисунок 2

$$S_{ном} = 10 \text{ МВА}; \quad U_{ном} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$x_d = 1,85; \quad x_d' = 0,32; \quad x_d'' = 0,22.$$

Схема замещения компенсатора будет иметь вид, показанный на рисунке 2, а параметры этой схемы определяются из выражений:
сверхпереходное сопротивление компенсатора при базисных условиях:

$$x_{\kappa} = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = 0,22 \cdot \frac{100}{10} = 2,2.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. в относительных единицах при базисных условиях определится:

$$E_{\kappa} = 1 + x_d'' = 1 + 0,22 = 1,22.$$

3. Асинхронный двигатель

Каталожные данные асинхронного двигателя АТД-630 (4А3М-630):

$$P_{\text{ном}} = 630 \text{ кВт}; \quad U_{\text{ном}} = 6,3 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,88;$$

$$n_{\text{ном}} = 2979 \frac{\text{об}}{\text{мин}}; \quad k_n = 5,3; \quad S_{\text{ном}} = 0,7 \%,$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость вращения электродвигателя;

k_n – кратность пускового тока равная отношению пускового тока двигателя к номинальному: $k_n = \frac{J_n}{J_{\text{ном}}}$;

$S_{\text{ном}}$ – номинальное скольжение двигателя.

Схема замещения асинхронного двигателя будет иметь вид, показанный на рисунке 3. Определим полную мощность асинхронного двигателя:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{630}{0,88} = 716 \text{ кВА}.$$

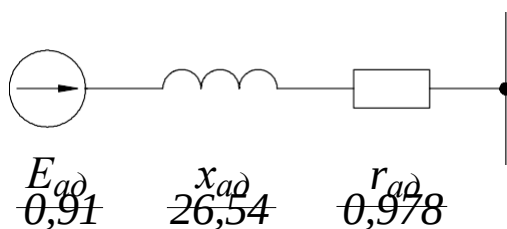


Рисунок 3

Значение реактивного сопротивления в относительных единицах при номинальных условиях определится:

$$x_{* \text{ ном}} = \frac{1}{k_n} = \frac{1}{5,3} = 0,19$$

и тогда найдем реактивное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_{a\partial} = x_{* \text{ ном}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = 0,19 \cdot \frac{100}{0,716} = 26,54.$$

Активное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при номинальных условиях:

$$r_{*ном} = S_{ном} = \frac{0,7}{100} = 0,007$$

и тогда активное сопротивление асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях:

$$r_{a\partial} = r_{*ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,007 \cdot \frac{100}{0,716} = 0,978.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. асинхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях определится:

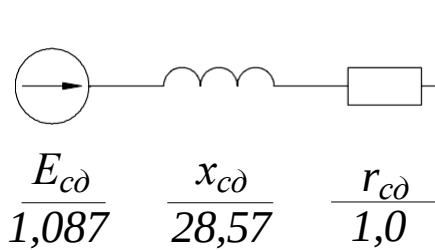
$$E_{a\partial} = 1 - x_{*ном} \cdot \sin \varphi_{ном} = 1 - 0,19 \cdot 0,475 = 0,91.$$

4. Синхронный двигатель

Каталожные данные синхронного двигателя *СТД-630*:

$$P_{ном} = 630 \text{ кВт}; \quad U_{ном} = 6,3 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{ном} = 0,9; \quad n_{ном} = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Схема замещения синхронного двигателя будет иметь вид, показанный на рисунке 4. Определим полную мощность синхронного двигателя:



$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном}} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ кВА}.$$

При отсутствии данных о сверхпереходном реактивном сопротивлении его значение принимается равным:

$$x_{*''ном} = 0,2.$$

Рисунок 4

Тогда реактивное сопротивление синхронного двигателя в относительных

единицах при базисных условиях:

$$x_{с\partial} = x_{*''ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,2 \cdot \frac{100}{0,7} = 28,57.$$

Активное сопротивление синхронного двигателя можно принять равным активному сопротивлению асинхронного двигателя ближайшему по мощности и приблизительно той же скорости. Для синхронного двигателя *СТД-630* таким асинхронным двигателем является *АТД-630 (4А3М-630)* с номинальным скольжением $S_{ном} = 0,007$, тогда

$$r_{с\partial} = S_{ном} \cdot \frac{S_{\partial}}{S_{ном}} = 0,007 \cdot \frac{100}{0,7} = 1,0.$$

Величина сверхпереходной э. д. с. синхронного двигателя в относительных единицах при базисных условиях определится:

$$E_{C\partial} = 1 + x_{*''\text{ном}} \cdot \sin \varphi_{\text{ном}} = 1 + 0,2 \cdot 0,436 = 1,087.$$

5. Система

Схема замещения системы будет иметь вид, показанный на рисунке 5.

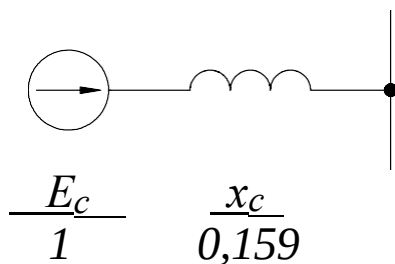


Рисунок 5

Для системы обычно задаются номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ и мощностью короткого замыкания на шинах системы $S_{\text{к}}$. Тогда реактивное сопротивление системы в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_C = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{к}}} = \frac{100}{630} = 0,159.$$

Величина э. д. с. системы в относительных единицах при базисных условиях определится:

лится:

$$E_C = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{б}}} = \frac{115}{115} = 1.$$

при отсутствии данных можно принять $x_C \approx 0$.

6. Обобщенная нагрузка

Схема замещения обобщенной нагрузки приведена на рисунке 6. Установлено, что в начальный момент переходного процесса обобщенную нагрузку можно приближенно характеризовать следующими величинами, выраженными в относительных единицах при номинальных условиях:

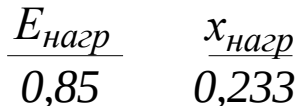


Рисунок 6

$$x_{\text{н}''\text{агр}} = 0,35,$$

$$E_{\text{н}''\text{агр}} = 0,85.$$

Тогда реактивное сопротивление обобщенной нагрузки в относительных единицах при базисных условиях определится:

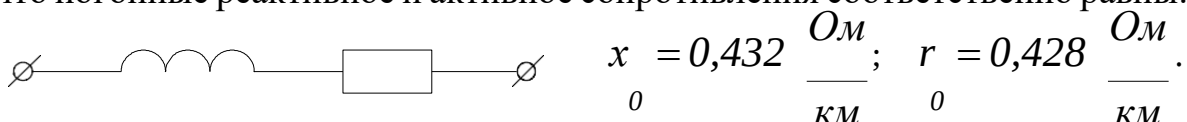
$$x_{\text{нагр}} = x_{\text{н}''\text{агр}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} = 0,35 \cdot \frac{100}{150} = 0,233,$$

а величина э. д. с., так как базисное напряжение равно номинальному, определится:

$$E_{\text{наг} p} = E''_{\text{наг} p} = 0,85.$$

7. Линия электропередачи

Схема замещения линии электропередач приведена на рисунке 7. Из справочников для воздушной ЛЭП, выполненной проводом АС-70, найдем, что погонные реактивное и активное сопротивления соответственно равны:



x_l	r_l
4,232	4,193

Сопротивления ЛЭП в именованных единицах находятся:

$$x = x_0 \cdot /; \quad r = r_0 \cdot /,$$

Рисунок 7

где l — длина линии электропередачи.

Тогда сопротивления ЛЭП в относительных единицах при базисных условиях можно определить:

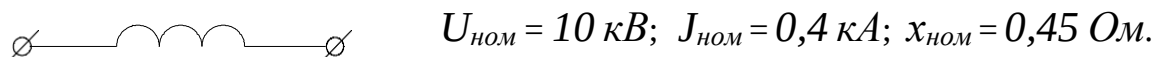
$$x_n = x_0 \cdot \frac{S_0}{U_0^2} = 0,432 \cdot 120 \cdot \frac{100}{35^2} = 4,232;$$

$$r_n = r_0 \cdot \frac{S_0}{U_0^2} = 0,428 \cdot 120 \cdot \frac{100}{35^2} = 4,193.$$

8. Одинарный реактор

Схема замещения одинарного реактора приведена на рисунке 8.

Из типа реактора *РБ 10-400-0.45* определяем его каталожные данные:



Тогда, так как базисное напряжение равно номинальному, определится сопротивление одинарного реактора в относительных единицах при базисных условиях:

$$\frac{x_p}{0,45}$$

$$x_p = x_{ном} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,45.$$

Рисунок 8

9. Сдвоенный реактор

Каталожные данные сдвоенного реактора РБСД10-2×1000-0.35:

$$U_{HOM} = 10 \text{ } \kappa B; \quad J_{HOM} = 960 \text{ } A; \quad x_g = 0,35 \text{ } OM; \quad k_p = 0,55,$$

где x_δ – номинальное сопротивление ветви реактора;

k_p – коэффициент связи.

Схема замещения сдвоенного реактора приведена на рисунке 9.

Сопротивления ветвей реактора в относительных единицах при базисных условиях находятся по формулам:

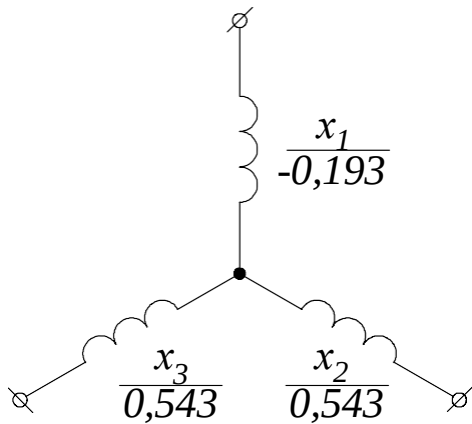


Рисунок 9

$$x_1 = -k_p \cdot x_\delta \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2} =$$

$$= -0,55 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{10^2} = -0,193;$$

$$x_2 = x_3 = (1 + k_p) \cdot x_\delta \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2} =$$

$$= (1 + 0,55) \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,543.$$

10. Двухобмоточный трансформатор

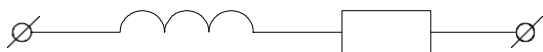
Используя справочники, найдем каталожные данные двухобмоточного трансформатора ТМ-6300/10:

$$S_{ном} = 6300 \text{ кВА}; \quad U_{ном} = 10 \text{ кВ}; \quad P_k = 46,5 \text{ кВт}; \quad u_k = 7,5 \%,$$

где P_k – потери в меди трансформатора;

u_k – напряжение короткого замыкания.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рисунке 10. Сопротивления трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях определяются по каталожным данным следующим образом:



$$\frac{x_m}{1,19} \quad \frac{r_m}{0,117}$$

Рисунок 10

$$r_{*ном} = \frac{P_k}{S_{ном}} = \frac{46,5}{6300} = 0,0074;$$

$$x_{*ном} = \frac{u_k}{100} = \frac{7,5}{100} = 0,075.$$

Тогда можем получить сопротивления трансформатора в относительных единицах при базисных условиях:

$$r_m = r_{*ном} \cdot \frac{S_\delta}{S_{ном}} = 0,0074 \cdot \frac{100}{6,3} = 0,117;$$

$$x_m = x_{*ном} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = 0,075 \cdot \frac{100}{6,3} = 1,19.$$

11. Трехобмоточный трансформатор

По справочнику найдем каталожные данные трехобмоточного трансформатора *ТДТН-16000/150*:

$$S_{ном} = 16 \text{ МВА}; U_{в ном} = 158 \text{ кВ}; U_{с ном} = 38,5 \text{ кВ}; U_{н ном} = 6,6 \text{ кВ};$$

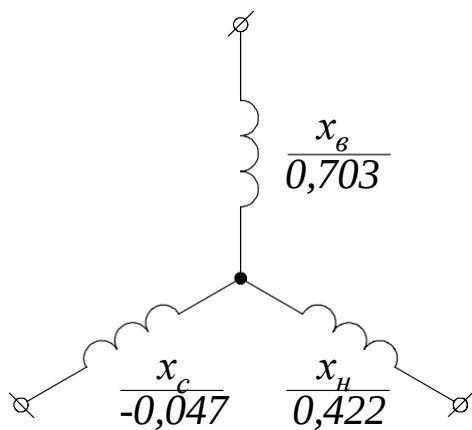
$$u_{к в с} = 10,5 \%; \quad u_{к в н} = 18 \%; \quad u_{к с н} = 6 \%,$$

где $U_{в ном}, U_{с ном}, U_{н ном}$ — соответственно высшее, среднее и низшее номинальные напряжения трансформатора;

$u_{к в с}, u_{к в н}, u_{к с н}$ — напряжение короткого замыкания между обмотками разного напряжения.

Обычно это мощные трансформаторы и активными сопротивлениями в них пренебрегают. Схема замещения трехобмоточного трансформатора приведена на рисунке 11.

Предварительно необходимо сделать пересчет напряжений короткого замыкания для обмоток различного напряжения:



$$u_{к в} = 0,5 \cdot (u_{к в с} + u_{к в н} - u_{к с н}) = 0,5 \cdot (10,5 + 18 - 6) = 11,25 \%;$$

$$u_{к с} = 0,5 \cdot (u_{к в с} + u_{к с н} - u_{к в н}) = 0,5 \cdot (10,5 + 6 - 18) = -0,75 \%;$$

$$u_{к н} = 0,5 \cdot (u_{к в н} + u_{к с н} - u_{к в с}) = 0,5 \cdot (18 + 6 - 10,5) = 6,75 \%.$$

Рисунок 11

Теперь можно определить сопротивления трехобмоточного трансформатора:

$$x_v = \frac{u_{к в}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{11,25}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,703;$$

$$x_c = \frac{u_{к с}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{-0,75}{100} \cdot \frac{100}{16} = -0,047;$$

$$x_n = \frac{u_{кн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,422.$$

12. Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения

Каталожные данные двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения *ТДТН-16000/150*:

$$S_{ном} = 25 \text{ МВА}; \quad U_{ном} = 115 \text{ кВ}; \quad u_{квн} = 10,5 \text{ \%}.$$

Обычно активными сопротивлениями для таких трансформаторов пренебрегают. Схема замещения двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения приведена на рисунке 12. Параметры этой схемы определяют следующим образом:

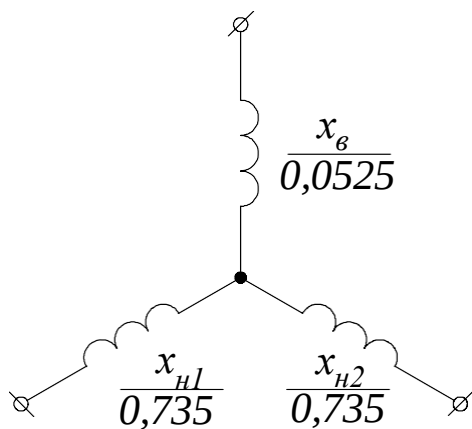


Рисунок 12

$$\begin{aligned} x_{\text{в}} &= 0,125 \cdot \frac{u_{квн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \\ &= 0,125 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,0525; \\ x_{н1} = x_{н2} &= 1,75 \cdot \frac{u_{квн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \\ &= 1,75 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,735. \end{aligned}$$

13. Автотрансформатор

По справочнику найдем каталожные данные автотрансформатора *АТ-ДЦТН-125000/220/110*:

$$\begin{aligned} S_{ном} &= 125 \text{ МВА}; \quad U_{\text{в ном}} = 230 \text{ кВ}; \quad U_{\text{с ном}} = 121 \text{ кВ}; \quad U_{\text{н ном}} = 6,6 \text{ кВ}; \\ u_{к\text{вс}} &= 11 \text{ \%}; \quad u'_{к\text{вн}} = 45 \text{ \%}; \quad u'_{к\text{сн}} = 28 \text{ \%,} \end{aligned}$$

где $u_{к\text{вс}}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и среднего напряжения;

$u'_{к\text{вн}}$, $u'_{к\text{сн}}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и низшего, и среднего и низшего напряжения отнесенные к типовой мощности S_m .

Активным сопротивлением автотрансформаторов пренебрегают. Схема замещения автотрансформатора приведена на рисунке 13.

Предварительно необходимо пересчитать $u'_{к вн}$ и $u'_{к сн}$ к номинальной мощности автотрансформатора.

Для этого сначала определим коэффициент выгоды:

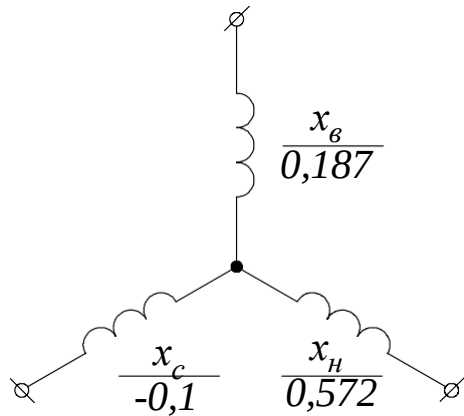


Рисунок 13

$$\alpha = \frac{U_{в ном} - U_{с ном}}{U_{в ном}} = \frac{230 - 121}{230} = 0,474.$$

Теперь найдем типовую мощность автотрансформатора:

$$S_m = \alpha \cdot S_{ном} = 0,474 \cdot 125 = 59,24 \text{ МВА}.$$

Определим напряжения короткого замыкания между обмотками высшего и низшего, и среднего и низшего напряжения отнесенные к номинальной мощности автотрансформатора:

$$u_{к вн} = u'_{к вн} \cdot \frac{S_{ном}}{S_m} = 45 \cdot \frac{125}{59,24} = 94,95 \%;$$

$$u_{к сн} = u'_{к сн} \cdot \frac{S_{ном}}{S_m} = 28 \cdot \frac{125}{59,24} = 59,08 \%.$$

Пересчитаем напряжения короткого замыкания для обмоток различного напряжения:

$$u_{к в} = 0,5 \cdot (u_{к вс} + u_{к вн} - u_{к сн}) = 0,5 \cdot (11 + 94,95 - 59,08) = 23,43 \%;$$

$$u_{к с} = 0,5 \cdot (u_{к вс} + u_{к сн} - u_{к вн}) = 0,5 \cdot (11 + 59,08 - 94,95) = -12,44 \%;$$

$$u_{к н} = 0,5 \cdot (u_{к вн} + u_{к сн} - u_{к вс}) = 0,5 \cdot (94,95 + 59,08 - 11) = 71,52 \%.$$

Теперь определим сопротивления трехобмоточного трансформатора:

$$x_{б} = \frac{u_{к в}}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{ном}} = \frac{23,43}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,187;$$

$$x_{с} = \frac{u_{к с}}{100} \cdot \frac{S_{с}}{S_{ном}} = \frac{-12,44}{100} \cdot \frac{100}{125} = -0,1;$$

$$x_{н} = \frac{u_{к н}}{100} \cdot \frac{S_{н}}{S_{ном}} = \frac{71,52}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,572.$$

Задание для самостоятельного решения

Цепь состоит из последовательно соединенных реактора с x_{LR} при I_{LRh} и $U_{LRh} = 6$ кВ и кабеля длиной l , удельные сопротивления которого $x_{0\text{ кл}}$ и $r_{0\text{ кл}}$.
 Определить активное, индуктивное и полное сопротивления цепи, выразив их: а) в именованных единицах; б) в относительных единицах при номинальных условиях реактора.

Вариант	$x_{LR}, \%$	I_{LRh}, A	$l, \text{км}$	$x_0, \text{Ом/км}$	$r_0, \text{Ом/км}$
1	2	120	1	0,064	0,123
2	2,5	125	1,05	0,065	0,124
3	3	130	1,1	0,066	0,125
4	3,5	135	1,15	0,067	0,126
5	4	140	1,2	0,068	0,127
6	4,5	145	1,25	0,069	0,128
7	5	150	1,3	0,07	0,129
8	5,5	155	1,35	0,071	0,13
9	6	160	1,4	0,072	0,131
10	2	165	1,45	0,073	0,132
11	2,5	170	1,5	0,074	0,133
12	3	175	1,55	0,075	0,134
13	3,5	180	1,6	0,076	0,135
14	4	185	1,65	0,077	0,136
15	4,5	190	1,7	0,078	0,137
16	5	195	1,75	0,079	0,138
17	5,5	200	1,8	0,08	0,139
18	6	205	1,85	0,081	0,14
19	2	210	1,9	0,082	0,141
20	2,5	215	1,95	0,083	0,142
21	3	220	2	0,084	0,143
22	3,5	225	2,05	0,085	0,144
23	4	230	2,1	0,086	0,145
24	4,5	235	2,15	0,087	0,146
25	5	240	2,2	0,088	0,147
26	5,5	245	2,25	0,089	0,148
27	6	250	2,3	0,09	0,149
28	2	255	2,35	0,091	0,15
29	2,5	260	2,4	0,092	0,151
30	3	265	2,45	0,093	0,152
31	3,5	270	2,5	0,094	0,153

Вариант	$\chi_{LR}, \%$	I_{LRh}, A	$l, \text{ км}$	$\chi_0, \text{ Ом/км}$	$r_0, \text{ Ом/км}$
32	4	275	2,55	0,095	0,154
33	4,5	280	2,6	0,096	0,155
34	5	285	2,65	0,097	0,156
35	5,5	290	2,7	0,098	0,157
36	6	295	2,75	0,099	0,158
37	2	300	2,8	0,1	0,159
38	2,5	305	2,85	0,101	0,16
39	3	310	2,9	0,102	0,161
40	3,5	315	2,95	0,103	0,162
41	4	320	3	0,104	0,163
42	4,5	325	3,05	0,105	0,164
43	5	330	3,1	0,106	0,165
44	5,5	335	3,15	0,107	0,166
45	6	340	3,2	0,108	0,167
46	2	345	3,25	0,109	0,168
47	2,5	350	3,3	0,11	0,169
48	3	355	3,35	0,111	0,17
49	3,5	360	3,4	0,112	0,171
50	4	365	3,45	0,113	0,172

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Электромагнитные переходные процессы

Методические указания по выполнению расчетно-графической работы

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) «Электроснабжение»

Квалификация выпускника бакалавр
Изучается в 6 семестре

Ставрополь 2026

Введение

Электромагнитные переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации, так и в аварийных условиях, например при: коротких замыканиях (КЗ). Изучение названных режимов необходимо, в первую очередь, для ясного представления причин возникновения и физической сущности этих процессов. Кроме того оценка электромагнитных процессов необходима для: разработки практических критериев и методов их количественной оценки; прогнозирования возникновения и предотвращения опасных последствий аварийных режимов. Наиболее распространенными причинами возникновения электромагнитных переходных являются КЗ, результаты расчетов которых составляют основополагающую часть проекта электроэнергетической системы [1-4]. Общий порядок и разделы приведенных расчетов соответствуют аналогичной структуре обобщенного проекта ЭЭС напряжением свыше 1 кВ .

Целью выполнения расчетно-графической работы (РГР) по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы» является овладение практическими методами расчетов симметричных и несимметричных КЗ в электроэнергетических системах.

Задачей выполнения расчетно-графической работы является получение теоретических знаний и практических навыков по основам и методам исследований электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах, вызванных короткими замыканиями.

Раздел 1. Организация самостоятельной работы студентов

1.1. Формы самостоятельной работы студентов

При подготовке расчетно-графической (самостоятельной) работы студенты должны использовать следующие формы самостоятельной работы

- в соответствии с полученным заданием формирование расчетной схемы и пакета исходных данных;
- проведение: аналитических расчетов;
- аналитические расчеты по пятому и шестому пунктам задания;
- оформление отчета и после получения допуска - защита расчетно-графической работы.

1.2. Содержание основных этапов подготовки расчетно-графической работы

Основные этапы подготовки РГР приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Содержание основных этапов подготовки РГР

Этапы(разделы задания) подготовки РГР	Наименование этапов (разделов в задании) подготовки РГР	Этапы, включаемые в РГР
1	Расчет начальной стадии электромагнитных процессов при ксз) _ Определение $i_{уд}$ $I_{уд}$.	+
2	Расчет начальной стадии электромагнитных процессов при несимметричном КЗ. Определение тока и напряжения в заданном сечении. Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке КЗ и заданном сечении.	+
3	Расчет периодической слагающей тока при ксз) ме-	

	тодом типовых кривых. Построение зависимости $I=f(t)$.	-
4	Расчет периодической слагающей тока при несимметричном КЗ методом типовых кривых. Построение зависимости $I=f(t)$.	-
5	Пояснительная записка. Защита.	+

1.3. Рекомендации по подготовке к защите самостоятельной работы.

После подготовки пояснительной записки к самостоятельной работе в соответствии с требованиями по оформлению и действующими стандартами университета студенту необходимо осуществить следующее:

- сдать пояснительную записку на проверку руководителю (проверка в течение недели со дня сдачи);

- после проверки пояснительной записки возможны следующие варианты:

1. РГР защищается, если она допущена к защите;

2. РГР работа защищается после исправления отмеченных в записке недостатков при допуске работы к защите;

3. Пояснительная записка предоставляется на повторную проверку до тех пор, пока не будут выполнены условия предыдущих пунктов (**1** либо **2**).

Раздел 2. Методические указания по структуре и содержанию самостоятельной работы.

2.1. Структурные элементы РГР.

В качестве структурных элементов РГР служат:

- введение: с обоснованием основных задач работы*;

- заданная схема сети, получаемая из избыточной (рисунок **1**) на основании варианта коммутаций (таблица 2), задаваемого студенту индивидуально*;
- исходные данные для заданной схемы сети, задаваемые студенту индивидуально по таблице 3*;
- аналитический расчет начального периодического и ударного токов для симметричного и несимметричного КЗ (пункты 1 и 2* задания);
- расчет периодической слагающей тока симметричного и несимметричного* КЗ в функции времени методом типовых кривых (пункты 3 и 4* задания);
- заключение по работе, в котором производится анализ полученных результатов*;
- список использованной литературы*;
- оформление пояснительной записки и прохождение процедуры защиты (пункт 5* задания).

2.2. Требования к содержанию РГР.

Содержание должно соответствовать структурным элементам и этапам подготовки РГР.

2.3. Оформление РГР.

При оформлении пояснительной записки должны быть соблюдены требования ЕСКД и СТП СКФУ.

Векторные диаграммы и расчетные зависимости должны быть вычерчены с указанием масштаба в именованных единицах. В содержание пояснительной записки обязательно должны быть включены следующие разделы:

1. Введение ;
2. Задание на РГР;
3. Основные этапы подготовки РГР;
4. Заключение.
5. Список использованной литературы.

Раздел 3. Варианты исходных данных и методика выполнения РГР.

1.1. Варианты РГР.

Варианты РГР включают в себя две цифры (выдаваемые руководителем индивидуально). Это варианты: коммутаций (рисунок 1 и таблица 2) и исходных данных (таблица 3).

Таблица 3 - Варианты коммутаций для выполнения РГР (по рисунку 1)

Варианты коммутации	Выключатели В, находящиеся во включенном состоянии	Номер КЗ для раздела 1 задания	Сечение	Вид КЗ для разделов 2,4 задания	Номер КЗ для раздела 3 задания	Номер КЗ для раздела 2, 4 задания	Номера замкнутых нейтралей Н
		11/Ъ	11/Ъ	2/4	11/Ъ	11/Ъ	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1-8, 10-13, 21, 23, 24, 27-30	K5/O,4	K13/-	1/2	K17/5	K5/O,2	4, 7, 12, 15
2	1-9, 14-18, 25, 26	K9/-	K10/-	1.1/1	K13/-	K1/-	1, 7, 9, 10, 13, 14
3	1-8, 10-13, 16, 21, 23, 24, 27, 30	K14/-	K13/-	1.1/1	K9/-	K5/O,3	2, 7, 11, 12, 15
4	3-14, 17-23	K17/O,7	K8/O,55	1/2	K10/-	K7/1,5	7-9, 13, 15
5	1, 2, 8-16, 23-27	K3/-	K12/-	1/1.1	K4/-	K5/2,5	1, 2, 8-10, 11, 15
6	3, 4, 7-15, 21, 23, 24, 27, 30	K15/-	K12/-	1.1/1	K13/-	K1/-	2, 3, 6, 7, 9, 15
7	1, 2, 10-20, 22-26	K2/-	K12/-	1.1/2	K17/2	K5/O,4	1, 10, 13-15
8	1, 2, 5, 6, 8-14, 17, 18, 21, 23, 24, 27-30	K5/O,5	K15/-	1/2	K17/O,7	K3/-	2, 3, 6, 8, 9, 12, 13, 15
9	3-9, 12-14, 16-20, 23, 24, 26	K10/-	K13/-	1.1/1	K6/1	K9/-	1, 7, 9, 11, 13, 15
10	7-14, 17-22, 24-26	K11/-	K13/-	1.1/1	K8/4	K17/1,7	8, 9, 12-15
11	1-6, 9-18, 20, 22, 24, 26	K8/O,3	K12/-	1.1/2	K8/O,3	K1/-	1, 9, 13, 15

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
12	1• 2• 8-14• 17-20• 22• 24• 27-30	K4/-	K10/-	1.1/1	K14/-	K2/-	2• 3• 6• 8• 9• 15
13	7-20• 24-26	K13/-	K16/-	1/1.1	K5/1,5	K9/-	1• 7-9• 11• 13-15
14	3-6• 9• 12-15• 17-19• 22-24• 27-30	K14/-	K12/-	1.1/1	K8/2,5	K4/-	2-6• 10• 13• 15
15	1-14• 19• 20• 22-24• 26	K4/-	K8/5	1/2	K10/-	K5/O,8	1• 7-9• 15
16	1-8; 10-13; 17-20; 22-24; 26	K6/O,25	K8/O,5	1/2	K9/-	K4/-	1• 7• 8• 13• 15
17	3-7• 9• 12-14• 17-24• 28• 29	K8/1,75	K15/-	1.1/2	K5/O,5	K9/-	4• 7• 9• 12• 15
18	1• 2• 7-14• 21• 23-28	K16/-	K15/-	1/1.1	K5/1,5	K4/-	2• 3• 6• 7• 9• 12• 15
19	1•, 2• 5• 6• 9•, 12-20•, 22•, 24•, 27•, 30	K9/-	K12/-	1.1/1	K8/3	K7/3	2• 9-11• 13• 15
20	1-4• 7-9• 14• 17-22• 24-26	K10/-	K8/O,6	1.1/2	K5/-	K6/1,4	1• 7• 9• 12-15
21	1• 2• 5• 6• 8• 9• 14• 17-22• 24• 25• 27• 30	K15/-	K10/-	1.1/1	K4/-	K2/-	2• 3• 6• 8• 9• 12-15
22	1-4• 7• 9• 14• 17-22• 24• 25• 27• 30	K1/-	K16/-	1.1/1	K8/O,7	K4/-	2• 3• 6• 7• 9• 12-15
23	1-4• 7-9• 14• 17-22• 24-26	K6/O,1	K13/-	1.1/2	K16/-	K5/1,3	1• 7• 9• 12-15
24	1• 2• 5-7• 9• 14• 17-22• 24• 27-30	K2/-	K8/O,4-	1/1.1	K10/-	K4/-	4-6• 9• 12• 13• 15
25	1-4• 7• 9• 14• 16-20• 22• 24• 26• 27• 30	K13/-	K11/-	1.1/1	K15/-	K5/1	2• 3• 6• 7• 9• 11• 13• 15
26	3-7• 9• 14• 15• 17-20• 22-24• 28• 29	K7/2,6	K10/-	1/1.1	K12/-	K4/-	4-7• 9• 10• 13• 15
27	1-6• 8• 9• 14• 16-20• 22• 24• 27• 30	K4/-	K14/-	1.1/1	K11/-	K9/-	2• 3• 8• 9• 11• 13• 15
28	3-6• 9• 14• 15• 17-20• 22-24• 27-30	K8/4	K14/-	1/1.1	K8/4	K9/-	4-6• 9• 10• 13• 15

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
29	1-7; 9; 14; 15; 17-20; 22; 24-26	K1 1/-	K12/-	1.1/1	K16/-	K6/4	1; 7; 9; 10; 13-15
30	1• 2; 10-13; 16-20; 22; 24-27; 30	K3/-	K15/-	1.1/1	K14/-	K17/2	1-3; 6; 11; 13; 15
31	1• 2; 10-13; 17-27; 30	K8/O,2	K16/-	1.1/2	K15/-	K1/-	1-3; 6; 12-15
32	3• 4; 7• 9-14; 17-22; 24• 26• 27• 30	K5/3	K1 1/-	1/2	K13/-	K3/-	1-3• 6• 7• 9• 12• 13• 15
33	1-7; 9; 12-14; 17-22; 24; 27; 30	K9/-	K13/-	1.1/2	K10/-	K1/-	2• 3• 6• 7• 9• 12• 13• 15
34	1; 2; 10-13; 15; 16; 23-30	K1 7/0,9	K12/-	1.1/1	K16/-	K5/2	1-3• 11• 14• 15
35	1• 2• 12• 13• 15• 16• 19• 20• 22• 24• 26-30	K14/-	K12/-	1/1.1	K10/-	K5/4	1• 4-6• 8• 10• 15
36	3-6; 10-13; 15-17; 23-27; 30	K2/-	K15/-	1/1.1	K16/-	K4/-	1-3; 6; 10; 11• 13; 15
37	3-8; 10-13; 17• 18• 21• 23• 24• 26• 27• 30	K13/-	K14/-	1.1/2	K10/-	K1 7/2,5	2• 3• 6• 7• 12• 15
38	3-14; 17-21• 23; 24; 26	K10/-	K13/-	1/1.1	K5/1.5	K9/-	1; 7; 9; 12; 13; 15
39	3-7; 9-14; 17-21; 23-26	K2/-	K16/-	1.1/1	K13/-	K9/-	7; 9; 12; 14; 15
40	5; 6; 9-20; 22; 24; 27; 30	K1/-	K14/-	1.1/2	K1 1/-	K4/-	2; 3; 6; 9; 10; 15
41	1-9; 14; 17; 18; 21• 24-27	K10/-	K15/-	1/1.1	K13/-	K7/2	1-3; 6; 7; 9; 13; 15
42	1-7; 9; 14-20; 25; 26	K13/-	K16/-	1/1.1	K10/-	K9/-	1; 7; 9; 10; 13; 14
43	3-6; 8-14; 19-23; 25; 26	K9/	K5/2	1.1/2	K16/-	K3/-	1; 8; 9; 12; 14; 15
44	5-7; 9; 14-16; 19-22; 24-26	K8/1,5	K12/-	1/1.1	K10/-	K7/0,4	7; 9; 10; 12; 14; 15
45	1-4; 9-15; 17-22; 24-26	K6/5	K12/-	1.1/1	K9/-	K4/-	1• 9; 10; 13-15

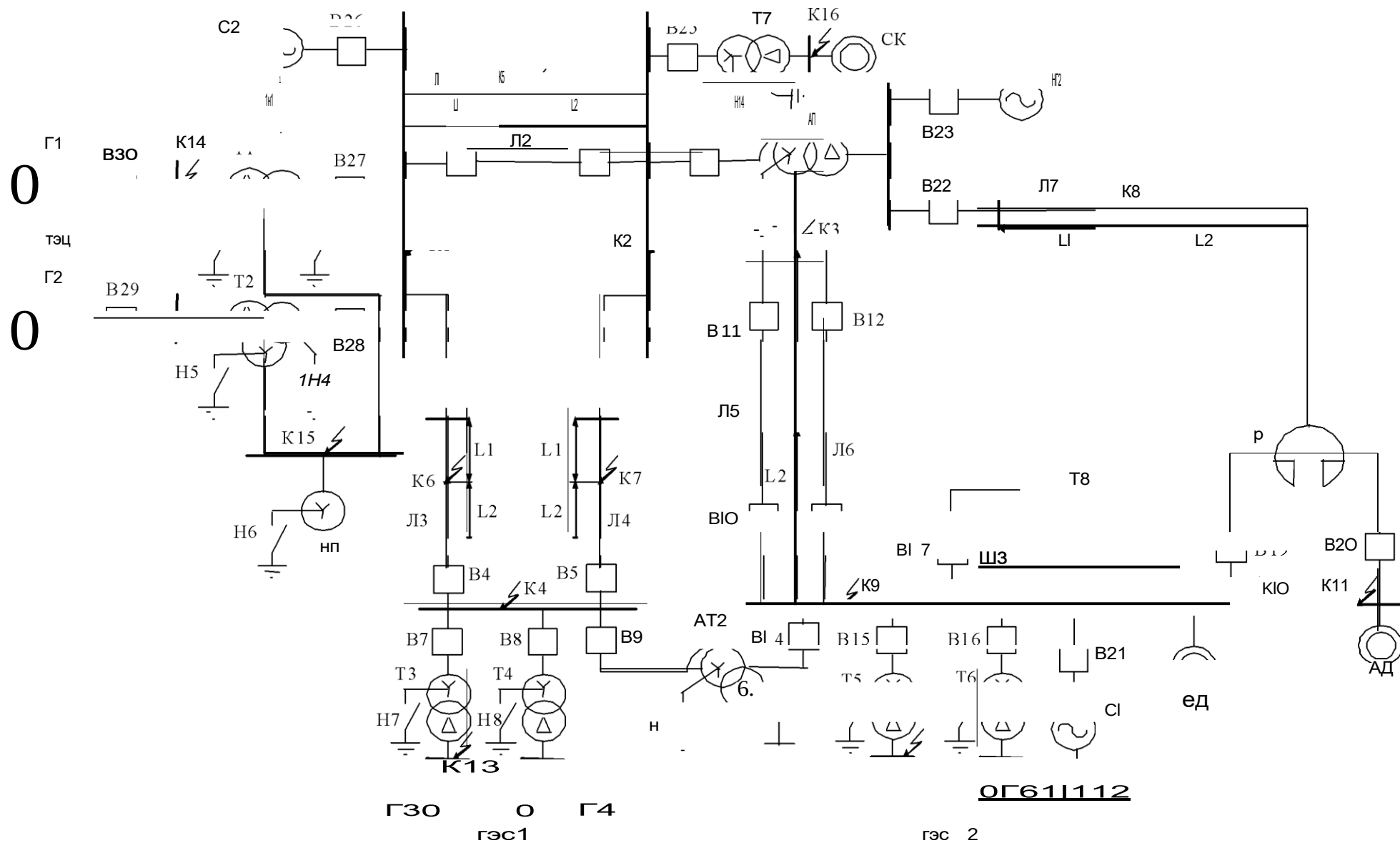


Рисунок 1- Расчетная схема сети для выбора варианта коммутации

Таблица 4-Варианты исходных данных(по рисунку 1): соответствуют номерам строк таблиц сверху вниз (1-3)

Генераторы										
Наименование	P _н , МВт	cosφ>	U _н , кВ	X'' _д , о.е.	X ₂ ,о.е.	T _а ,С	Предшествующий режим			Примечание
							U _о , о.е.	I _о , о.е.	cosφ>о	
Г1, Г2	220	0,85	15,75	0,191	0,232	0,311	1,0	0,9	0,82	Системы возбуждения: Г1,Г2-высокочастотная; Гз,Г4-тиристорная с само- возбуждением; Гs,Гб- диодная бесщеточная
	63	0,8	10,5	0,146	0,178	0,41	1,0	1,0	0,84	
	110	0,8	10,5	0,214	0,261	0,392	1,0	0,8	0,83	
Г3,Г4	40	0,8	10,5	0,16	0,2	0,142	0,9	0,98	0,8	
	36	0,8	10,5	0,19	0,25	0,145	0,96	1,0	0,79	
	80	0,89	13,8	0,2	0,24	0,246	1,01	0,87	0,88	
Г5,Г6	25	0,85	10,5	0,18	0,22	0,187	1,0	0,96	0,84	
	10	0,8	10,5	0,22	0,27	0,248	0,98	0,99	0,8	
	15	0,8	10,5	0,27	0,33	0,26	1,04	1,0	0,8	

Продолжение таблицы 4

Трансформаторы и автотрансформаторы										
Наименование	S _{нв} , МВА	S _{нс} , МВА	S _{нн} , МВА	U _{нв} , кВ	U _{нс} , кВ	U _{нн} , кВ	U ₁₋₂ , %	U ₂₋₃ , %	U ₁₋₃ , %	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Т1, Т2	250	250	100	230	121	15,75	11	12	17	
	80	80	40	230	121	11,0	12	12,8	19	
	125	125	63	230	121	10,5	11	18,18	31	
Т3, Т4	80		80	242		10,5	10,5			
	80		80	242		10,5	11			
	125		125	230		13,86	11			
Т5, Т6	40		40	121		10,5	11			
	25		25	121		10,5	10,5			
	32		32	121		10,5	10,4			
Т7	125		125	242		13,8	11			
	160		160	242		13,8	10,5			
	400		400	237		21	12			

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Т8	80		80	115		6,3/6,3	10,5	30		Трансформатор с рас- щепленной обмоткой, Красщ 4				
	63		63	115		6,3/6,3	10,5	30						
	125		125	115		10,5/10,5	11	30						
АТ1	125	125	63	230	121	6,3	11	47	26					
	200	200	80	230	121	6,3	10	31,5	20					
	250	250	100	230	121	11	11	32	20					
АТ2	125	125	63	230	121	11	11	45	28					
	63	63	32	230	121	6,3	11	28,8	12,6					
	200	200	80	230	121	10,5	11	32	20					
Синхронные и асинхронные двигатели. Синхронный компенсатор.														
Наимено- вание	P _н , МВт	Cosφ _н	U _н , кВ	X'' _д , о.е.	X ₂ , о.е.	T _а , с	I _п /I _н , о.е.	S _н , %	КПД, %	К	Предшествующий режим			Приме- чание
											U ₀ , .о.е.	I ₀ , о.е.	cosφ>0	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
АД	3,125	0,9	6				5,3	0,8	97,2	5	1,0	0,97	0,89	I _п /I _н - крат- ность пуска
	5,0	0,9	6				5,7	0,6	97,5	3	0,95	0,9	0,87	
	8,0	0,9	10				6,0	0,5	97,6	2	1,03	0,88	0,85	

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ед	1,25	0,86	6	0,88	0,89	0,036			95,3	5	1,0	0,97	0,89	вого то- ка;к- количе- ство
	1,6	0,87	6	0,77	0,78	0,05			95,9	3	0,95	0,9	0,87	
	2,5	0,9	10	0,36	0,37	0,042			94,7	2	1,03	0,88	0,85	
СК	60	0,8	11	0,23	0,26	0,145					1,1	1,0		двигате- лей;для АД X1=X2
	100	0,9	11	0,20	0,205	0,187					1,05	0,95		
	320	0,85	20	0,205	0,21	0,26					0,98	0,9		
Линии электропередач							Системы и нагрузки							
Наиме- нование	Un, кВ	Rγдl, Ом/ км	Худ 1, Ом/км	Худо/Худ	L,км		Наиме- нование	Sн, МВА	Un, кВ	Ео, о.е.	X1, о.е.	X2, о.е.	Хо, о.е.	
1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11	12	13	
Л1, Л2	220		0,42	5,5	200		Cl	1500		1,0	0,85	0,87	2,5*X1	
	220		0,41	4,7	110			2000		1,1	0,9	0,93	2,4*X1	
	220		0,43	3,0	150			1000		1,08	0,75	0,78	2,3*X1	

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ЛЗ	220		0,45	2,0	50	С2	8000		1,15	0,95	0,97	2,6*Х1
	220		0,4	3,0	45		5000		0,95	0,94	0,96	2,35*Х1
	220		0,44	3,5	39		6500		1,18	0,87	0,9	2,45*Х1
Л4	220		0,43	3,0	100	НГ1	200	110	0,85	0,35	0,45	2*Х1
	220		0,46	2,0	90		100	110	0,85	0,35	0,4	1,8*Х1
	220		0,41	3,5	120		150	110	0,85	0,35	0,45	1,5*Х1
Л5, Л6	110		0,42	4,7	80	НГ2	10	6	0,85	0,35	0,45	
	110		0,45	5,5	120		20	6	0,85	0,35	0,48	
	110		0,44	3,0	150		15	10	0,85	0,35	0,4	
Л7	6	0,129	0,07		2,6							
	6	0,206	0,074		4,3							
	10	0,167	0,077		6,2							
Реактор												
Наименование			Uн,кВ		Хр,%		КР		In,кА		Номинальные потери на фазу, кВт	
Р			6		12		0,5		2х3		22	
			6		14		0,46		2х2,5		29	
			10		8		0,56		2х1,8		32	

3.1. Пример типового расчета

Общие положения.

Методика примера расчетов КЗ соответствует действующим ГОСТ 27514-93 и РД 153-34.0-20.527-98: «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ», а также законам и правилам корректных преобразований электротехники. Успешность проведения расчетов КЗ в электроэнергетических системах в значительной степени зависит от знания систем относительных и именованных единиц, приведения параметров простейших моделей (схем замещения) элементов сети к точным и усредненным коэффициентам трансформации. Общая методика расчета, соответствующая большинству названных условий, приведена в: методических указаниях, посвященных выполнению РГР по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы»; ГОСТ 27514-93 и РД 153-34.0-20.527-98; рекомендованной литературе.

Пример расчета токов КЗ.

Далее приведен пример расчета токов КЗ в сетях выше 1 кВ для шести типовых задач, решаемых, в том числе, в РГР и на практических занятиях.

Исходные данные для примера расчета

Расчетная схема ЭЭС приведена на рисунке 2.

Генератор (Г): $P_H = 100 \text{ МВт}$; $\cos \varphi_p = 0,85$; $X_{1d} = 0,180 \text{ е.}$; $X_2 = 0,220 \text{ е.}$; $U_H = 10,5 \text{ кВ}$; $P_0/P_H = 0,8$. Параметры предшествующего режима: $U_{co} = 1,050 \text{ е.}$; $\cos \varphi_{co} = 0,9$; $I_{co} = 0,90 \text{ е.}$

Линии (Л-номер): Л-1: $X_{o1} = 0,43 \text{ Ом/км}$; $L = 120 \text{ км}$, $X_{oш} = X_{1ш} * 4,7$.

Л-2: $X_{o1} = 0,41 \text{ Ом/км}$; $L = 40 \text{ км}$, $X_{om} = X_{1m} * 5,5$.

Л-3: $X_{o1} = 0,4 \text{ Ом/км}$; $L = 70 \text{ км.}$, $X_{олз} = X_{шз} * 3,5$.

Трансформатор (Т): $S_{HН} = 125 \text{ МВА}$; $U_{HВ} = 254,1 \text{ кВ}$; $U_{HН} = 10,5 \text{ кВ}$; $U_K^{3/4} = 10,5\%$.

Автотрансформатор (АТ):

$$S_{HB} = 125\text{MBA}; S_{HH} = 63\text{MBA}; U_{HB} = 230\text{kB}; U_{HC} = 135,5\text{kB}; U_{KB-c} = 11\%;$$
$$U_{KB-H}=30\%; U_{KC-H}=19\%.$$

Нагрузка (НГ):

$$S_H = 100\text{MBA}; X_{\text{ШГ}} = 0,350.\text{e.}; X_{21-\text{rГ}} = 1,1 * X_{\text{ШГ}}; X_{\text{ОНГ}} = 2,5 * X_{\text{ШГ}}.$$

Системы бесконечной мощности (С-1 и С-2). Место КЗ- К.

Система 3 (С-3): $S_{K3}=5200\text{MBA}$; $X_{2c3}=1,2 * X_{1c3}$; $X_{oc3}=4 * X_{1c3}$.

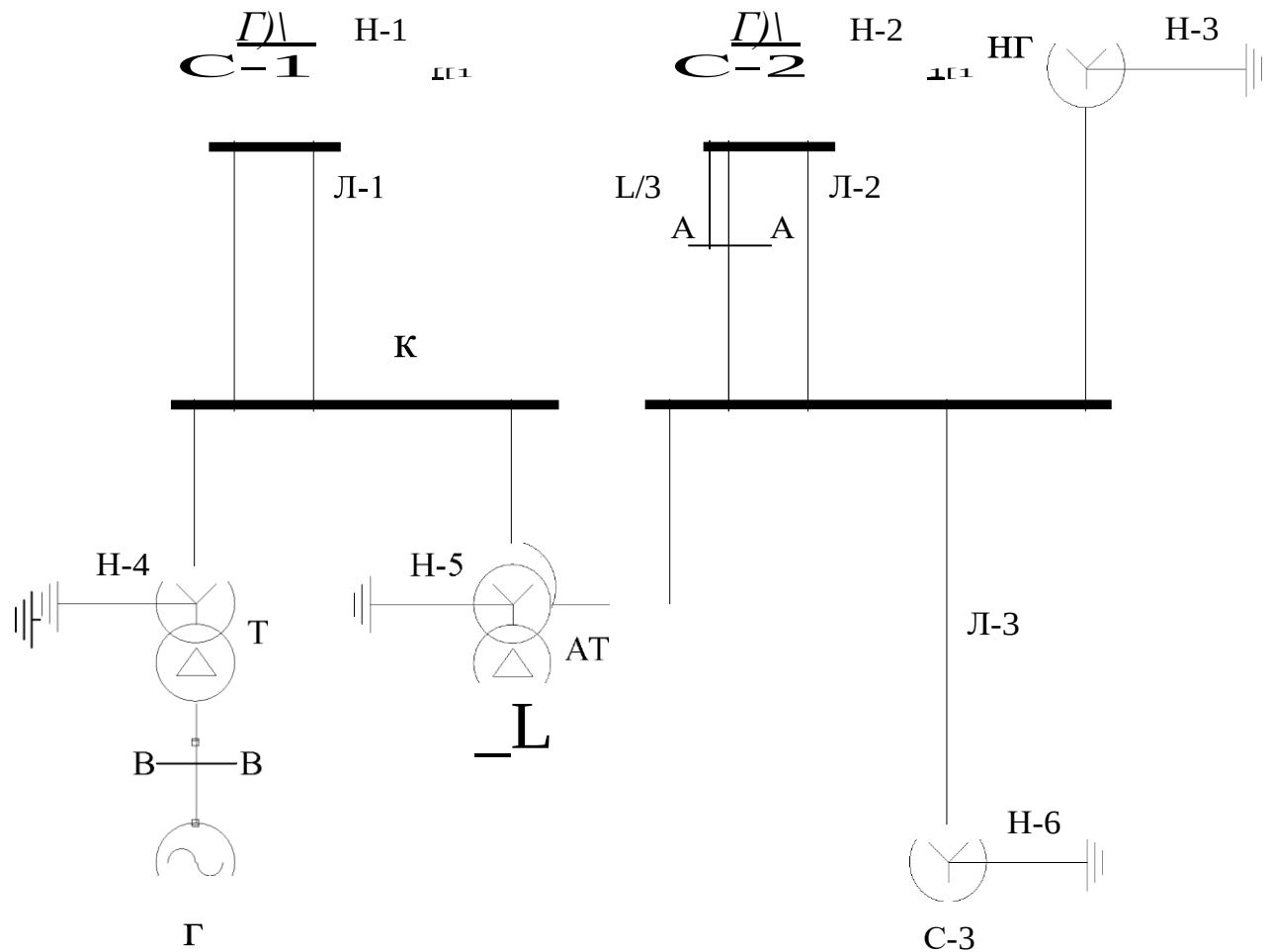


Рисунок 2 - Расчетная схема для типового расчета

Задача 1. Расчет составляющих токов трехфазного КЗ.

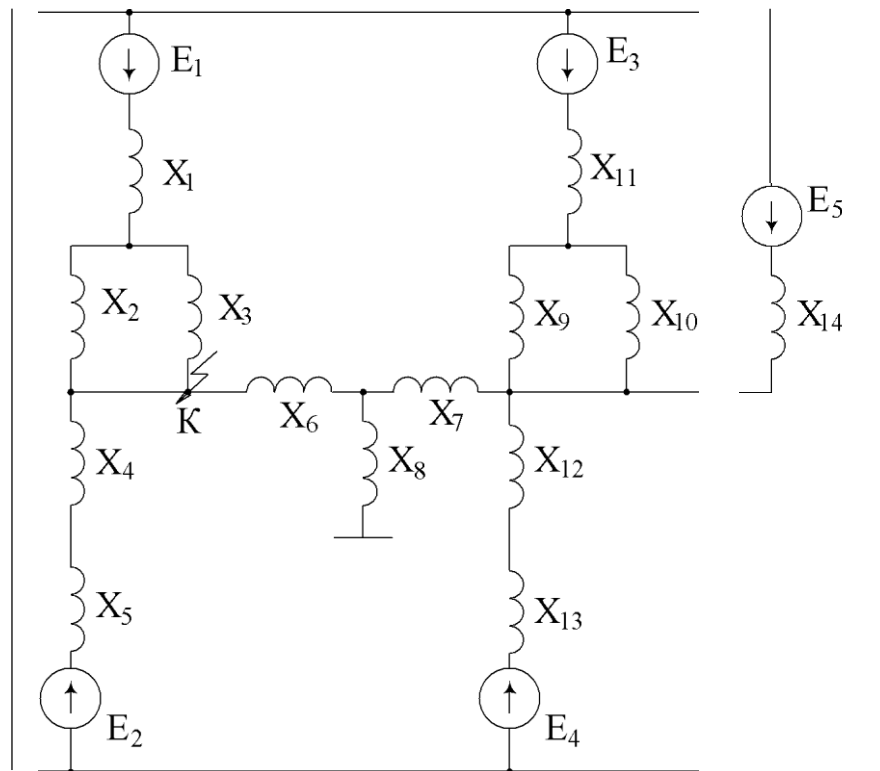
Составление и расчет элементов схем замещения прямой последовательности.

Расчет производится в системе относительных единиц. Все элементы

схем замещения приводятся к усредненным коэффициентам трансформации. В качестве базисных величин выбираются: $U_{сн} = U_B = 230$ кВ (среднее номинальное напряжение по шкале [5-8], соответствующее месту КЗ); $S_B = 1000$ МВА. Базисный ток для ступени напряжения, где происходит КЗ, равен:

$$I_6 = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,5102 \text{ кА}.$$

Схема замещения прямой последовательности приведена на рисунке 3.



Н

Рисунок 3-Исходная схема замещения

Определение параметров схемы замещения: Система С-1: $X_1=0$; $E_1=1$ о.е.

Система С-2: $X_{11}=0$; $E_3=1$ о.е.

Система С-3: $X_B = S_B / S_{K3} = 1000 / 5200 = 0,192308$ о.е; $E_4=1$ о.е.

Генератор Г: $X_s = X''_d \cdot (S_B / S_H) = X''_d \cdot (S_B \cdot \cos \varphi_H / P_H) = 0,18 \cdot (1000 \cdot 0,85 / 100) = 1,53$ о.е.

$$X_{\Sigma}^2 = \left(\frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14}}{2} \right)^2 + \left(\frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14}}{2} \right)^2 =$$

$$= (1,05 + 0,9 \cdot 0,18 \cdot 0,4359)^2 + (0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,18)^2 = 1,130 \text{ о.е.}$$

Нагрузка НГ: $X_{14} = X_{шп} * (S_B / S_H) = 0,35 * (1000 / 100) = 3,5 \text{ о.е.}; E_s = 0,85 \text{ о.е.}$

Трансформатор Т: $X_4 = (U_k \% / 100) * (S_B / S_H) = (10,5 / 100) * (1000 / 125) = 0,84 \text{ о.е.}$

Автотрансформатор АТ $X_6 = X_B = 1/2 * (U_{KB-с} + U_{KB-н} - U_{KC-н}) * (S_B / 100 S_H) = 0,880 \text{ о.е.}$

$X_I = X_C = 1/2 * (U_{KB-с} + U_{KC-н} - U_{KB-н}) * (S_B / 100 S_H) = 0.$

$X_S = X_H = 1/2 * (U_{KB-н} + U_{KC-н} - U_{KB-с}) * (S_B / 100 S_H) = 1,52 \text{ о.е.}$

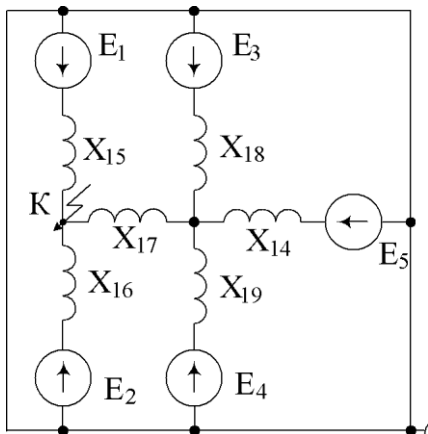
Линия Л-1: $X_2 = X_3 = X_0 * L * S_B / U_{сн}^2 = 0,43 * 120 * 1000 / 230^2 = 0,975425 \text{ о.е.}$

Линия Л-2: $X_9 = X_{10} = X_0 * L * S_B / U_{сн}^2 = 0,41 * 40 * 1000 / 115^2 = 1,240076 \text{ о.е.}$

Линия Л-3: $X_{12} = X_0 * L * S_B / U_{сн}^2 = 0,4 * 70 * 1000 / 115^2 = 2,117202 \text{ о.е.}$

Упрощение схемы замещения.

Упрощение схемы, изображенной на рисунке 3, производится в соответствии с известными преобразованиями [4,8 и др.]. Последовательность упрощений приведена на рисунках 4-7.



Н Рисунок 4-Упрощение схемы №1

$X_{1s} = X_1 + X_2 / 2 = 0 + 0,975425 / 2 = 0,4877 \text{ о.е.}$ $X_{16} = X_4 + X_s = 0,84 + 1,53 = 2,370 \text{ о.е.}$

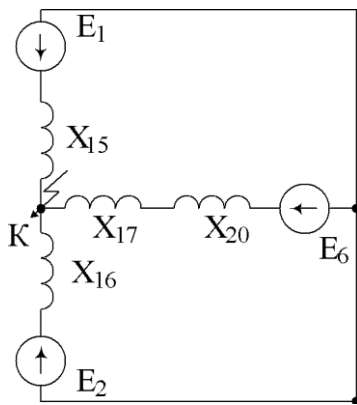
$X_{11} = X_6 + X_1 = 0,88 + 0 = 0,88 \text{ о.е.}$ $X_{1s} = X_{11} + X_9 / 2 = 0 + 1,240076 / 2 = 0,620038 \text{ о.е.}$

$X_{19} = X_{12} + X_B = 2,117202 + 0,192308 = 2,30951 \text{ о.е.}$

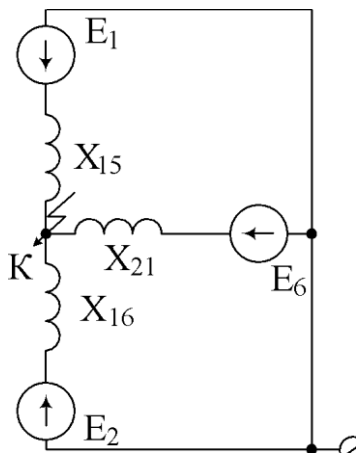
$X_{20} = 1 / (1/X_{1s} + 1/X_{14} + 1/X_{19}) = 1 / (1/0,62 + 1/3,5 + 1/2,30951) = 0,428906 \text{ о.е.}$

$E_6 = X_{20} * (E_3 / X_{1s} + E_s / X_{14} + E_4 / X_{19}) = 0,428906 * (1/0,620038 + 0,85/3,5 + 1/2,30951) = 0,98161 \text{ о.е.}$ $X_{21} = X_{11} + X_{20} = 0,88 + 0,428906 = 1,308906 \text{ о.е.}$

$X_{\Delta 1} = 1 / (1/X_{1s} + 1/X_{21} + 1/X_{16}) = 0,30899 \text{ о.е.}$ $E_{\Delta} = X_{\Delta} * (E_1 / X_{1s} + E_6 / X_{21} + E_2 / X_{16}) = 0,30899 (1/0,4877125 + 0,981617 / 1,308906 + 1,13 / 2,37) = 1,012609 \text{ о.е.}$



Н Рисунок 5-Упрощение схемы № 2



Н Рисунок 6-Упрощение схемы № 3

Н

Рисунок 7-Эквивалентная схема замещения ЭЭС

Расчет установившихся и ударных значений токов трехфазного КЗ.

Выделяются 3 характерные ветви [1,3,5,8]:

1 - обобщенная система, $K_u = 1,8$; 2 - система, связанная со сборными шинами, где рассматривается КЗ, воздушными линиями напряжением 220кВ, $K_u = 1,72$; 3 - блок, состоящий из турбогенератора и повышающего трансформатора, при мощности генератора 100 МВт, $K_u = 1,965$.

Определяется суммарный сверхпереходный ток КЗ:

$$I_{L1} = \frac{E_2}{X_{13}} J = \frac{1,01^2 \cdot 60^9}{0,30899} \cdot 2510 \approx 8226322 \text{ кА}.$$

Мгновенное и действующее значения ударного тока:

$$i_{yD} = m \cdot I_L \cdot I'' \cdot K_y,$$

$$I_{yD} = m \cdot I'' \cdot k;$$

где m - коэффициент, зависящий от вида КЗ; $k = \frac{I_L}{I_L + 2(K_y - 1)^2}$.

$$\text{Отсюда: } I''_1 = E_0 / X_{21} \cdot I_B = 0,981617 / 1,308906 \cdot 2,5102 = \underline{1,88253 \text{ кА}};$$

$$i_{yD1} = 2 \cdot 1,88253 \cdot 1,8 = 4,79214 \text{ кА}; I_{yD1} = 1,88253 \cdot \sqrt{1 + 2(1,8 - 1)^2} = 2,842558 \text{ кА};$$

$$I''_2 = E_1 / X_{1s} \cdot I_B = 1 / 0,4877125 \cdot 2,5102 = 5,14688 \text{ кА};$$

$$i_{yD2} = 2 \cdot \underline{5,14688 \cdot 1,72 = 12,519515 \text{ кА}};$$

$$I_{yD2} = 5,14688 \cdot \sqrt{1 + 2(1,72 - 1)^2} = 7,345447 \text{ кА};$$

$$I''_3 = E_2 / X_{16} \cdot I_B = 1,13 / 2,37 \cdot 2,5102 = 1,196846 \text{ кА};$$

$$i_{yD3} = 1,196846 \cdot \underline{2 \cdot 1,965 = 3,325952 \text{ кА}};$$

$$I_{yD3} = 1,196846 \cdot \sqrt{1 + 2(1,965 - 1)^2} = 2,024917 \text{ кА};$$

$$i_{y\text{ш.}} = i_{yD1} + i_{yD2} + i_{yD3} = 4,79214 + 12,519515 + 3,325952 = 20,637607 \text{ кА};$$

$$I_{y\text{ш.}} = I_{yD1} + I_{yD2} + I_{yD3} = 2,842558 + 7,345447 + 2,024917 = 12,212922 \text{ кА};$$

$$I''_L = E_0 / X_0 \cdot I_B = 1,012609 / 0,308992 \cdot 2,5102 = 8,22627 \text{ кА};$$

$$I''_L = \sum_{i=1}^3 I''_i = 1,882531 + 5,14688 + 1,196846 = 8,226256 \text{ кА};$$

$$I''_L = 8,226322 \text{ кА} \quad I''_L = 8,226256 \text{ кА}.$$

Задача 11. Расчет токов и напряжений при несимметричном КЗ.

В качестве примера производится расчет несимметричного двухфазного КЗ на землю: $kci.I$ в точке (К) (Рисунок 2).

Составление схем замещения обратной и нулевой последовательностей

Для расчета KC^{1-1}), помимо уже рассчитанных эквивалентных параметров, необходимо знать суммарные сопротивления обратной и нулевой последовательностей [1-5,8]. Составляется схема замещения обратной последовательности. Схема замещения обратной последовательности аналогична схеме замещения прямой последовательности. Началом схемы замещения обратной

последовательности является узел, объединяющий начало всех генераторных ветвей и нагрузочных ветвей, при этом ЭДС равны нулю, концом схемы является место КЗ (К). Эквивалентные параметры элементов схемы замещения обратной последовательности для трансформаторов и воздушных линий те же, что и в прямой последовательности. Изменяют свои значения сопротивления генераторов, систем и нагрузок. Исходя из изложенного, находятся недостающие параметры схемы замещения обратной последовательности, изображенной на рисунке 8. Последовательность упрощений приведена на рисунках 9-11. Генератор Г: $X_s = X_2 \cdot (S_B / S_H) = 0,22 \cdot ((1000 \cdot 0,85) / 100) = 1,87$ о.е.

Система С-3: $X_B = 1,2 \cdot X_{1с-3} = 1,2 \cdot 0,192308 = 0,23077$ о.е.

Нагрузка НГ: $X_{14} = 1,1 \cdot X_{шг} = 1,1 \cdot 3,5 = 3,85$ о.е.

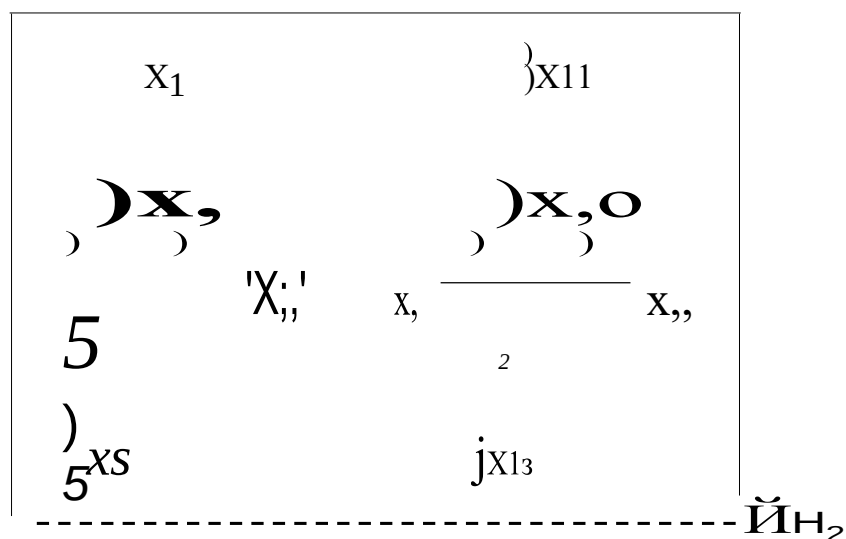


Рисунок 8- Схема замещения обратной последовательности

$X_{1s} = X_1 + X_2 / 2 = 0 + 0,975425 / 2 = 0,4877125$ о.е. $X_{16} = X_4 + X_s = 0,84 + 1,87 = 2,71$ о.е.

$X_{11} = X_6 + X_1 = 0,88$ о.е. $X_{1s} = X_{11} + X_9 / 2 = 0 + 1,240076 / 2 = 0,620038$ о.е.

$X_{19} = X_{12} + X_B = 2,117202 + 0,230770 = 2,347972$ о.е.

$X_{20} = X_{1s} \cdot X_{16} / (X_{1s} + X_{16}) = (0,4877125 \cdot 2,71) / (0,4877125 + 2,71) = 0,4133270$ о.е.

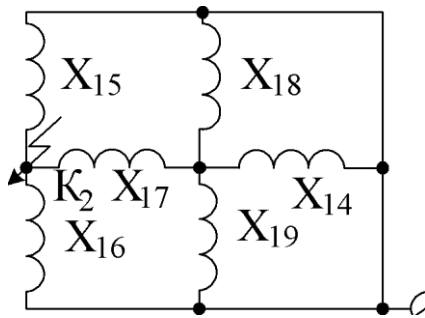


Рисунок 9 -Упрощение схемы замещения обратной последовательности №1

$$X_{21} = X_{11} + \frac{1}{\left(\frac{1}{X_{15}} + \frac{1}{X_{14}} + \frac{1}{X_{19}}\right)} = 0,88 + \frac{1}{\left(\frac{1}{0,620038} + \frac{1}{3,85} + \frac{1}{2,347972}\right)} = 1,3150.e$$

:(JH2

Рисунок 10-Упрощение схемы замещения обратной последовательности №2

$$X_{\Sigma 2} = (X_{20} * X_{21}) / (X_{20} + X_{21}) = (0,413327 * 1,315077) / (0,413327 + 1,315077) = 0,3144850.e.$$

H2

Рисунок 11-Эквивалентная схема замещения обратной последовательности

Для составления схемы замещения нулевой последовательности необходимо пересчитать сопротивления систем, нагрузок, линий, т.е. тех элементов, в которых имеются пути для токов нулевой последовательности. Такие пути образуются при заземлениях нейтралей трансформаторов, автотрансформаторов и т.п. Кроме того, необходимо учесть, что токи нулевой последова-

тельности могут циркулировать в обмотках трансформаторов и автотрансформаторов, соединенных в треугольник. Началом схемы замещения нулевой последовательности являются концы ветвей тех элементов, в которых имеются пути для токов нулевой последовательности. Более подробно вопросы составления схем замещения нулевой последовательности приведены в [1,3-5,8]. Таким образом, находятся недостающие параметры схемы замещения нулевой последовательности, изображенной на рисунке 12. Последовательность упрощений приведена на рисунках 13-16.

Система С-1: $X_1=0$

Система С-2: $X_{10}=0$

Система С-3: $X_{12}=4X_{1c-3}=4*0,192308=0,769232$ о.е.

Линия Л-1: $X_2=X_3=4,7*X_{ш-1}=4,7*0,975425=4,5844975$ о.е.

Линия Л-2: $X_s=X_9=5,5*X_{1m}=5,5*1,240076=6,820418$ о.е.

Линия Л-3: $X_{11}=3,5*X_{шз}=3,5*2,117202=7,410207$ о.е.

Нагрузка НГ: $X_B=2,5*X_{шг}=2,5*3,5=8,75$ о.е.

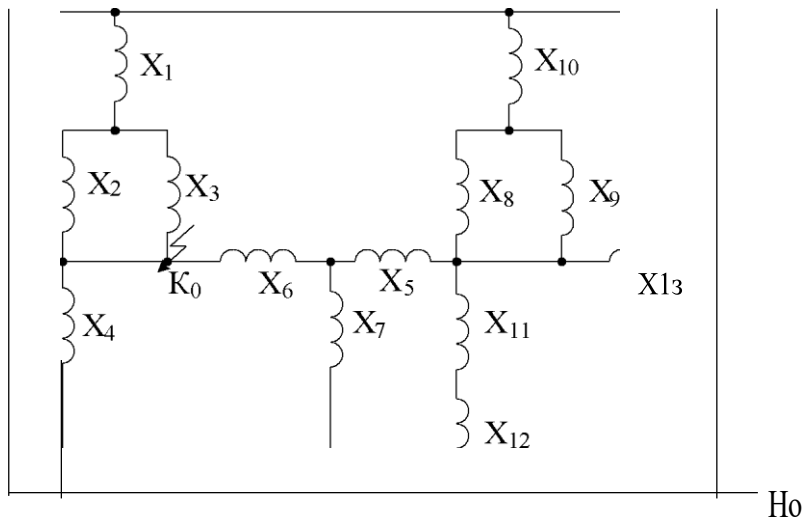


Рисунок 12- Схема замещения нулевой последовательности

$X_{14}=X_1+X_2/2=0+4,5844975/2=2,29224875$ о.е.

$X_{1s}=X_{10}+X_s/2=0+6,82/2= 3,41$ о.е. $X_{16}=X_{11}+X_{12}=7,41+0,769=8,179439$ о.е.

$X_{11}=(X_{14}*X_4) / (X_{14}+X_4)=(2,29*0,84) / (2,29224875+ 0,84)=0,6147305$ о.е.

$X_{1s}=X_s+ 1/(1/X_{1s}+1/X_B+ 1/X_{16})=0+ 1/(1/3,41+1/8,75+1/8,179)=1,888$ о.е.

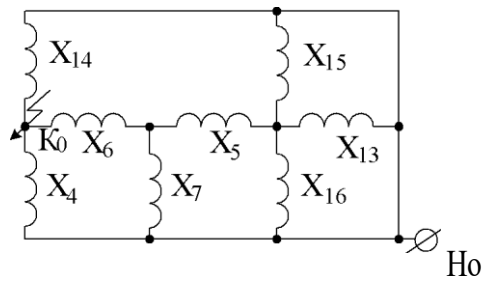


Рисунок 13-Упрощение схемы замещения нулевой последовательности №1

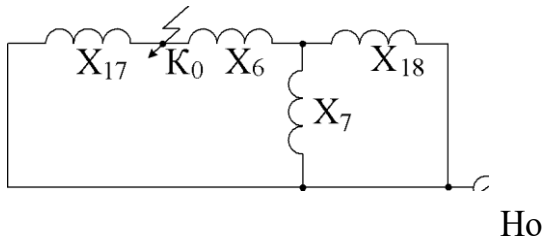


Рисунок 14-Упрощение схемы замещения нулевой последовательности №2

$$X_{19} = X_6 + (X_{18} * X_7) / (X_{18} + X_7) = 0,88 + (1,8876 * 3,016) / (1,8876 + 3,016) = 2,041 \text{ о.е.}$$

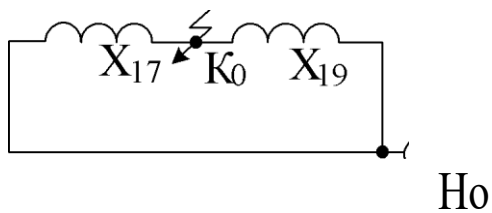


Рисунок 15-Упрощение схемы замещения нулевой последовательности №3

$$X_{\Sigma 0} = (X_{11} * X_{19}) / (X_{11} + X_{19}) = (0,6147 * 2,041) / (0,6147 + 2,041) = 0,4720 \text{ е.}$$

Hv

Рисунок 16-Эквивалентная схема замещения нулевой последовательности

Расчет токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте КЗ.

Определение токов прямой последовательности при К(1.1)–

$$I_{ka}^{(n)} = \frac{E_{\Delta K}}{j(X_{1\Delta K} + \Delta X^{(n)})};$$

где $\Delta X(\underline{n})$ – сопротивление шунта замещения, которое зависит от вида КЗ.

Для двухфазного КЗ на землю :

$$\Delta X(1.1) = \frac{X_{2\Delta K} X_{0\Delta K}}{X_{2\Delta K} + X_{0\Delta K}} = \frac{0,314485 * 0,472435}{0,314485 + 0,472435} = 0,188804 \text{ } \Omega$$

$$I_{кл1} = \frac{E'_{\Delta K}}{j(X_{\Delta K} + \Delta X)} = \frac{1,012609}{j(0,308992 + 0,188804)} = 2,034185 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ } e$$

В именованных единицах: $I_{кл1} =$

$$= I_{кл1} * I_B = 2,034185 \cdot e^{-j90^\circ} * 2,5102 = 5,106211 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ } kA.$$

Определение фазных токов и напряжений в К при К(1.1) [1-5,8]. Токи и напряжения вычисляются из граничных условий К (1.1). Граничные условия для двухфазного КЗ на землю фазы А, (о.е.):

$$I_{кл1} = 2,034185 \cdot e^{-j90^\circ}.$$

$$I_{кю} = -I_{кл1} * (\Delta X / X_{2\Delta K}) = -2,034185 * (0,188804 / 0,314485) \cdot e^{-j90^\circ} = 1,221242 \cdot e^{90^\circ}.$$

$$I_{кло} = -I_{кл1} * (\Delta X / X_{0\Delta K}) = -2,034185 * (0,188804 / 0,472435) \cdot e^{-j90^\circ} = 0,812942 \cdot e^{90^\circ}.$$

$$\text{Полный ток в фазе А: } I_{кл} = I_{кл1} + I_{кю} + I_{кло} = 2,034185 \cdot e^{-j90^\circ} + 1,221242 \cdot e^{90^\circ} + 0,812942 \cdot e^{90^\circ} = 0.$$

Симметричные составляющие других фаз, (о.е.)

$$\text{Фаза В: } I_{кв1} = I_{кл1} * e^{240^\circ} = 2,034185 \cdot e^{150^\circ}.$$

$$I_{кв2} = I_{кю} * e^{120^\circ} = 1,221242 \cdot e^{210^\circ}.$$

$$I_{кво} = I_{кло} * e^0 = 0,812942 \cdot e^{90^\circ}.$$

$$\text{Полный ток в фазе В: } I_{кв} = I_{кв1} + I_{кв2} + I_{кво} = 2,034185(-j3/2 + j0,5) + 1,221242(-3/2 - j0,5) + j0,812942 = -2,819282 + j1,219414 = 3,071697 \cdot e^{156,6^\circ}.$$

$$\text{Фаза С: } I_{кс1} = I_{кл1} * e^{120^\circ} = 2,034185 \cdot e^{30^\circ}.$$

$$I_{кс2} = I_{кю} * e^{240^\circ} = 1,221242 \cdot e^{330^\circ}.$$

$$I_{kco} = I_{кло} \cdot e^{j0} = 0,812942 \cdot e^{j90}.$$

Полный ток в фазе С: $I_{kc} = I_{kc1} + I_{kc2} + I_{kco} = 2,034185(3/2 + j0,5) + 1,221242(fj/2 - j0,5) + j0,812942 = 2,819282 + j1,219414 = 3,071697 \cdot e^{j23.4}.$

Симметричные составляющие напряжения фазы А.

$$!I_{кл1} = I_{кл1j} \quad L_X = 2,034185 \cdot e^{-j90} \cdot j \quad 0,188804 = 0,384062 \text{ о.е.}$$

$$!I_{кл2} = -I_{кл1j} \quad X_{2\pi} = -1,221242 \cdot e^{j90} \cdot j \quad 0,314485 = 0,384062 \text{ о.е.}$$

$$!I_{кло} = -I_{клоj} \quad X_{o\pi} = -0,812942 \cdot e^{j90} \cdot j \quad 0,472435 = 0,384062 \text{ о.е.}$$

Полное напряжение фазы А: $!I_{кл} = !I_{кл1} + !I_{кл2} + !I_{кло} = 1,152187 \text{ о.е.}$

Симметричные составляющие других фаз:

$$\text{Фаза В: } !I_{кв1} = !I_{кл1} \cdot e^{j240} = 0,384062 \cdot e^{j240}.$$

$$!I_{кв2} = !I_{кл2} \cdot e^{j120} = 0,384062 \cdot e^{j120}.$$

$$!I_{кво} = !I_{кло} \cdot e^{j0} = 0,384062 \cdot e^{j0}.$$

Полное напряжение фазы В: $!I_{кв} = !I_{кв1} + !I_{кв2} + !I_{кво} = 0.$

$$\text{Фаза С: } !I_{кc1} = !I_{кл1} \cdot e^{j120} = 0,384062 \cdot e^{j120}.$$

$$!I_{кc2} = !I_{кл2} \cdot e^{j240} = 0,384062 \cdot e^{j240}.$$

$$!I_{кco} = !I_{кло} \cdot e^{j0} = 0,384062 \cdot e^{j0}.$$

Полное напряжение фазы С: $!I_{kc} = !I_{кc1} + !I_{кc2} + !I_{кco} = 0.$

Расчет токов и напряжений в заданных выключателе и нейтрали.

Производится расчет токов и напряжений в сечениях А-А и В-В при К (1.1) в точке К (рисунок 2), имитирующий задачу нахождения токов и напряжений в заданных местах системы (выключателе и нейтрали). Определяются симметричные составляющие токов и напряжений в сечении В-В путем обратного разворачивания схем замещения от точки КЗ до сечения. Т.к. сечение находится за Л трансформатора, то токи нулевой последовательности будут отсутствовать. Рассматривается схема замещения прямой последовательности, для этого используются данные расчетов токов и напряжений в месте КЗ. С учетом граничных условий получается схема, изображенная на рисунок 17. К концу схемы приложено напряжение $!I_{кл1} C^{1-1}$, следовательно,

ток в ветви с ЭДС E_6 будет равен: $h_1 = (E_6 - !_{\text{кл}1}) / (jX_{21}) = (0,981617 - 0,384062) / (j 1,308906) = 0,45653 * e^{-j90^\circ}$.

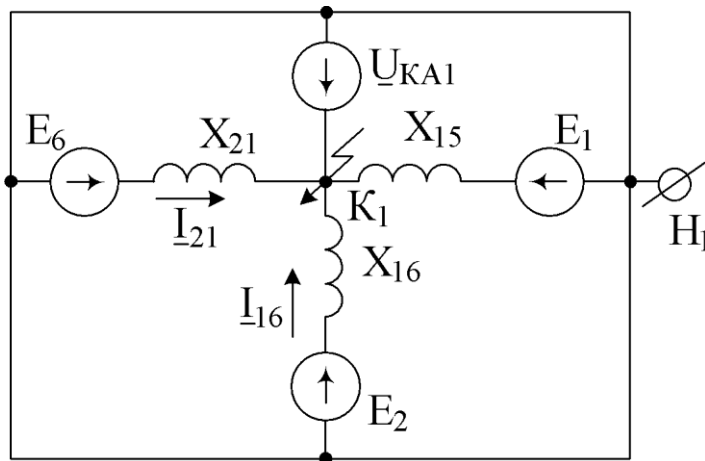


Рисунок 17-Расчетная схема замещения прямой последовательности

Находится падение напряжения в ветви с E_6 :

$!_{\text{л}1} = !_{\text{кл}1} + h_1 * j(X_6 + X_1) = 0,384062 + 0,45653 * e^{-j90^\circ} * j 0,88 = 0,785808$ о.е. Ток в

ветви с E_2 равен току в сечении В-В: $!_{16} = I_{\text{в-в}} = (f_u - !_{\text{кл}1}) / (jX_{16}) = (1,13 - 0,384062) / (j 2,37) = 0,314742 * e^{-j90^\circ}$ о.е. Развертывание схемы до сечения А-А и В-В (Рисунок 18): Находятся сопротивления в линии Л-2 с учетом сечения А-А: $X_{24} = 1/3 * X_9 = 1/3 * 1,240076 = 0,4133587$ о.е.

$X_{2s} = 2/3 * X_9 = 2/3 * 1,240076 = 0,826717$ о.е. Находится ток в сечении А-А (о.е.): $X_{11} = 0$, $!_{\text{л-А}} = (E_3 - !_{\text{л}}) / (j X_{10}) = (1 - 0,785808) / (j 1,240076) = 0,172725 * e^{-j90^\circ}$.

Находится напряжение прямой последовательности в сечении А-А и В-В:

$!_{\text{л-А}} = !_{\text{л}1} + !_{\text{л-А}} * j X_{2s} = 0,785808 + 0,172725 * e^{-j90^\circ} * j 0,826717 = 0,928603$ о.е.

$!_{\text{в-в}} = !_{\text{кл}1} + I_{\text{в-в}} * j X_4 = 0,384062 + 0,314742 * e^{-j90^\circ} * j 0,84 = 0,648445$ о.е.

Исходная схема замещения обратной последовательности изображена на рисунке 19. Первоначально находится ток I , текущий в ветви с сопротивлением X_{20} и X_{21} : $h_0 = (-U_{\text{КА}2}) / (jX_{20}) = -0,384062 / (j 0,413327) = 0,929196 * e^{90^\circ}$ о.е.; $h_1 = (-U_{\text{КА}2}) / (jX_{21}) = -0,384062 / (j 1,315077) = 0,292045 * e^{90^\circ}$ о.е.

Схема обратной последовательности преобразуется аналогично предыдущим расчетам. Последовательность развертывания проиллюстрирована на рисун-

ке 20: $I_B = I_{K10} - h_1 j (X_6 + X_1) = 0,384062 - 0,292045 \cdot e^{90^\circ} \cdot j(0 + 0,88) = 0,127062$

о.е. $I_M = -I_B / (j X_{10}) = -0,127062 / (j 1,240076) = 0,102463 \cdot e^{90^\circ}$.

$I_M = I_B + I_M j X_{2s} = 0,127062 + 0,102463 \cdot e^{90^\circ} \cdot j 0,826717 = 0,042354$ о.е.

$I_{BV} = -I_{K10} / j (X_4 + X_s) = -0,384062 / j(0,84 + 1,87) = 0,141720 \cdot e^{90^\circ}$.

$I_{BV} = I_{K10} + I_{BV} j = 0,384062 + j 0,141720 \cdot e^{90^\circ} \cdot j 0,84 = 0,265017$ о.е.

Нулевая последовательность. Исходная схема изображена на рисунке

21. Находится ток в ветви с сопротивлением X_{19} : $I_{19} = -I_{K10} / (j \cdot X_{19}) = -0,384062 / (j 2,040974) = 0,188176 \cdot e^{90^\circ}$.

Разворачивается схема (рисунок 22) и находится напряжение U_2 .

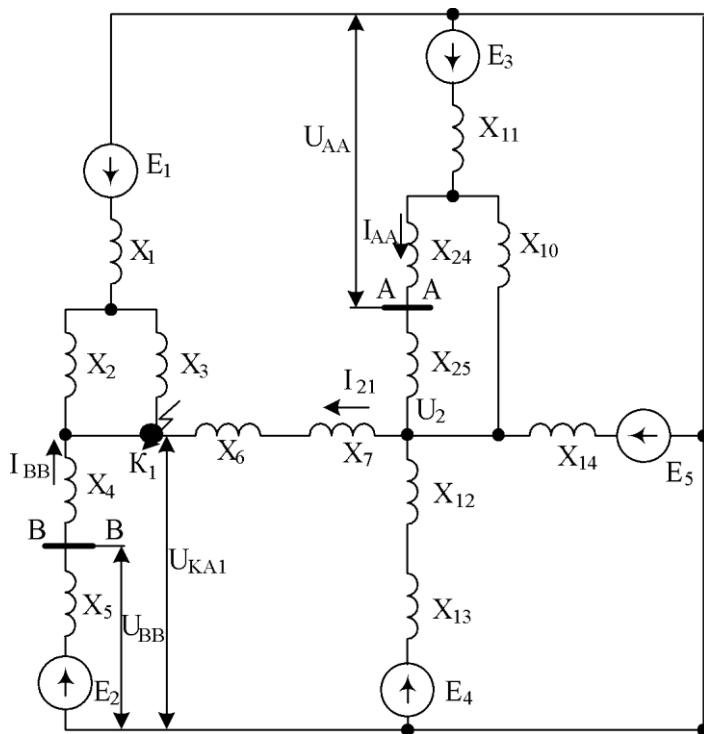


Рисунок 18 - Преобразование схемы замещения прямой последовательности

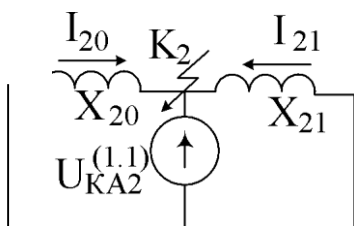


Рисунок 19 - Расчетная схема замещения обратной последовательности

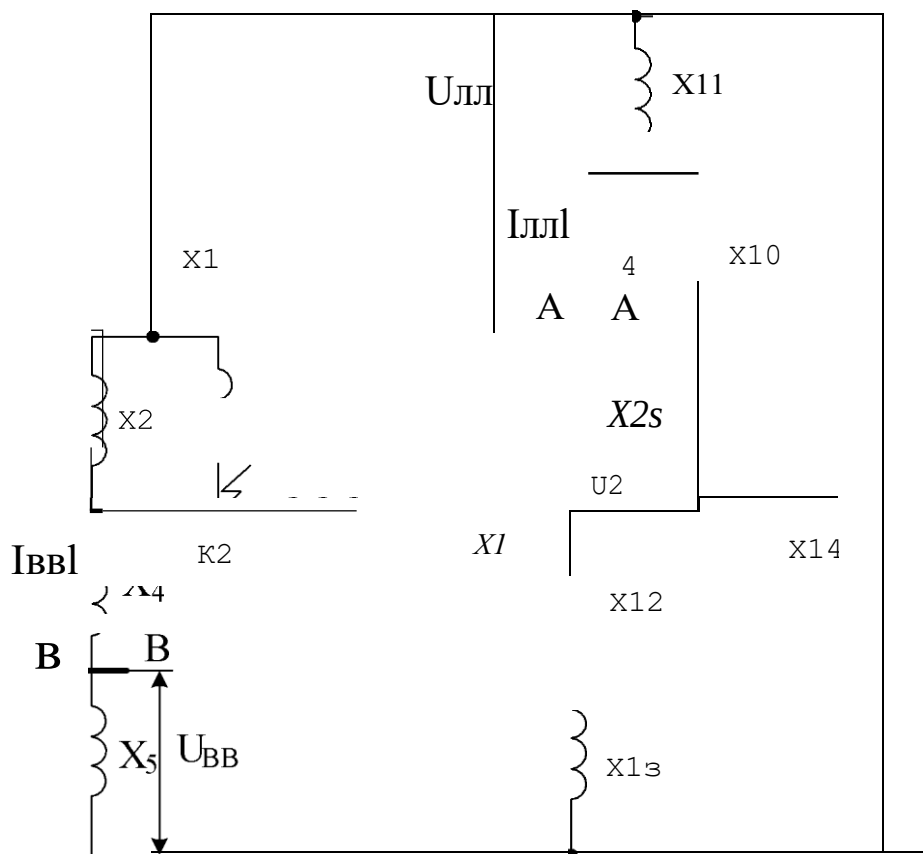


Рисунок 20 Преобразование схемы замещения обратной последовательности

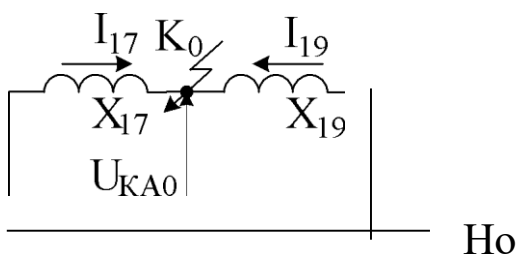


Рисунок 21-Расчетная схема замещения нулевой последовательности

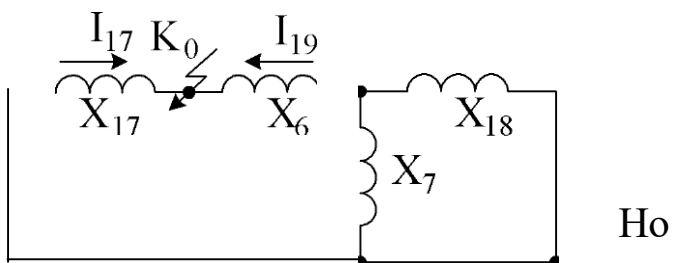


Рисунок 22- Преобразование схемы замещения нулевой последовательности № 1

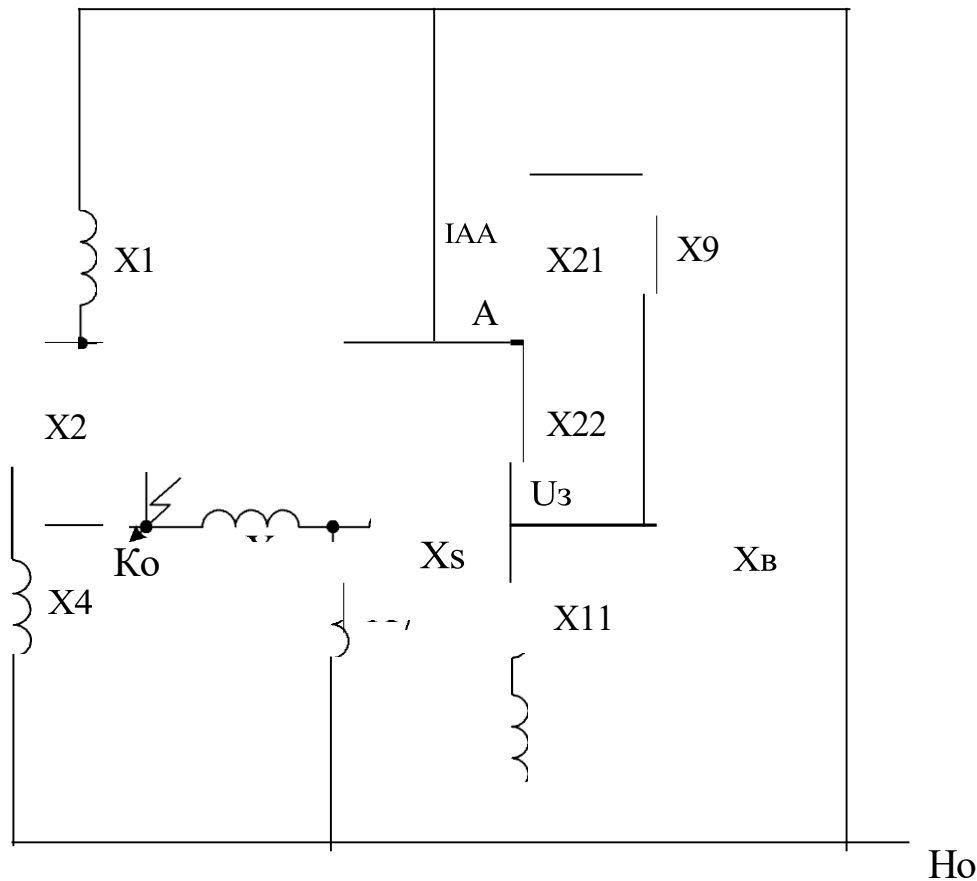


Рисунок 23--Преобразование схемы замещения нулевой последовательности № 2

$$\underline{U}_3 = I_{\text{кЛ0}} + I_{19} j x_6 = 0,384062 + 0,188176 * e^{90} * j 0,88 = 0,218467 \text{ о.е.}$$

Далее схема разворачивается до сечения А-А (рисунок 23). Т.к. $X_s = 0$, то $U_3 = U_2$. Находится сопротивление линии Л-2 с учетом сечения А-А:

$$x_{22} = 2/3 * 6,820418 = 4,546945 \text{ о.е. } x_{21} = 1/3 * 6,820418 = 2,273473 \text{ о.е.}$$

Находятся ток и напряжение в сечении А-А:

$$I_M = -\underline{U}_3 / (jX_9) = -0,2184670 / j 6,820418 = 0,032031 * e^{90} \text{ о.е.}$$

$$I_M = \underline{U}_3 + I_M j x_{22} = 0,2184670 + 0,032031 * e^{90} * j 4,546945 = 0,072824 \text{ о.е.}$$

Для сечения В-В: $I_{ВВ} = 0$.

С учетом перехода через трансформатор УЛ для сечения В-В вектора прямой последовательности поворачиваются на $+30^\circ$.

$$\text{Прямая последовательность: } I_{ВВ} = 0,314742 * e^{-j60}; I_{ВВ} = 0,648445 * e^{30}.$$

Обратная последовательность: $I_{bv} = 0,141720 \cdot e^{j60^\circ}$; $I_{bv} = 0,265017 \cdot e^{-j30^\circ}$

Определяются параметры режима в сечении В-В.

$$\text{Базисный ток для сечения А-А: } I_{bl-l} = \frac{S_{J3,6}}{3I_{сн} - L \cdot 115} = \frac{1000}{-L \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}.$$

$$\text{Базисный ток для сечения В-В: } I_{b-v-v} = \frac{S_{J3,6}}{3I_{сн} - J3 \cdot 10,5} = \frac{1000}{-J3 \cdot 10,5} = 54,98574 \text{ кА}.$$

$$\text{Прямая последовательность: } I_{bv} = 0,314742 \cdot I_b = 0,314742 \cdot 54,98574 = 17,306 \text{ кА}; \quad U_{bv} = 0,648445 \cdot U_b / f_j = 0,648445 \cdot 10,5 / f_j = 3,93 \text{ кВ}.$$

$$\text{Обратная последовательность: } I_{bv} = 0,14172 \cdot I_b = 0,14172 \cdot 54,98574 = 7,7926 \text{ кА}; \quad U_{bv} = 0,265017 \cdot U_b / 3 = 0,265017 \cdot 10,5 / 3 = 1,61 \text{ кВ}.$$

Определяются параметры режима в сечении А-А.

$$\text{Прямая последовательность: } I_m = 0,172725 \cdot 5,02 = 0,863440 \text{ кА};$$

$$U_m = 0,928603 \cdot 115 / 3 = 61,654857 \text{ кВ}.$$

$$\text{Обратная последовательность: } I_m = 0,102463 \cdot 5,02 = 0,514364 \text{ кА};$$

$$U_m = 0,042354 \cdot 115 / f_j = 2,812106 \text{ кВ}.$$

$$\text{Нулевая последовательность: } I_m = 0,032031 \cdot 5,02 = 0,160796 \text{ кА};$$

$$U_m = 0,072824 \cdot 115 / 3 = 4,83517 \text{ кВ}.$$

Построение векторных диаграмм токов и напряжений.

Токи и напряжения в именованных единицах в месте КЗ для КС¹⁻¹):

$$\text{Прямая последовательность: } I_{kl1} = 2,03419 \cdot I_b = 2,03419 \cdot 2,51 = 5,1063 \text{ кА};$$

$$U_{kl1} = 0,3841 \cdot U_b / 3 = 0,3841 \cdot 230 / 3 = 50,9998 \text{ кВ}.$$

$$U_{kl1} = U_{KA2} = U_{кло} = 50,9998 \text{ кВ}.$$

$$\text{Обратная последовательность: } I_{KA2} = 1,221242 \cdot I_b = 1,221242 \cdot 2,51 = 3,065585 \text{ кА};$$

$$\text{Нулевая последовательность } I_{кло} = 0,812942 \cdot 2,51 = 2,040662 \text{ кА}.$$

Векторные диаграммы токов и напряжений изображены на рисунках: в месте КЗ № 24, 25; для сечений А-А и В-В- № 26-29.

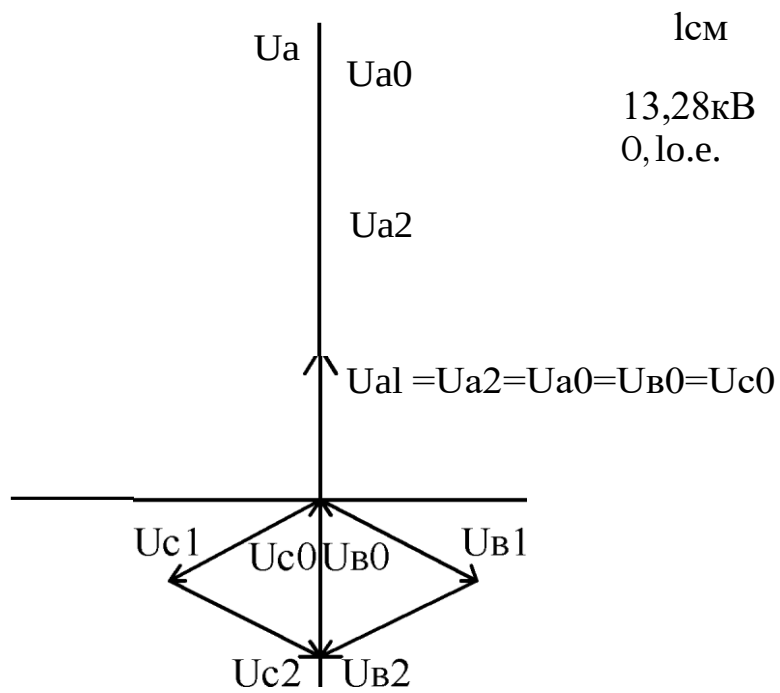


Рисунок 24- Векторная диаграмма напряжений в точке КЗ

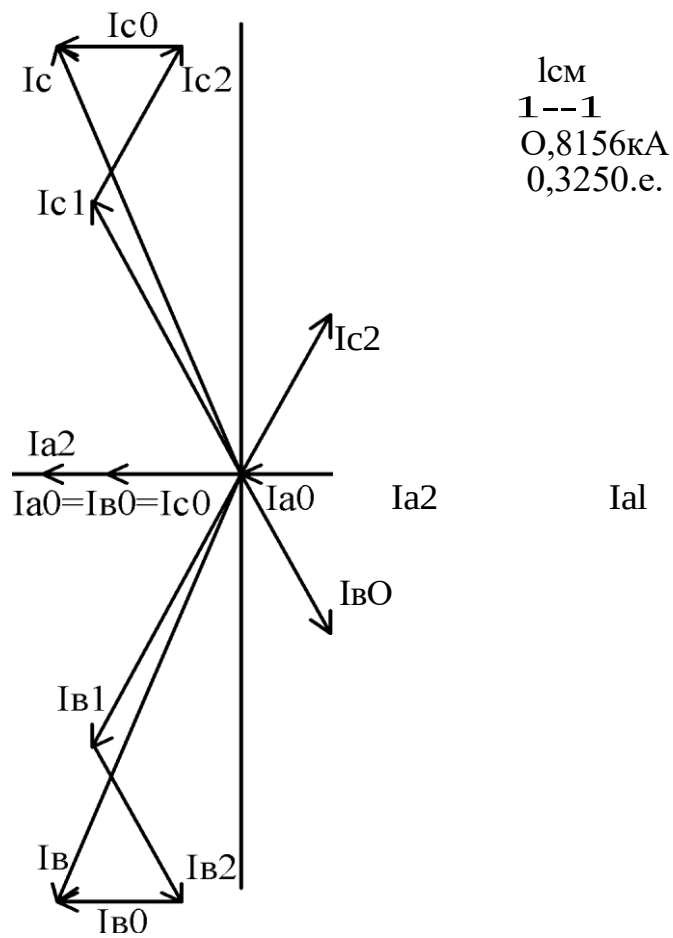


Рисунок 25- Векторная диаграмма токов в точке КЗ

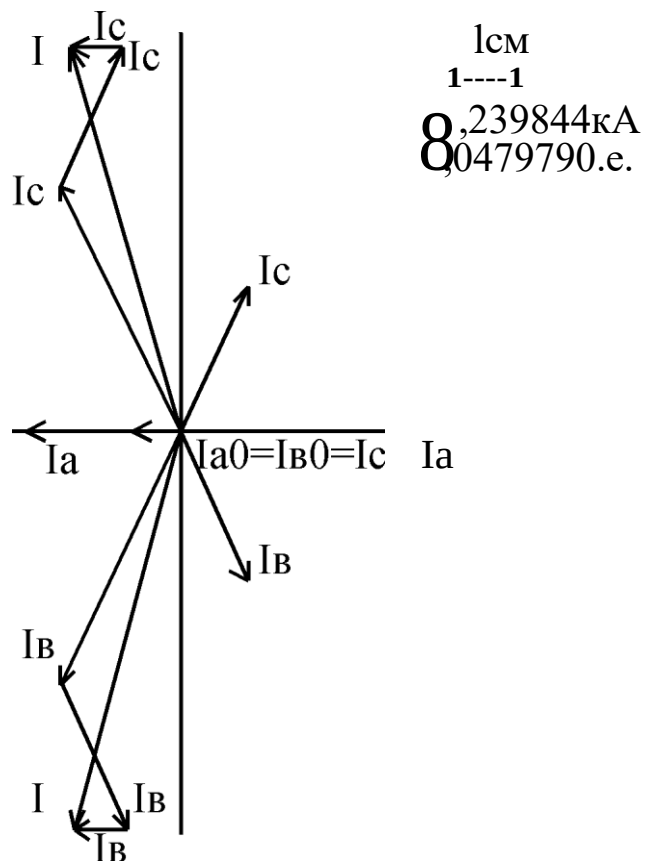


Рисунок 26-Векторная диаграмма токов в сечении А-А

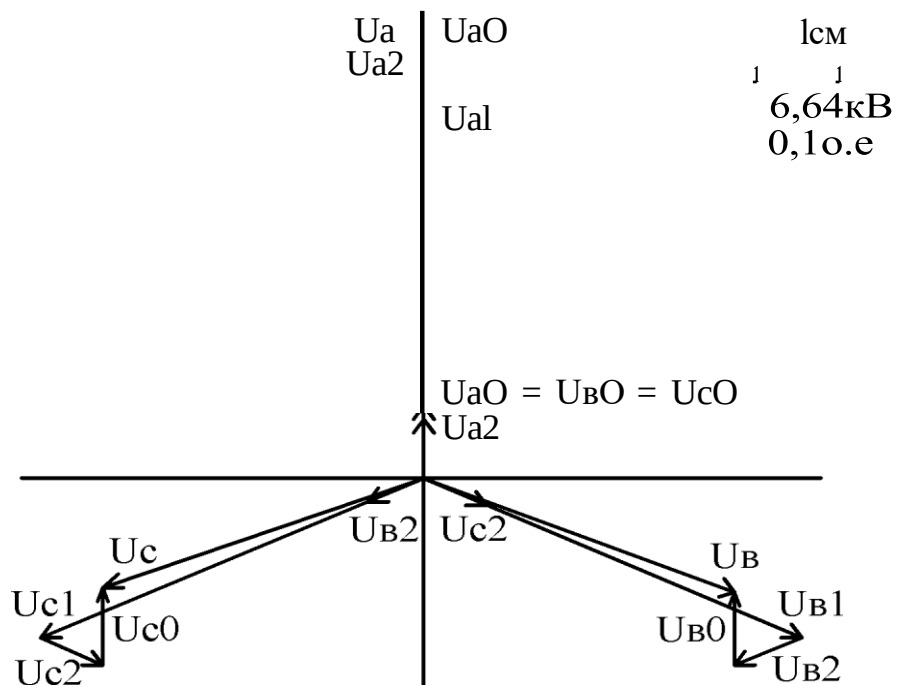


Рисунок 27- Векторная диаграмма напряжений в сечении А-А

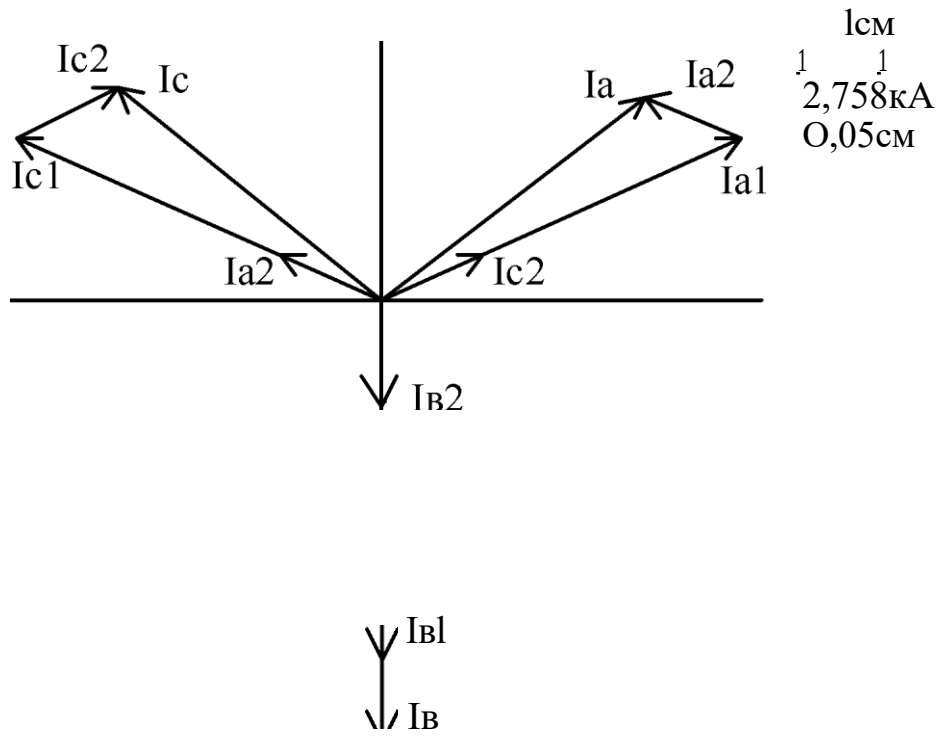


Рисунок 28- Векторная диаграмма токов в сечении В-В

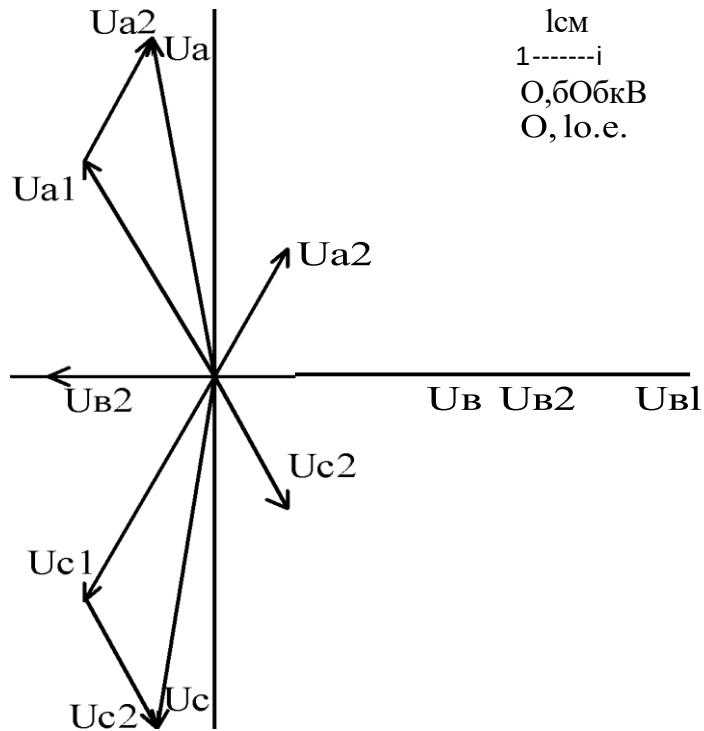


Рисунок 29- Векторная диаграмма напряжений сечения В-В

Расчет периодической слагающей тока КЗ методом типовых кривых.

Задача 111. Расчет периодической слагающей тока трехфазного КЗ методом типовых кривых.

При определении периодического тока трехфазного КЗ составляется схема прямой последовательности для начального момента времени, в которой генераторы представляются сверхпереходными параметрами; нагрузки не учитываются (рисунок 2). Общая методика расчета описана в [1,3,5-8]. После эквивалентирования получена промежуточная схема, (рисунок 30), которая преобразуется к лучевому виду относительно точки КЗ (рисунок 31). При этом используются коэффициенты токораспределения [1,3,8].

В процессе упрощений схемы замещения получены следующие сопротивления: $X_{1s} = X_1 + X_2/2 = 0 + 0,975425/2 = 0,4877125$ о.е.

$X_{16} = X_4 + X_s = 0,84 + 1,53 = 2,37$ о.е.

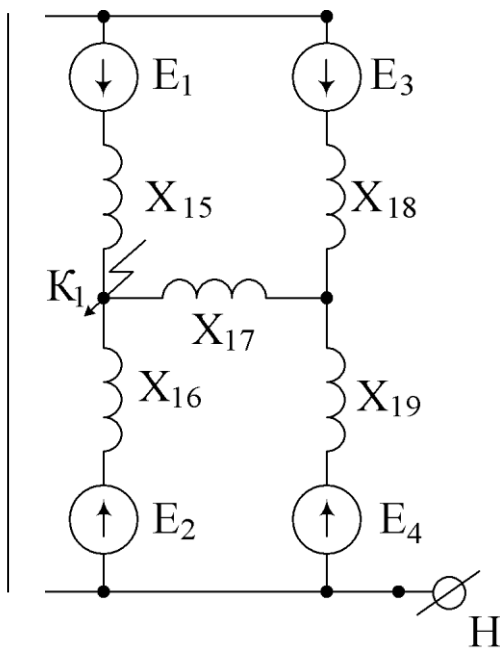


Рисунок 30- Промежуточная схема

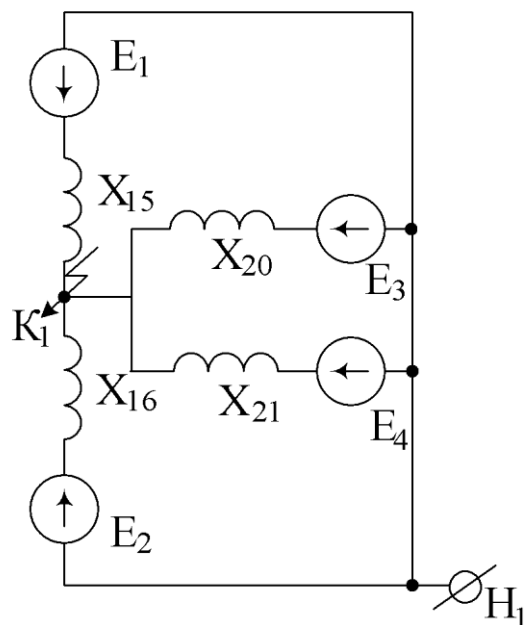


Рисунок 31- Расчетная схема

$X_{11} = X_6 + X_1 = 0,88 + 0 = 0,88$ о.е.

$X_{1s} = X_{11} + X_9/2 = 0 + 1,240076/2 = 0,620038$ о.е.

$X_{19} = X_{12} + X_B = 2,117202 + 0,192308 = 2,30951$ о.е.

$X_{\Sigma K} = X_{1s} * X_{19} / (X_{1s} + X_{19}) = 0,620038 * 2,30951 / (0,620038 + 2,30951) = 0,488807$ о.е.

$$C1=X_{эк}/X_{1s}=0,488807/0,620038=0,78835.$$

$$C2=X_{эк}/X_{19}=0,488807/2,30951=0,21165.$$

$$X_{2o}=(X_{эк}+X_{11})/C1=1,736294 \text{ о.е.}$$

$$X_{21}=(X_{эк}+X_{11})/C2=6,467324 \text{ о.е.}$$

Получена схема, изображенная на рисунке 31. Далее находятся начальные периодические токи в месте КЗ.

$$I''_{г}=E_2/X_{16}*I_B=1,13/2,27*2,5102=1,196846 \text{ кА.}$$

$$I''_{c1}=E_1/X_{1s}*I_B=1/0,4877125*2,5102=5,146885 \text{ кА.}$$

$$I''_{c2}=E_3/X_{20}*I_B=1/1,736294*2,5102=1,445723 \text{ кА.}$$

$$I''_{c3}=E_4/X_{21}*I_B=1/6,467324*2,5102=0,388136 \text{ кА.}$$

Токи от систем постоянны. Периодический ток, по типовым кривым, определяется для синхронного генератора с тиристорной или высокочастотной системой возбуждения. В соответствии с методикой рассчитывается номинальный ток синхронного генератора и далее определяется номер типовой кривой.

$$I_{гн}=S_{гн}/J_3 * U_B = 100/(-J_3 * 0,85 * 230) = 0,295320 \text{ кА};$$

$$I^*_{по}=I_{г2''}/I_{гн}=1,196846/0,295320 = 4,054.$$

Так как отношение $I_{г2''}/I_{гн}$ 4, то по [1,3,5-8] выбирается 4 типовая кривая:

$$I_{кзпост}=I''_{c2}+I''_{c3}+I''_{c1}=5,146885+1,445723+0,388136=6,980748 \text{ кА}$$

t, сек	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$I_{п}/I''_{г}$, о.е	1	0,85	0,78	0,755	0,75	0,745
$I_{п}$, кА	1,1968	1,017	0,933	0,903	0,897	0,891
Суммарный $I_{ю}$, кА	8,1775	7,9977	7,9137	7,8837	7,8777	7,872

В качестве примера рассмотрим нахождение периодического тока для момента времени 0,1 сек. По кривой 4 для этого момента времени определяется отношение $I_{н,t,г}/I_{ног}=0,85$.

Определяется действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора: $I_{н,t,г}=0,85 * I_{но} * I_{ном}=0,85 * 4,05 * 0,2953 = 1,017 \text{ кА.}$

Суммарный периодический ток при ксз) в узле К с учетом типовых кривых изображен на рисунке 32.

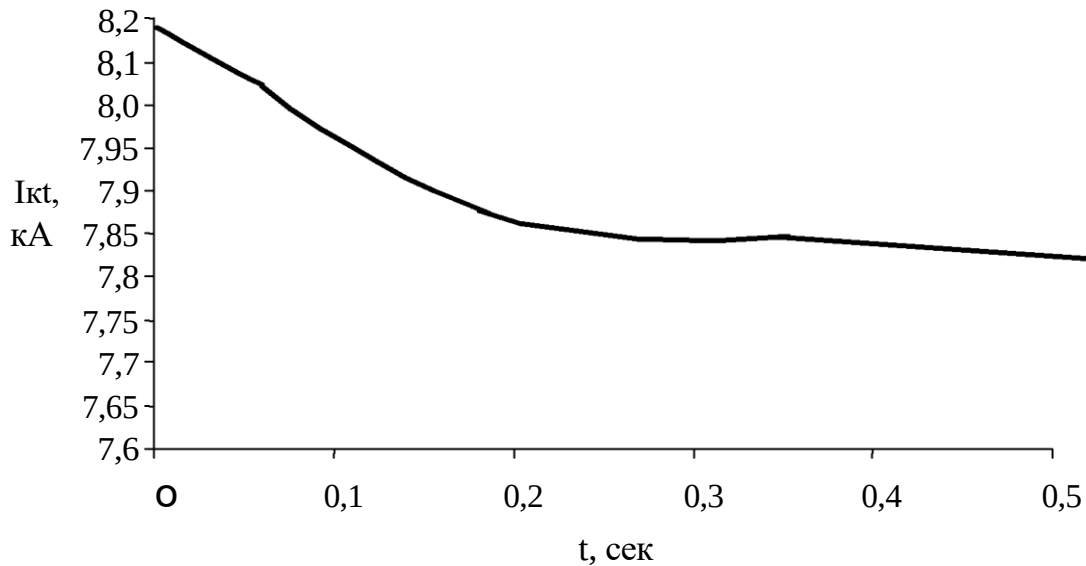


Рисунок 32- График зависимости суммарного периодического тока от времени КЗ $I_{kt}=f(t)$

Задача IV. Расчет периодической слагающей тока несимметричного КЗ методом типовых кривых.

Для определения периодических токов КЗ при $k(1,1)$ методом типовых кривых составляется схема замещения обратной последовательности без учета нагрузок (рисунок 33). Далее производится упрощение схемы замещения и получение эквивалентного сопротивления обратной последовательности. Последовательность упрощений приведена ниже и на рисунках 34-37.

$$X_{1s}=X_1+X_2/2=0+0,975425/2=0,487713 \text{ о.е.} \quad X_{16}=X_4+X_s=0,84+1,87=2,71 \text{ о.е.}$$

$$X_{11}=X_6+X_1=0+0,88=0,88 \text{ о.е.} \quad X_{1s}=X_{11}+X_9/2=0+1,240076/2=0,620038 \text{ о.е.}$$

$$X_{19}=X_{12}+X_B=2,117202+0,230769=2,347971 \text{ о.е.}$$

$$X_{2o}=X_{1s}*X_{16}/(X_{1s}+X_{16})=0,487713*2,71/(0,487713+2,71)=0,413327 \text{ о.е.}$$

$$X_{22}=X_{17}+X_{21}=0,88+0,490508=1,370508 \text{ о.е.} \quad X_{K2}=X_{2o}*X_{22}/(X_{2o}+X_{22})=0,413327*1,370508/(0,413327+1,370508)=0,317556 \text{ о.е.}$$

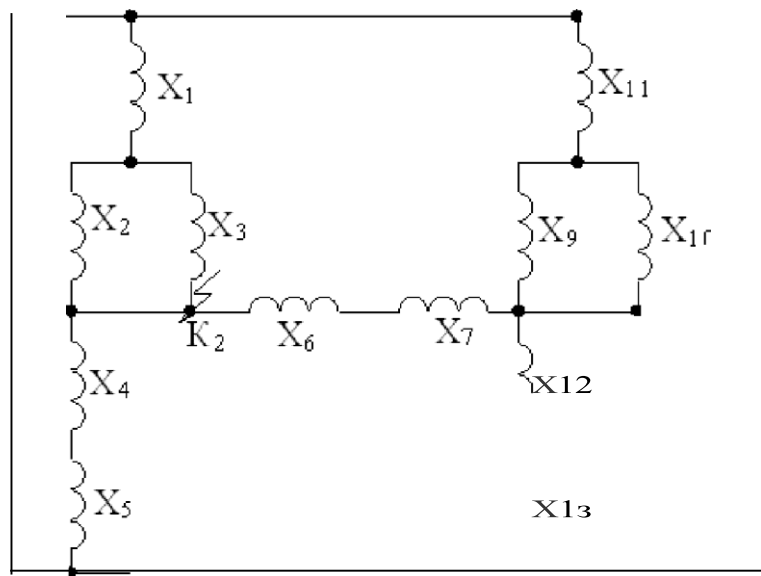


Рисунок 33- Схема замещения обратной последовательности

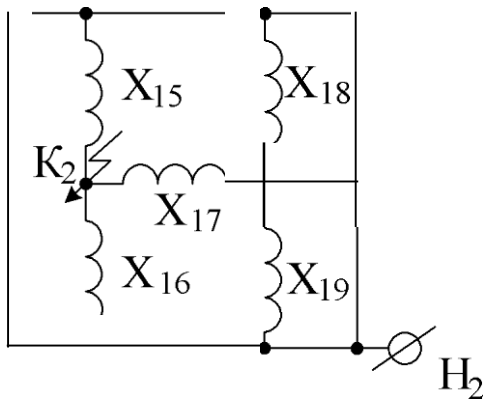


Рисунок 34- Упрощение схемы №1

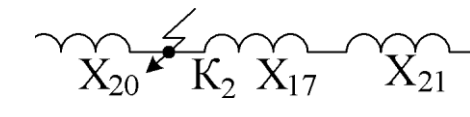


Рисунок 35- Упрощение схемы №2

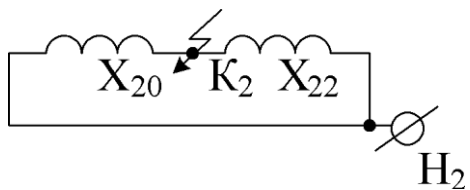


Рисунок 36- Упрощение схемы №3

Н2

Рисунок 37- Эквивалентная схема замещения обратной последовательности

Аналогично составим схему замещения нулевой последовательности (рисунок 38). Порядок упрощения схемы замещения приведен ниже на рисунках 39-42.

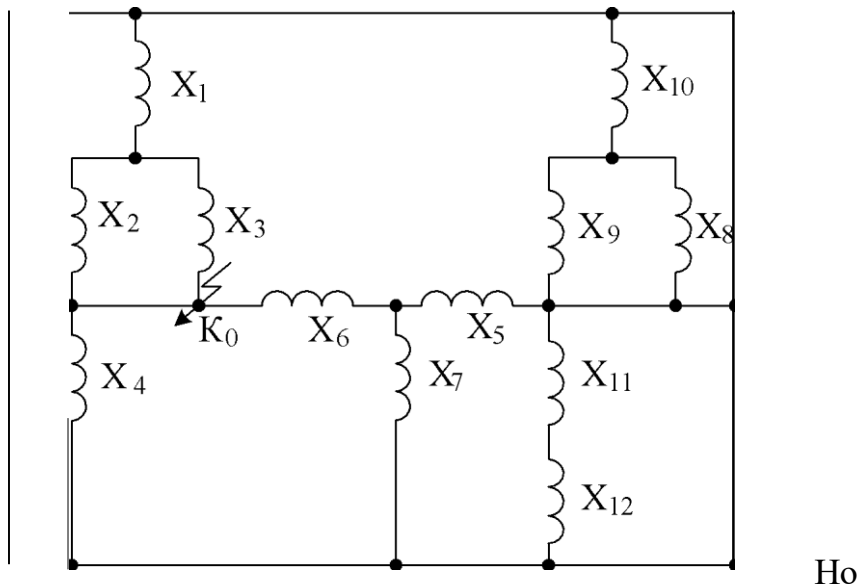


Рисунок 38-Расчетная схема замещения нулевой последовательности

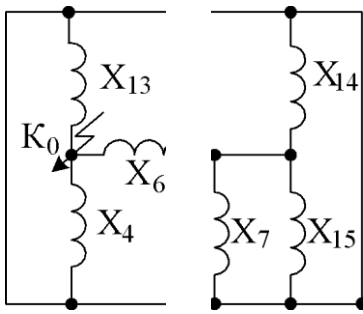
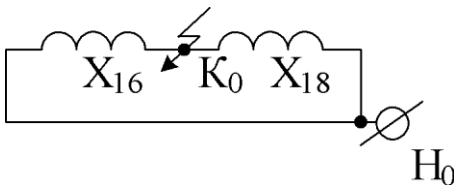
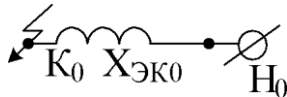
$$X_B = X_1 + X_2 / 2 = 0 + 4,585 / 2 = 2,292 \text{ о.е.} \quad X_{14} = X_{10} + X_9 / 2 = 0 + 6,82 / 2 = 3,41 \text{ о.е.}$$

$$X_{1s} = X_{11} + X_{12} = 7,41 + 0,769 = 8,18 \text{ о.е.}$$

$$X_{16} = X_B * X_4 / (X_B + X_4) = 2,29225 * 0,84 / (2,29 + 0,84) = 0,615 \text{ о.е.}$$

$$X_{1s} = X_6 + X_{11} = 0,88 + 1,338581 = 2,219 \text{ о.е.}$$

$$X_{11} = 1 / (1/X_1 + 1/X_{1s} + 1/X_{14}) = 1 / (1/3,016 + 1/8,18 + 1/3,41) = 1,34 \text{ о.е.}$$

Н₀**Рисунок 39- Упрощение схемы №1**Н₀ Рисунок 40- Упрощение схемы №2**Рисунок 41 - Упрощение схемы № 3****Рисунок 42- Эквивалентная схема замещения нулевой последовательности**

Для решения поставленной задачи используются эквивалентные данные по прямой последовательности из предыдущей задачи. С учетом особенностей $k_{(1,1)}$ [1,3,4,5,8] получаем схему, приведенную на рисунке 43. Эта схема приводится к виду, изображенному на рисунке 44.

$$LXC_{l \cdot 1} = X_{\text{эк}2} \cdot X_{\text{эк}0} / (X_{\text{эк}2} + X_{\text{эк}0}) = 0,3176 \cdot 0,4814 / (0,317556 + 0,481356) = 0,19130 \text{ о.е.}$$

$$X_{\text{эк}} = 1 / (1/X_{1s} + 1/X_{16} + 1/X_{20} + 1/X_{21}) =$$

$$= 1 / (1/0,4877125 + 1/2,37 + 1/1,736294 + 1/6,467324) = 0,312218 \text{ о.е.}$$

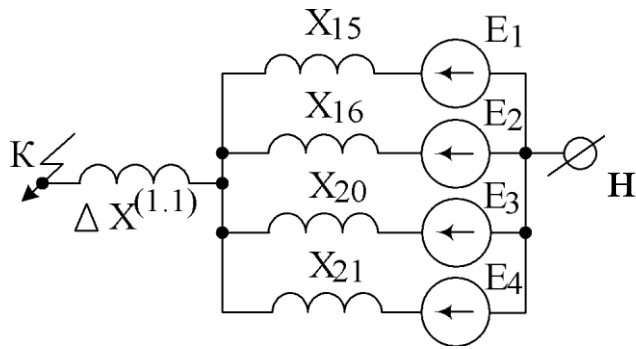


Рисунок 43- Расчетная схема замещения при к(1.)

$$C1 = X_{\text{эк}} / X_{1s} = 0,312218 / 0,4877125 = 0,640168; \quad C2 = X_{\text{эк}} / X_{16} = 0,312218 / 2,37 = 0,131738;$$

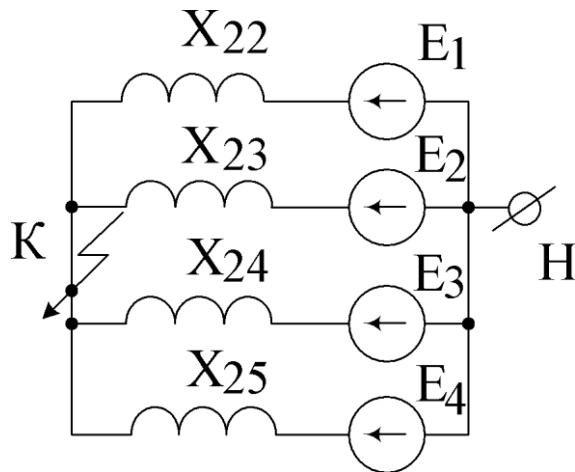


Рисунок 44- Расчетная четырёхлучевая схема замещения

$$C3 = X_{\text{эк}} / X_{20} = 0,312218 / 1,736294 = 0,179819;$$

$$C4 = X_{\text{эк}} / X_{21} = 0,312218 / 6,467324 = 0,048276.$$

$$X_{22} = (X_{\text{эк}} + jX) / C1 = 0,78659 \text{ o.e.};$$

$$X_{23} = (X_{\text{эк}} + jX) / C2 = 3,82236 \text{ o.e.};$$

$$X_{24} = (X_{\text{эк}} + jX) / C3 = 2,800316 \text{ o.e.};$$

$$X_{2s} = (X_{\text{эк}} + jX) / C4 = 10,430649 \text{ o.e.}$$

$$m(1,1) = 3 \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{22} \cdot X_{20}}{(X_{32} + X_{20})^2}} = 3 \cdot \sqrt{1 - \frac{0,31760 \cdot 0,4814}{(0,3176 + 0,4811)^2}} = 1,52;$$

$$I''_{\Gamma 2} = E_2 / X_{23} \cdot I_B \cdot m^{(1,1)} = 1,13 / 3,82236 \cdot 2,5102 \cdot 1,52 = 1,128 \text{ кА};$$

$$I''_{c1} = E1/X22 * I_B * m(l,l) = 1/0,78659 * 2,5102 * 152 = 4,85 \text{ кА};$$

$$I''_{c2} = E3/X24 * I_B * m(l,l) = 1/2,800316 * 2,5102 * 1,52 = 1,362 \text{ кА};$$

$$I''_{c3} = E4/X2s * I_B * m(l,l) = 1/10,430649 * 2,5102 * 1,52 = 0,366 \text{ кА};$$

$$I^*_{по} = I''_{Г} / I''_{ГН} = 1,128/0,295320 = 3,82.$$

Так как отношение $I''_{Г} / I''_{ГН} ::: 4$, то по [1,3,5-8] выбирается 4 типовая кривая для синхронной машины с тиристорной системой самовозбуждения и с последовательным трансформатором:

$$I_{кзпост} = I''_{c1} + I''_{c2} + I''_{c3} = 4,85 + 1,362 + 0,366 = 6,578 \text{ кА}.$$

Определяется действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора: $I_{n,t,Г} = 3,82 * I_{no} * I_{ном} =$

t, сек.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$I_{rtl} I''_{Г,о.е}$	1	0,85	0,8	0,78	0,78	0,78
$I_{Гt}, \text{ кА}$	1,128	0,96	0,9	0,88	0,88	0,88
Суммарный $I_{кт}, \text{ кА}$	7,706	7,538	7,478	7,518	7,518	7,518

Суммарный периодический ток несимметричного КЗ, с учетом типовых кривых изображен на рисунке 45.

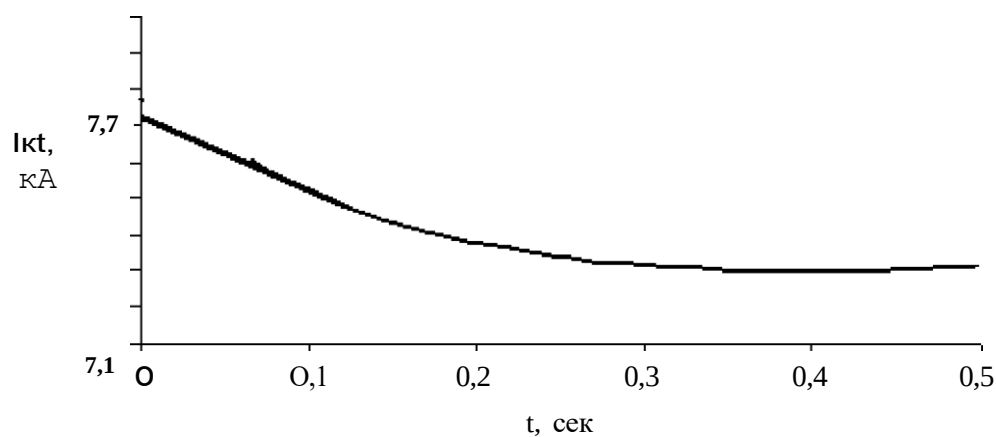


Рисунок 45 - Зависимость $I_{кт}=f(t)$ для $k(l,l)$ в точке К

Список рекомендуемой литературы

Основная.

1. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. -Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. - 283 с.
2. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети.-Учеб. пособие для студ. эл. техн. спец. Вузов.- СПб: Изд-во Сизова М.П.,2001.-304с.,с илл.
3. Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2000.- 168с.
4. Волкова Н.Н., Гусев Ю.П., Козина М.А., Крючков И.П., Пойдо А.И. Методы расчета токов короткого замыкания. Сборник задач: Учебное пособие по курсу «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах»/ Под ред. И.П. Крючкова. М.: Изд-во МЭИ, 2000.- 59с.

Дополнительная.

5. Демин Ю.И. Методы расчета КЗ в электрических сетях и системах: Методические указания - Ставрополь: Изд-во Сев.Кав.ГТУ, 2002.-35с.
6. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ/ Межгосударственный стандарт: ГОСТ 227514-93.- Минск, Межгосударственный совет по стандартизации ,метрологии и сертификации ,Изд-во стандартов,1994.-40с.
7. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.- РД 153-34.0-20.527-98.- М.,2001.
8. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах./Учебник для эл. техн. и энергетических ВУЗов.-М.: Энергия, 1970. - 519 с.

9. Демин Ю.И., Атапин Н.М. Программа расчета токов короткого замыкания методом симметричных составляющих!/Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ/ No2007612054, Заявка № 2007610668, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.05.2007г.
10. Демин Ю.И., Минченко Ю.Д., Киркоров О.Р. Методические указания по расчетам токов КЗ в электрических сетях на ПЭВМ (для студентов всех форм обучения спец. 100200,100400).-СтПИ, Ставрополь,1994.- 20с.
11. Демин Ю.И. Методические указания к практическим занятиям по дисциплинам: «Электромагнитные переходные процессы» специальностей 140205 «Электроэнергетические системы и сети» и 140200 «Электроэнергетика», «Переходные процессы в электроэнергетических системах» специальности 140211 «Электроснабжение».-Ставрополь, СевКавГТУ,2010.-55с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Электромагнитные переходные процессы

Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) «Электроэнергетические системы и сети»

Квалификация выпускника бакалавр
Изучается в 6 семестре

1. Общие положения

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов (СРС) в вузе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения.

К основным видам самостоятельной работы студентов относятся:

- формирование и усвоение содержания конспекта лекций на базе рекомендованной лектором учебной литературы, включая информационные образовательные ресурсы (электронные учебники, электронные библиотеки и др.);
- написание докладов;
- подготовка к семинарам, практическим и лабораторным работам, их оформление;
- выполнение учебно-исследовательских работ, проектная деятельность;
- подготовка практических разработок и рекомендаций по решению проблемной ситуации;
- выполнение домашних заданий в виде решения отдельных задач, проведения типовых расчетов, расчетно-компьютерных и индивидуальных работ по отдельным разделам содержания дисциплин и т.д.;
- компьютерный текущий самоконтроль и контроль успеваемости на базе электронных обучающих и аттестующих тестов и др.

Методика организации самостоятельной работы студентов зависит от структуры, характера и особенностей изучаемой дисциплины, объема часов на ее изучение, вида заданий для самостоятельной работы студентов, индивидуальных качеств студентов и условий учебной деятельности.

Процесс организации самостоятельной работы студентов включает в себя следующие этапы:

- подготовительный (определение целей, составление программы, подготовка методического обеспечения, подготовка оборудования);
- основной (реализация программы, использование приемов поиска информации, усвоения, переработки, применения, передачи знаний, фиксирование результатов, самоорганизация процесса работы);
- заключительный (оценка значимости и анализ результатов, их систематизация, оценка эффективности программы и приемов работы, выводы о направлениях оптимизации труда).

Самостоятельная работа по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы» направлена на формирование следующих **компетенций**:

Код	Формулировка
ПК-3	Способен применять знание способов производства, транспорта и использования электроэнергии

2. Цель и задачи самостоятельной работы

Ведущая цель организации и осуществления СРС совпадает с целью обучения студента – формирование набора компетенций будущего бакалавра.

При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности. Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и

навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Задачами СРС являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельной работы и лабораторных занятий.

3. Технологическая карта самостоятельной работы студента

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
6 семестр					
ИД-4 _{ПК-3}	Подготовка к лекциям	Собеседование, тестирование	8,5	0,5	9
ИД-4 _{ПК-3}	Подготовка к практическим занятиям	Собеседование, тестирование	8,5	0,5	9
ИД-4 _{ПК-3}	Подготовка к лабораторным работам	Собеседование, тестирование	17,5	0,5	18
ИД-4 _{ПК-3}	Выполнение расчетно-графической работы	Расчетно-графическая работа, собеседование	19,5	0,5	20
ИД-4 _{ПК-3}	Самостоятельное изучение литературы	Собеседование, тестирование	15	1	16
Итого за 6 семестр			69	3	72
Итого			69	3	72

4. Порядок выполнения самостоятельной работы студентом

4.1. Методические рекомендации по работе с учебной литературой

При работе с книгой необходимо подобрать литературу, научиться правильно ее читать, вести записи. Для подбора литературы в библиотеке используются алфавитный и систематический каталоги.

Важно помнить, что рациональные навыки работы с книгой – это всегда большая экономия времени и сил.

Правильный подбор учебников рекомендуется преподавателем, читающим лекционный курс. Необходимая литература может быть также указана в методических разработках по данному курсу.

Изучая материал по учебнику, следует переходить к следующему вопросу только после правильного уяснения предыдущего, описывая на бумаге все выкладки и вычисления (в том числе те, которые в учебнике опущены или на лекции даны для самостоятельного вывода).

При изучении любой дисциплины большую и важную роль играет самостоятельная индивидуальная работа.

Особое внимание следует обратить на определение основных понятий курса. Студент должен подробно разбирать примеры, которые поясняют такие определения, и уметь строить аналогичные примеры самостоятельно. Нужно добиваться точного представления о том, что изучаешь. Полезно составлять опорные конспекты. При изучении материала по учебнику полезно в тетради (на специально отведенных полях) дополнять конспект лекций. Там же следует отмечать вопросы, выделенные студентом для консультации с преподавателем.

Выводы, полученные в результате изучения, рекомендуется в конспекте выделять, чтобы они при перечитывании записей лучше запоминались.

Опыт показывает, что многим студентам помогает составление листа опорных сигналов, содержащего важнейшие и наиболее часто употребляемые формулы и понятия. Такой лист помогает запомнить формулы, основные положения лекции, а также может служить постоянным справочником для студента.

Чтение научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации. От того на сколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия.

Выделяют **четыре основные установки в чтении научного текста:**

информационно-поисковый (задача – найти, выделить искомую информацию)

усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений)

аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему)

творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения;

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала;

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала;

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора;

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного.

Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Методические рекомендации по составлению конспекта:

1. Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.

2. Выделите главное, составьте план.

3. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.

4. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно.

5. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли.

В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы.

4.2. Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям

Для того чтобы практические занятия приносили максимальную пользу, необходимо помнить, что упражнение и решение задач проводятся по вычитанному на лекциях материалу и связаны, как правило, с детальным разбором отдельных вопросов лекционного курса. Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на лабораторных занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций, задач. При этих условиях студент не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном решении задач нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи). Решение проблемных задач или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что решение каждой учебной задачи должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с

выводом. Полученный ответ следует проверить способами, вытекающими из существа данной задачи. Полезно также (если возможно) решать несколькими способами и сравнить полученные результаты. Решение задач данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

4.3. Методические рекомендации по подготовке к лабораторным занятиям

Для того чтобы лабораторные занятия приносили максимальную пользу, необходимо помнить, что упражнение и решение задач проводятся по вычитанному на лекциях материалу и связаны, как правило, с детальным разбором отдельных вопросов лекционного курса. Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на лабораторных занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций, задач. При этих условиях студент не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном решении задач нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи). Решение проблемных задач или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что решение каждой учебной задачи должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом. Полученный ответ следует проверить способами, вытекающими из существа данной задачи. Полезно также (если возможно) решать несколькими способами и сравнить полученные результаты. Решение задач данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

4.4. Методические рекомендации по самопроверке знаний

После изучения определенной темы по записям в конспекте и учебнику, а также решения достаточного количества соответствующих задач на практических занятиях и самостоятельно студенту рекомендуется провести самопроверку усвоенных знаний, ответив на контрольные вопросы по изученной теме.

В случае необходимости нужно еще раз внимательно разобраться в материале.

Иногда недостаточность усвоения того или иного вопроса выясняется только при изучении дальнейшего материала. В этом случае надо вернуться назад и повторить плохо усвоенный материал. Важный критерий усвоения теоретического материала – умение отвечать на вопросы для собеседования.

4.5. Методические рекомендации по подготовке к экзамену

Готовиться к экзамену необходимо в течение всего учебного времени, т.е. с первого дня очередного семестра: вся работа студента на лекциях, семинарских занятиях, консультациях, а также написание рефератов и выполнение курсовых работ и т.п. - это и есть этапы подготовки студента к зачетам и экзаменам. Подготовка к сессии должна быть нацелена не столько на приобретение новых знаний, сколько на закрепление ранее изученного материала и повторение его. Сумму полученных знаний студенту перед сессией надо разумно обобщить, привести в систему, закрепить в памяти, для чего ему надо использовать учебники, лекции, консультации, курсовые работы, рефераты и т.п., а

также методические пособия и различного рода руководства. Повторение необходимо производить по разделам, темам.

Методика подготовки к экзамену состоит из двух взаимосвязанных этапов.

1. Регулярное посещение всех учебных занятий в течение всего семестра: лекций, семинарских занятий, консультаций и т.п., а также активное изучение рекомендованной литературы, отработка (в случае необходимости) в установленные сроки всех пропущенных учебных занятий.

2. Непосредственная подготовка к зачету и экзамену, когда студенту нужно в короткий срок (2-4 дня) охватить весь изученный материал по предмету и успешно сдать экзамен (зачет). А для того, чтобы это успешно сделать, студент, в первую очередь, должен мысленно в спокойной обстановке вспомнить весь материал, изученный за семестр, с тем чтобы выявить разделы курса (предмета), слабо изученные или плохо понятые при первоначальном изучении с целью устранения пробелов в своих знаниях. Для успешной подготовки к экзаменам студенту необходимо составить себе своеобразный рабочий график, в котором отразился бы последовательный переход от темы к теме, от раздела к разделу. Во время подготовки к экзаменам могут появиться вопросы. Их нужно записать и получить ответ на предэкзаменационных консультациях. На консультациях преподаватель интересуется, как студентами изучены темы, пройденные в учебном процессе, при необходимости он разъясняет отдельные вопросы этих тем.

Во время подготовки к экзамену студенту необходимо просмотреть и собственные конспекты прослушанных лекций и самостоятельно проработанных тем семинарских занятий. Это позволит ему восстановить в памяти ранее изученные положения, выявить пробелы в своих знаниях и восполнить их из других источников. Значение предэкзаменационных консультаций очень велико. Они призваны: 1) помочь устранить пробелы в знаниях; 2) помочь систематизировать весь ранее изученный материал; 3) информировать студентов о новейших сведениях по тому предмету, который изучен последним.

Экзамен проводится в форме устного опроса.

Вопросы к экзамену:

1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах. Основные допущения.

2. Причины возникновения и следствия КЗ. Назначения расчетов электромагнитных переходных процессов и требования к ним.

3. Схемы замещения. Приведение ее элементов к точным коэффициентам трансформации.

4. Схемы замещения. Приведение их элементов к средним коэффициентам трансформации.

5. Схемы замещения. Системы относительных и именованных единиц.

6. Применение принципа наложения для практических расчетов КЗ.

7. Переходный процесс при трехфазном КЗ в простейшей цепи.

8. Определение характерных составляющих токов КЗ.

9. Методы приведения схем замещения к простейшему виду.

10. Общие сведения о синхронных машинах и их влияние на режимы КЗ сети.

11. Основные характеристики синхронной машины.

12. Векторная диаграмма установившегося нагрузочного режима неявнополюсной синхронной машины. Учет нагрузки синхронного генератора в различных режимах его работы.

13. Векторные диаграммы переходного и установившегося режимов синхронной машины. Характер перехода от нагрузочного режима к КЗ.

14. Влияние и учет нагрузки в различные моменты времени КЗ.

15. Обобщенный вектор и замена переменных синхронной машины.

16. Баланс потоков синхронной машины в начальный момент КЗ.

17. Уравнения Горева - Парка, описывающие переходные процессы вращающихся машин.
18. Переходный процесс при внезапном КЗ синхронной машины без демпферных обмоток.
19. Переходные ЭДС и реактивности синхронной машины.
20. Переходный процесс при внезапном КЗ синхронной машины с демпферными обмотками.
21. Сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины.
22. Влияние и учет АРВ (форсировки возбуждения) синхронных машин при КЗ в электрической системе.
23. Применение метода типовых кривых для расчета токов КЗ в электроэнергетической системе.
24. Основные положения метода симметричных составляющих и его применение для анализа несимметричных режимов.
25. Комплексные схемы замещения и векторные диаграммы 2-х фазного КЗ на землю.
26. Граничные условия для однократной поперечной несимметрии. Правило эквивалентности прямой последовательности.
27. Особенности составления схем прямой, обратной, нулевой последовательностей для аварийных режимов.
28. Определение параметров ЛЭП в схеме замещения нулевой последовательности.
29. Схемы замещения и сопротивления нулевой последовательности для трансформаторов и автотрансформаторов.
30. Комплексные схемы замещения и векторные диаграммы несимметричных КЗ.
31. Методика определения токов и напряжений в заданных сечениях. Учет фазовых сдвигов при переходе векторов различных последовательностей через трансформаторы.
32. Сравнение различных видов КЗ.
33. Однократная продольная несимметрия. Комплексные схемы замещения. Распределение напряжений.
34. Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной продольной несимметрии.
35. Сложные виды повреждений. Общий путь решения.
36. Особенности расчетов токов КЗ в сетях до 1 кВ.
37. Простое замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью.
38. Гашение магнитного поля в синхронных машинах.
39. Общие сведения о методах и средствах ограничения токов КЗ. Требования к токоограничивающим устройствам.
40. Токоограничивающие устройства: реакторы, трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленными обмотками.
41. Методы ограничения токов КЗ: схемные решения и деление сети.
42. Токоограничивающие коммутационные аппараты, ТОУ, вставки постоянного и переменного тока. Принципы заземления нейтралей и ограничение токов КЗ на землю.

Контроль самостоятельной работы студентов

Контроль самостоятельной работы проводится преподавателем.
 Предусмотрены следующие виды контроля: собеседование, тестирование.
 Подробные критерии оценивания компетенций приведены в Фонде оценочных средств для проведения текущей и промежуточной аттестации.

Вопросы для собеседования

1. Каков принцип построения СМП?

2. Какова точность результатов измерений, получаемых на СМП?
3. Чем обусловлена погрешность СМП?
4. Зависит ли точность расчета от выбора системы единиц?
5. Каковы достоинства расчета токов КЗ на СМП?
6. Что называется переходной и сверхпереходной ЭДС?
7. Что понимают под обобщенной нагрузкой?
8. Как оценивают параметры нагрузки в начальный момент КЗ?
9. Что понимают под мощностью КЗ?
10. Каким образом представляется синхронная машина в начальный момент КЗ?
11. Что такое среднее напряжение?
12. Каким образом выбираются базисные условия?
13. На каких допущениях основано использование метода симметричных составляющих для расчетов несимметричных КЗ электрических систем?
14. От каких факторов зависит сопротивление нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов?
15. От каких факторов зависит сопротивление нулевой последовательности воздушных и кабельных линий?
16. Как определить сопротивление обратной последовательности синхронной машины и почему его величину можно принимать практически неизменной во времени?
17. Каковы комплексные схемы замещения для несимметричных КЗ?
18. От каких факторов зависит величина токов любой последовательности и как определяется их распределение?
19. Каковы соотношения между сопротивлениями различных последовательностей для элементов электрической сети?
20. Каковы особенности составления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей?
21. Какую опасность представляет собой любое несимметричное КЗ?
22. Что такое граничные условия?
23. Какова практическая применимость результатов сравнения КЗ?
24. От чего зависит ток нулевой последовательности (ток в земле) при несимметричном КЗ на землю?
25. Из каких соображений выбирают режим заземления нейтралей?
26. Каким образом можно ограничить ток нулевой последовательности (ток в земле)?
27. Какие расчетные параметры для генераторов, трансформаторов и ЛЭП необходимо задать в ПК RastrWin3 для расчетов токов КЗ?
28. Перечислите способы моделирования взаимоиндукции ЛЭП в ПК RastrWin3.
29. Перечислите способы расчета токов КЗ в ПК RastrWin3.
30. Какие основные расчетные параметры необходимо разместить на графическом изображении модели для расчетов токов КЗ?
31. Назовите последовательность действий при пакетном расчете токов КЗ. Назовите последовательность действий при одиночном расчете токов КЗ.
32. Назовите последовательность действий при создании модели расчета токов КЗ из модели расчета установившегося режима

1. Критерии оценивания компетенций

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он:

Глубоко понимает физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах, чётко объясняет механизмы возникновения переходных процессов и способы их анализа.

Демонстрирует уверенные знания основных проблем, возникающих при аварийных режимах работы электроэнергетических систем и систем электроснабжения, умеет приводить конкретные примеры и пути решения.

Уверенно и обоснованно применяет нормативные документы при расчётах переходных процессов, способен интерпретировать положения стандартов и регламентов, а также аргументированно объяснять их выбор.

Владеет методами расчёта переходных процессов для реальных электроэнергетических систем и систем электроснабжения, использует различные расчётные схемы и методики, демонстрирует способность к проведению комплексного анализа.

Свободно ориентируется в профессиональной терминологии, принципах построения электротехнического оборудования и систем, демонстрирует умение грамотно интерпретировать результаты расчётов.

Активно использует полученные знания при выполнении лабораторных и проектных заданий, проявляет инициативу, предлагает и аргументирует альтернативные способы расчёта.

Теоретический материал усвоен в полном объёме, студент демонстрирует глубокое понимание ключевых понятий, уверенно отвечает на вопросы преподавателя.

Все работы выполнены вовремя и на высоком уровне качества, без методических и расчётных ошибок.

Компетенция ПК-3 сформирована на высоком уровне.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он:

В целом понимает физику переходных процессов и основные проблемы аварийных режимов, однако может допускать отдельные неточности при их детальном объяснении.

Умеет применять нормативные документы при расчётах переходных процессов, но может испытывать трудности при выборе наиболее подходящего регламента или при обосновании выбора.

Применяет методы расчёта переходных процессов достаточно уверенно, хотя могут возникать незначительные ошибки или затруднения в более сложных случаях.

Ориентируется в основных типах электротехнического оборудования и его систем, но при толковании результатов расчётов иногда нуждается в дополнительном пояснении.

Уверенно выполняет лабораторные и проектные задания, но требует дополнительной консультации по отдельным аспектам расчётов или выбора методик.

Освоил теоретический материал на хорошем уровне, демонстрирует логику и способность к аргументации, но может допускать неточности в формулировках.

Все задания выполнены, однако встречаются некоторые недочёты в расчётах или оформлении результатов.

Компетенция ПК-3 сформирована на достаточном уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он:

Обладает поверхностным пониманием переходных процессов в электроэнергетических системах, не всегда видит причинно-следственные связи.

Знает только основные положения нормативных документов, но не может в полной мере использовать их в расчётах, делает это формально и с ошибками.

При расчёте переходных процессов часто допускает методические неточности, применяет шаблонные приёмы без глубокого анализа.

Слабо ориентируется в особенностях различных типов электротехнического оборудования, имеет затруднения при интерпретации результатов расчётов.

Выполняет лабораторные и проектные задания с существенными ошибками, требует постоянной помощи преподавателя.

Теоретические знания фрагментарны, допускает путаницу в терминах и не всегда корректно отвечает на вопросы.

Некоторые задания выполнены не в полном объёме либо с серьёзными методическими упущениями.

Компетенция ПК-3 сформирована на минимальном уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он:

Не способен корректно объяснить физику переходных процессов и основные проблемы аварийных режимов в электроэнергетике.

Практически не использует нормативные документы при расчётах переходных процессов, не понимает их назначения и содержания.

Не владеет методами расчёта переходных процессов, допускает критические ошибки в базовых вычислениях, не может объяснить логику своих действий.

Не разбирается в принципах работы электротехнического оборудования, не понимает сути расчётных показателей и не способен интерпретировать результаты даже простых заданий.

Не усвоил теоретический материал, не может ответить на базовые вопросы по курсу.

Подавляющее большинство заданий не выполнено либо выполнено формально, без понимания.

Компетенция ПК-3 не сформирована.

2. Описание шкалы оценивания

Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя устный ответ на практическом занятии по предложенным вопросам.

Для подготовки к данному оценочному мероприятию необходимо изучить рекомендованную основную и дополнительную литературу, материалы интернет-ресурсов, ознакомиться с медиа-текстами.

При проверке задания, оцениваются степень владения теоретическим материалом, умение применять теоретические знания на практике. Умение грамотно, аргументировано и непротиворечиво излагать теоретический материал и собственные суждения, оценки, примеры.

Оценочный лист

Тема занятия:				
		Базовый уровень	Повышенны	

№	ФИО студента					й уровень		
		Степень владения теоретическим материалом (0-5 баллов)	Примеры (0-5 баллов)	Уровень аргументации (0-5 баллов)	Собственная точка зрения (0-5 баллов)	Апелляция к самостоятельно найденным научным источникам (0-5 баллов)	Сумма баллов	Итоговая оценка

Тесты

Номер задания	Правильный ответ	Содержание вопроса
1.	b	Что называют в расчетах максимальным мгновенным значением полного тока КЗ? а) мгновенный ток КЗ б) ударный ток КЗ в) мгновенную силу тока г) частоту тока
2.	a	Возможно ли охарактеризовать машину в начальный момент переходного процесса реактивностью рассеивания статора? а) не возможно б) возможно в) возможно в начальный момент пуска статора г) возможно охарактеризовать перед выключением
3.	d	Что означает это выражение $I_{kA1} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$? а) ток обратной последовательности б) ток вертикальной последовательности в) ток горизонтальной последовательности г) ток прямой последовательности
4.	b	Выберите выражение для определения тока прямой последовательности для несимметричного короткого замыкания: а) $I_{KA} = \frac{X_{\varnothing}}{E_{\varnothing}} \cdot I_B, \text{кА}$ б) $I_{KA} = \frac{E_{\varnothing}}{j(X_{\varnothing} + \varphi X)}, \text{кА}$ в) $I_{KA} = \frac{E_{\varnothing}}{X_{\varnothing}} \cdot I_B, \text{кА}$ г) $I_{KA} = \frac{I_{Ka}}{I_B}, \text{кА}$
5.	a	Как определяется коэффициент затухания

Номер задания	Правильный ответ	Содержание вопроса
		a) $\frac{X_{\Sigma}}{\omega r_{\Sigma}}$ b) $\frac{1}{3} X_{\Sigma}$ c) $\sqrt{2} I_{n.o}^{(3)}$ d) $\sqrt{3} I_{n.o}^{(3)}$ e) $\frac{E''}{\sqrt{3} U_{\delta}}$
6.	d	Определить максимально возможный ток за трансформатором $S_H = 80$ МВА; $U_1 = 115$ кВ; $U_2 = 6.3$ кВ; $U_k = 10.5\%$ a) 7 кА b) 70 А c) 7 А d) 700 А e) 70 кА
7.		Какие расчетные параметры для генераторов необходимо задать в ПК RastrWin3 для расчетов токов КЗ?
8.		Какие расчетные параметры для трансформаторов необходимо задать в ПК RastrWin3 для расчетов токов КЗ?
9.		Какие расчетные параметры для ЛЭП необходимо задать в ПК RastrWin3 для расчетов токов КЗ?
10.		Перечислите способы моделирования взаимоиндукции ЛЭП в ПК RastrWin3.
11.		Перечислите способы расчета токов КЗ в ПК RastrWin3.
12.		Какие основные расчетные параметры необходимо разместить на графическом изображении модели для расчетов токов КЗ?
13.		Назовите последовательность действий при одиночном расчете токов КЗ в ПК RastrWin3.
14.		Назовите последовательность действий при пакетном расчете токов КЗ в ПК RastrWin3.
15.		Назовите последовательность действий при создании модели расчета токов КЗ из модели расчета установившегося режима.
16.	d	Какой начальный переходной ток будет у явно полюсной синхронной машины? a) будет только поперечный. b) будет продольный и поперечный. c) будет только продольный. d) начального переходного тока не будет вообще
17.		Как передать нанесенный на графику результата расчета во внешнюю программу?
18.		Из каких программ возможен импорт данных в RastrWin3?
19.		Как провести расчет тока в грозотросе в RastrWin3?
20.		Как осуществить генерацию примерной схемы нулевой и обратной последовательностей по данным прямой?
21.		Как произвести расчет поперечного шунта КЗ в RastrWin3?

Номер задания	Правильный ответ	Содержание вопроса
22.		Как произвести расчет продольного шунта КЗ в RastrWin3?
23.		Как произвести расчет расщепление ветви и ввод шунта в произвольной точке линии?
24.		Как произвести редактирование групп магнитосвязанных ветвей нулевой последовательности?
25.		С какой целью задаются точки КЗ на графической схеме?
26.		Как произвести расчет постоянной времени затухания апериодической составляющей трехфазного короткого замыкания в RastrWin3?
27.		Как произвести расчет ударного тока трехфазного короткого замыкания в RastrWin3?
28.		Как получить данные для расчета из файла расчета режима "режим.rg2" в RastrWin3?
29.		Как производится выставление настроек графики для расчета токов короткого замыкания в RastrWin3?
30.	a	Нумерация элементов в RastrWin3 возможна от 1 до ... a) 2 147 483 647 b) 4 294 967 296 c) 1 073 741 824 d) 2 097 152 e) 268 435 456
31.	c	Файл режима RastrWin3 имеет расширение a) grf2 b) grf c) rg2 d) rg
32.	b	Файл графики RastrWin3 имеет расширение a) grf2 b) grf c) rg2 d) rg
33.	b	Столбец s0 таблицы узлов RastrWin3 служит для указания a) начальной мощности узла b) состояние узла в нулевой последовательности c) закорочен ли узел на землю в нулевой последовательности d) реактивной проводимости шунта нулевой последовательности на землю
34.	c	Столбец tip0 таблицы узлов RastrWin3 служит для указания a) начальной мощности узла b) состояние узла в нулевой последовательности c) закорочен ли узел на землю в нулевой последовательности d) реактивной проводимости шунта нулевой последовательности на землю
35.	a, c	Для расчета постоянной времени затухания апериодической составляющей RastrWin3 использует формулы из a) РД 153-34.0-20.527-98 b) ГОСТ 27.301-95 c) ГОСТ Р 52735-2007 d) ГОСТ 28249-93 e) ГОСТ 32144-2013

Номер задания	Правильный ответ	Содержание вопроса
36.	a, d	Для расчета ударного RastrWin3 использует формулы из a) РД 153-34.0-20.527-98 b) ГОСТ 27.301-95 c) ГОСТ Р 52735-2007 d) ГОСТ 28249-93 e) ГОСТ 32144-2013

Критерии оценивания компетенций

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он правильно выполнил 88-100 % тестовых заданий

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он правильно выполнил 72-87 % тестовых заданий

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он правильно выполнил 53-71 % тестовых заданий

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он правильно выполнил менее 53 % тестовых заданий

Список источников для выполнения СРС

Перечень основной литературы

1. Кудряков, А. Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник / А. Г. Кудряков, В. Г. Сазыкин. — Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. — 263 с. — ISBN 978-5-4486-0027-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/70289.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: <https://doi.org/10.23682/70289>
2. Аксютин, В. А. Переходные процессы в электрических цепях : учебное пособие : [16+] / В. А. Аксютин ; Новосибирский государственный технический университет. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. — 112 с. : ил., табл., схем., граф. — Режим доступа: по подписке. — URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=576104>. — Библиогр. в кн. — ISBN 978-5-7782-3379-9. — Текст : электронный.

Перечень дополнительной литературы

1. Пилипенко, В. Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебно-методическое пособие / В. Т. Пилипенко. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. — 124 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/33671.html>. — Режим доступа: для авторизир. Пользователей.
2. Котова, Е. Н. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебно-методическое пособие / Е. Н. Котова, Т. Ю. Паниковская. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. — 216 с. — ISBN 978-5-7996-1254-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/68522.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей
3. Переходные процессы в электрических системах: сборник задач / Д. В. Армеев, Е. П. Гусев, А. П. Долгов [и др.] ; отв. за вып. В. М. Левин ; Новосибирский государственный технический университет. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. — 331 с. : табл., граф., схем. — Режим доступа: по подписке. — URL:

<https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436254>. – Библиогр.: с. 310. – ISBN 978-5-7782-2498-8. – Текст : электронный.

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы». Ставрополь: СКФУ, 2025.
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы». Ставрополь: СКФУ, 2025.
3. Методические указания по выполнению расчетно-графической работы по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы». Ставрополь: СКФУ, 2025.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. <http://catalog.ncfu.ru> – электронные каталоги Ассоциации электронных библиотек учебных заведений и организаций СКФО.
2. <http://www.biblioclub.ru> – электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн».
3. <http://www.iprbookshop.ru/> – ЭБС «IPRbooks».

