

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Расчет токов при коротких замыканиях в электрических системах

Методические указания к курсовой работе по дисциплине
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»

Составитель:
Г.П. Колесник

Владимир 2016

УДК.621.311
ББК 22.332

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Биотехнические и электронные системы и технологии»,
Владимирского государственного университета
В.С. Грибакин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Расчет токов при коротких замыканиях в электрических системах
(Электронный ресурс). Методические указания к курсовой работе по дисциплине «**Переходные процессы в электроэнергетических системах**». / Составитель Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. 2016. 69 с.

Содержат методические указания к выполнению курсовой работы по анализу поперечной несимметрии электрической системы как составной части расчета переходных режимов электроэнергетических систем, в частности по расчету симметричного металлического трехфазного короткого замыкания и возможных несимметричных коротких замыканиях по графоаналитическому методу спрямленных характеристик.

Методические указания составлены в соответствии с Федеральным Государственным образовательным стандартом для студентов четвертого курса бакалавриата направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Табл.22. Ил. 18. Библиогр.: 8 назв.

УДК 621.311
ББК 22.332

ISBN

©Владимирский государственный
университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Методические указания по выполнению курсовой работы на тему: «Расчет токов при коротких замыканиях в электрических системах».....	6
1.1. Содержание курсовой работы.....	6
1.2. Требования к оформлению курсовой работы.....	8
1.3. Исходные данные к курсовой работе.....	8
2. Методические указания по выполнению расчетов токов КЗ.....	20
2.1. Расчет тока трехфазного симметричного металлического короткого замыкания.....	20
2.1.1 Составление схемы замещения.....	20
2.1.2. Расчет параметров схемы замещения электрической системы в относительных единицах.....	21
2.1.3. Особенности преобразования схем замещения.....	26
2.1.4. Расчет тока и мощности короткого замыкания для произвольного момента времени.....	27
2.1.5. Алгоритм расчета тока КЗ по методу спрямленных характеристик.....	29
3. Расчет токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях.....	31
4. Примеры расчета параметров режима электрической системы.....	31
5. Контрольные вопросы.....	59
6. Приложения.....	62
Библиографический список.....	69

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая система, как часть электроэнергетической системы, представляет собой широко разветвленную сеть источников электромагнитной энергии (генераторов) и потребителей этой энергии (нагрузок), соединенных между собой передачами.

Работа электрической системы характеризуется режимом и параметрами электрической системы, т. е. значениями мощности, частоты, напряжений в узловых точках сети и значениями токов, протекающих по её элементам и электрическими параметрами элементов системы.

Количественный показатель работы электрической системы – это вырабатываемая мощность, но со стороны потребителя качество вырабатываемой энергии характеризуется неизменными (в пределах допусков установленных стандартами) значениями напряжения и частоты.

Процесс изменения режима и параметров системы и связанное с этим изменение количества энергии можно рассматривать как ряд процессов в нелинейной системе, каждый из которых отражает изменение определённой группы параметров режима одновременно во времени и пространстве (распространение волн напряжения вдоль длинных линий, кабелей или обмоток электрических машин и трансформаторов). Поэтому при решении задачи переходного процесса обычно вводят ряд допущений, поскольку расчет с учетом всех условий и факторов практически невыполним. Допущения зависят от характера и постановки самой задачи и касаются преимущественно возможности использования упрощенных представлений об изменении свободных токов в сложных схемах с несколькими источниками, а также получения линейной схемы замещения электрической системы.

Аварийные переходные процессы возникают вследствие каких-либо резких изменений параметров электрической системы, обуславливающих изменение параметров режима, (изменение схемы соединения элементов системы, отключение агрегатов и линий электропередачи, несущих значительные нагрузки, при коротких замыканиях (КЗ) в элементах системы и последующим их отключении). Следствием больших возмущающих воздействий на систему являются электромеханические переходные процессы, которые протекают настолько медленно (по сравнению с частотой 50 Гц), что вместо мгновенных значений параметров режима можно рассмат-

ривать изменение их огибающих. Более детально аварийные и нормальные переходные процессы можно классифицировать исходя из изменений основных параметров режима – изменений мощности и скорости вращения роторов электрических машин. При этом решается вопрос выбора оборудования электрической системы для осуществления нового режима и обеспечения его устойчивости.

При выборе оборудования и проверке его по условиям короткого замыкания расчет токов КЗ обычно проводится по инженерным методикам приближенно, но погрешность расчета с учетом принятых допущений не должна превышать 10 – 15 %. С учетом вероятностного характера короткого замыкания и дискретности параметров оборудования отметим вероятностный характер совокупности параметров режима короткого замыкания и множественность детерминированных параметров оборудования. Поэтому задача анализа токов при коротком замыкании включает в себя задачу сопоставления вероятностных параметров режима КЗ с детерминированными параметрами электрооборудования.

Расчетные условия КЗ это вероятные условия короткого замыкания наихудшего случая и включают в себя расчетную схему электроустановки, расчетный вид КЗ, расчетную точку и расчетную продолжительность КЗ.

Основные допущения направлены на линеаризацию схемы замещения электрической системы, не противоречат действующим Государственным стандартам и Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) при этом:

- не учитываются насыщения магнитных систем электрических машин и электротехнических устройств, а также токи намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов (эти факторы учитываются при расчете устойчивости электроэнергетической системы в балансе мощности);

- частота питающего напряжения остается синхронной, а векторы ЭДС всех источников энергии принимаются синфазными, качания генераторов при электромагнитном переходном процессе длительностью менее 0,5 секунды отсутствуют;

- условно пренебрегают активными сопротивлениями элементов системы, если у них $R/X < 1/3$;

- учитываются активные сопротивления элементов электрической системы и переходные сопротивления всех соединений при расчете аperiodических составляющих токов КЗ, при расчете токов КЗ в сетях до 1 кВ и при учете электрической дуги в месте короткого замыкания;

- не учитывается распределенная поперечная емкость воздушных линий при их длине менее 200 км для напряжений 110 – 220 кВ и менее 150 км для напряжений 330 – 750 кВ;

- нагрузки учитываются приближенно эквивалентным неизменным сопротивлением, зависящим от их состава, кроме случаев задания нагрузки статическими характеристиками;
- условно принимают симметричность всех элементов схемы, за исключением места КЗ.

1. Методические указания по выполнению курсовой работы на тему: «Расчет токов при коротких замыканиях в электрических системах»

1.1. Содержание курсовой работы.

Для работы над курсовой работой (КР) студент получает конкретное индивидуальное задание. Работа над КР предполагает выполнение определенной последовательности этапов.

- Анализ технического задания;
- Подбор и анализ литературы по теме КР;
- Проведение необходимых расчетов по теме КР, в том числе с применением ПЭВМ;
- Окончательное оформление КР выполнить в соответствии с требованиями ГОСТ ЕСКД – Единой системы конструкторской документации.

Вариант задания по расчету тока трехфазного металлического симметричного короткого замыкания выбирается по табл. 2 и номеру студента в журнале или задается преподавателем. Расчетная схема электрической системы составляется с учетом замкнутых выключателей в ветвях в соответствии вариантом задания.

Для составленной по заданному варианту расчетной схемы необходимо:

1. На основании исходных данных о составе и параметрах оборудования (расчетная схема на рис. 1 и данных табл. 3 – табл. 11) и дополнительных указаний в задании составить схему замещения электрической системы, в которую все генераторы вводятся источником ЭДС за реактивностью, с учетом принятых допущений. Предполагается, что все генераторы в исходном аварийном режиме работают в режиме предельного возбуждения (режим подъема возбуждения);

2. По вычисленному значению *приведенного времени* определить по графикам расчетных кривых (рис. 2 и рис. 3) значение электродвижущей силы и реактивности заданных типов генераторов тепловых и гидравлических станций в относительных единицах;

3. Определить, с учетом заданного значения тока возбуждения генераторов каждой станции, значение общей для всей системы базисной

мощности, базисных напряжений и токов для всех ступеней трансформации системы и привести параметры элементов схемы замещения к базисным условиям;

4. Вычислить действующее значение периодической составляющей суммарного тока КЗ при симметричном трехфазном металлическом КЗ в заданной точке по методу спрямленных характеристик для момента времени $t = 1\text{с}$ и рассчитать мощность КЗ для этого же момента времени;

5. Вычислить токи в ветвях электрической системы в режиме расчетного короткого замыкания и определить по значению токов в генерирующих ветвях режимы работы генераторов. В случае несовпадения начального режима генератора станции (режим предельного возбуждения) с расчетным (например, режим нормального напряжения) скорректировать схему замещения генератора (в режиме нормального напряжения реактивность генератора принять равной нулю) и схему замещения электрической системы, а также провести уточняющий расчет тока короткого замыкания в заданной точке при нулевой реактивности i -генератора);

6. Составить схемы замещения электрической системы для прямой, обратной и нулевой последовательностей с учетом группы соединения всех обмоток трансформаторов системы и вычислить аналитическим методом симметричных составляющих, при заданном по варианту несимметричном КЗ, действующее значение полного тока заданной ветви для момента времени $t = 0$;

7.

Примечание к пунктам 4 – 6: выбранные условные положительные направления токов и напряжений ветвей (скалярные величины) сохранять неизменными до конца расчета.

8. Проработать варианты ответов на контрольные вопросы.

9. Курсовую работу оформить в виде пояснительной записки на листах формата А4 с подробным изложением хода расчета и промежуточных преобразований схем замещения и расчетных соотношений. Формулы набирать в математическом редакторе WORD, рисунки в графическом редакторе Paint.

Вид несимметричного КЗ выбирается по таблице 1 согласно первой букве фамилии студента.

Таблица 1

Начальная буква фамилии студента	А - Б	В - Г	Д - Ж	И - К	Л - Н	О - С	Т - Ч	Щ - Я
Вид несимметричного короткого замыкания (шифр)	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$

1.2. Требования к оформлению курсовой работы

Курсовая работа выполняется в виде расчетно-пояснительной записки, содержащей также и графическую часть (схемы электрических соединений, схемы замещения, векторные диаграммы).

В начале работы необходимо привести задание, исходные данные согласно варианту. Последовательность выполнения работы должна соответствовать пункту 2.1. По ходу выполнения работы приводить необходимые схемы с обозначениями на них всех необходимых величин. Схемы нумеруются и выполняются в соответствии с ГОСТ ЕСКД.

Расчеты должны сопровождаться формулами в буквенном виде с последующей подстановкой в них числовых значений. Все вычисления выполняются с округлением результата до трех цифр после запятой и более в зависимости от числа нулей после запятой перед значащей цифрой.

Курсовая работа должна быть тщательно оформлена. К выполнению работы следует приступать после изучения теории вопроса.

Текст пояснительной записки пишется чернилами (пастой, гелем, тушью) или печатается на принтере без помарок и сокращений, на листах формата А4 (записи делаются только с одной стороны) с обязательным оставлением полей: слева – 25 мм., справа – 20 мм., сверху и снизу по 25 мм.

Единицы применяемых величин должны приводиться в Международной системе единиц (СИ), а их обозначения должны соответствовать стандарту.

При использовании методик, формул, графиков и других материалов, взятых из литературных источников, необходимо делать ссылку на литературный источник в соответствии с ГОСТ 7.1–84.

Список литературы составляется в соответствии с правилами библиографического описания произведений печати в соответствии с ГОСТ 7.1–84.

Оформление титульного листа выполнить в соответствии с образцом Приложения 2.

При переработке курсовой работы с учетом замечаний рецензента (преподавателя) исходный вариант с замечаниями представляется вместе с новым исправленным вариантом.

При нарушении данных правил работы к рассмотрению и рецензированию не принимаются.

1.3. Исходные данные к курсовой работе

По номеру варианта, указанному преподавателем, составляется расчетная схема, используя для этого общую схему электроснабжения, показанную на рис. 1, таблицу вариантов с указанием положения выключате-

лей и точки КЗ (табл. 2), исходные данные из табл. 3 - табл. 11 и значения параметров элементов расчетной схемы.

Примечания:

1. Точки КЗ (рис. 1) К41 – К58 находятся на середине соответствующих линий.

2. Все генераторы снабжены автоматической регулировкой возбуждения (АРВ) сильного действия.

3. Все линии электропередачи (ЛЭП) одноцепные со стальным грозозащитным тросом.

4. Тип магнитной системы трансформатора студент выбирает самостоятельно, а группа соединения обмоток трансформаторов задается вариантом (выбирается в соответствии с номинальным напряжением оборудования).

Для анализа режима короткого замыкания необходимо по паспортным данным завода-изготовителя или по справочным данным установить следующие параметры оборудования:

1. Синхронные машины:

- номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, МВт;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям $X''_{d\text{ном}}$ и $X''_{q\text{ном}}$ в о.е.;
- индуктивное сопротивление обратной последовательности $X_{2\text{ном}}$ в о.е.;
- индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0\text{ном}}$ в о.е.;
- номинальный ток возбуждения $I_{f\text{ном}}$, А;
- предельный ток возбуждения $I_{f\text{пр}}$, А;
- номинальная постоянная времени цепи возбуждения T_{f0} , с.

2. Асинхронные электродвигатели:

- номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, МВт;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$;
- кратность пускового тока/(максимального момента) по отношению к номинальному току/моменту $I_{\text{п}}$ и $b_{\text{ном}}$;
- коэффициент полезного действия η .

3. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы:

- номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, МВт;
- номинальные напряжения обмоток $U_{i \text{ ном}}$ и фактические коэффициенты трансформации;
- напряжение короткого замыкания u_k %;
- потери короткого замыкания ΔP_k , кВт.

4. Токоограничивающие реакторы:

- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- номинальный ток $I_{\text{ном}}$, А;
- номинальное индуктивное сопротивление в о.е. $X_{p, \text{ном}}$ или сопротивление в именованных единицах X_p , Ом, или реактивность реактора X_p , %;
- потери мощности на фазу при номинальном токе ΔP , кВт.

5. Воздушные линии электропередачи:

- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- длина линии l , км;
- сечение провода S , мм², и количество проводов в фазе;
- удельное (погонное) индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1 \text{ пог}}$, Ом/км;
- удельное (погонное) индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0 \text{ пог}}$, Ом/км;
- удельное (погонное) активное сопротивление (при рабочей температуре) $R_{\text{пог}}$, Ом/км;
- удельные (погонные) индуктивные сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности от других линий (при наличии нескольких воздушных линий на одной трассе) $X_{m0 \text{ пог}}$, Ом/км;
- удельная емкостная проводимость $b_{\text{пог}}$, См/км;
- расстояние между фазами a , м.

6. Кабельные линии:

- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- длина кабельной линии l , км;
- сечение жилы кабеля S , мм², материал жил и число параллельно включенных кабелей;
- удельное (погонное) индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1 \text{ пог}}$, Ом/км;
- удельное (погонное) индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0 \text{ пог}}$, Ом/км;

- удельное (погонное) активное сопротивление (при рабочей температуре) $R_{\text{пог}}$, Ом/км;

7. Токопроводы и шинопроводы:

- удельное (погонное) индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1\text{ пог}}$, Ом/км;

- удельное (погонное) индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0\text{ пог}}$, Ом/км;

- удельное (погонное) активное сопротивление (при рабочей температуре) $R_{\text{пог}}$, Ом/км;

- длина токопровода или шинопровода ℓ , м

Таблица 2

Варианты задания

Номер варианта	Выключатели включены	Точка КЗ	Номер варианта	Выключатели включены	Точка КЗ
1	2	3	1	2	3
1	B1 – B5, B6 – B9, B14 – B16, B74 – B79, B11,	K-1	26	B34 – B40, B6 – B9, B1 – B4, B45 – B49, B18, , B13 – B15, B25, B27, B42,	K-2
2	B1 – B4, B65 – B72, B75 – B80, B11 – B12,	K-38	27	B34 – B38, B6 – B10, B76 – B79, B57 – B62, B18, B25, B16, B74, B54, B73, B26, B53	K-37
3	B1 – B5, B65 – B72, B75 – B82, B11 – B12,	K-46	28	B54 – B63, B66 – B71, B76 – B79, B73, B72	K-48
4	B1 – B4, B11, B13, B42 – B51, B54, B57 – B61, B73, B75 – B79	K-12	29	B1 – B5, B6 – B9, B14 – B16, B11, B74 – B79	K-4
5	B1 – B4, B67 – B70, B56 – B61, B45 – B51, B12, B65, B55, B63, B43, B13, B42	K-28	30	B1 – B4, B65 – B72, B75 – B80, B11 – B12,	K-5
6	B1 – B9, B28 – B32, B67 – B70, B12, B65, B22, B64, B19, B20, B14, B15	K-34	31	B1 – B5, B65 – B72, B75 – B82, B11 – B12,	K-41
7	B1 – B9, B45 – B50, B28 – B32, B13 – B15, B42, B41, B19 – B21,	K-14	32	B1 – B9, B45 – B50, B28 – B32, B13 – B15, B42, B41, B19 – B21,	K-15
8	B1 – B4, B6 – B11, B75 – B79, B14, B15, B17, B52, B57 – B61, B73, B54,	K-6	33	B1 – B9, B45 – B50, B28 – B32, B13 – B15, B42, B41, B19 – B21,	K-15
9	B1 – B9, B13 – B15, B42, B45 – B50, B34 – B38, B27, B40, B18, B25,	K-18	34	B1 – B4, B6 – B11, B75 – B79, B14, B15, B17, B52, B57 – B61, B73, B54,	K-9
10	B1 – B4, B67 – B71, B57 – B61, B6 – B9, B12, B65, B55, B63, B17, B52, B14, B15	K-10	35	B1 – B9, B13 – B15, B18, B42, B45 – B50, B34 – B38, B27, B40, B25,	K-20
11	B6 – B10, B76 – B79, B57 – B62, B16, B74, B54, B73, B17, B52	K-39	36	B6 – B10, B57 – B62, B34 – B38, B17, B52, B26, B53, B18, B25	K-27
12	B6 – B10, B76 – B79, B67 – B70, B57 – B61, B16, B74, B81, B66, B63, B55, B14, B15	K-35	37	B6 – B10, B57 – B62, B34 – B38, B28 – B32, B17, B52, B26, B53, B83, B84, B19, B20	K-21

Продолжение таблицы 2

13	B6 – B10, B57 – B62, B34 – B38, B17, B52, B26, B53, B18, B25	K-29	38	B6 – B10, B57 – B62, B45 – B52, B34 – B38, B17, B43, B27, B40, B18, B25	K-49
14	B6 – B10, B57 – B62, B34 – B38, B28 – B32, B17, B52, B26, B53, B83, B84, B19, B20	K-17	39	B6 – B9, B28 – B33, B66 – B70, B76 – B79, B19, B20, B22, B64, B72, B16, B74	K-44
15	B6 – B10, B57 – B62, B45 – B52, B34 – B38, B17, B43, B27, B40, B18, B25	K-30	40	B6 – B9, B28 – B33, B64 – B70, B1 – B4, B19, B20, B22, B12, B14, B15	K-42
16	B6 – B10, B57 – B62, B45 – B52, B28 – B32, B17, B43, B21, B41, B19, B20	K-24	41	B6 – B10, B28 – B33, B45 – B49, B1 – B4, B19 – B21, B13 – B15, B41, B42	K-56
17	B6 – B9, B28 – B33, B66 – B70, B76 – B79, B19, B20, B22, B64, B72, B16, B74	K-3	42	B27 – B38, B45 – B50, B83, B84, B40, B21, B41	K-54
18	B6 – B9, B28 – B33, B64 – B70, B1 – B4, B19, B20, B22, B12, B14, B15	K-33	43	B28 – B33, B67 – B70, B57 – B61, B45 – B49, B22, B64, B55, B63, B43, B51, B21, B41	K-49
19	B6 – B10, B28 – B33, B45 – B49, B1 – B4, B19 – B21, B13 – B15, B41, B42	K-11	44	B34 – B39, B45 – B51, B57 – B61, B26, B53, B43, B27, B40	K-57
20	B6 – B10, B28 – B33, B34 – B38, B18 – B20, B23 – B25	K-8	45	B34 – B38, B44 – B51, B57 – B61, B26, B53, B43, B27, B40	K-58
21	B27 – B38, B45 – B50, B83, B84, B40, B21, B41	K-25	46	B34 – B39, B6 – B9, B57 – B62, B18, B25, B17, B52, B26, B53	K-53
22	B28 – B33, B67 – B70, B57 – B61, B45 – B49, B22, B64, B55, B63, B43, B51, B21, B41	K-31	47	B34 – B40, B6 – B9, B57 – B62, B45 – B49, B18, B25, B17, B52, B43, B51, B27	K-56
23	B34 – B38, B44 – B51, B57 – B61, B26, B53, B43, B27, B40	K-19	48	B1 – B4, B11, B13, B42 – B51, B54, B57 – B61, B73, B75 – B79	K-52
24	B34 – B39, B6 – B9, B57 – B62, B18, B25, B17, B52, B26, B53	K-26	49	B1 – B5, B67 – B70, B57 – B61, B45 – B51, B12, B65, B55, B63, B43, B13, B42	K-50
25	B34 – B40, B6 – B9, B57 – B62, B45 – B49, B18, B25, B17, B52, B43, B51, B27	K-7	50	B1 – B9, B28 – B32, B67 – B70, B12, B65, B22, B64, B19, B20, B14, B15	K-51

Таблица 3.

Параметры системы

Номер варианта	Система							
	Мощность выключателя МВА·10 ³							
	B5	B10	B33	B39	B44	B56	B71	B80
1, 3, 7, 9, 29, 31, 32, 33, 35, 49, 50	1,2	-	-	-	-	-	-	-
11 – 16, 19, 20, 27, 34, 36 – 38, 41	-	1,6	-	-	-	-	-	-
17 – 22, 39 – 43	-	-	2,0	-	-	-	-	-
24 – 26, 44, 46, 47	-	-	-	2,2	-	-	-	-
4, 6, 23, 45, 48	-	-	-	-	2,4	-	-	-
5	-	-	-	-	-	2,6	-	-
2, 10, 28, 30	-	-	-	-	-	-	2,8	-
2, 3	-	-	2,0	-	-	-	-	3,0

Таблица 4.

Параметры генераторов

Номер варианта	Генераторы ТЭЦ		Генераторы ГЭС	
	тип	кол-во	тип	кол-во
1, 7, 29, 32, 33, 35, 49	ТВВ-1000-4У3	3	ВГСФ 930/233-30	4
3, 9, 31, 33, 50	ТВВ-160-2ЕУ3	8	ВГСВФ 940/235-30	5
11, 13, 15, 19, 27, 34, 37, 41	ТВВ-220-2ЕУ3	6	ВГДС 1025/245-40	6
12, 14, 16, 20, 36, 38	ТВВ-320-2ЕУ3	6	ВГС 1190/215-48	4
17, 19, 21, 39, 41, 43	ТВВ-500-2ЕУ3	4	СВ – 835/180-36	7
18, 20, 22, 40, 42	ТВВ-800-2ЕУ3	5	СВ – 1500/200-88	5
24 – 26, 44, 46, 47	ТВВ-1000-2У3	3	СВ-855/235-32	3
4, 6, 23, 45, 48	ТВВ-1200-УУ3	4	СВ-1430/175-72Г	6
3, 5, 25	ТГВ-300-2	7	СВ-1260/235-60Г	6
2, 10, 28, 30	ТГВ-500-2	5	СВ-1130/250-48	4

Таблица 5

Параметры реакторов

Вариант	P1 – P4	P5 – P8	P3	P4
1-50	ТОРМ-220-324-12	ТОРМ-220-325-12	РГСТГ-220-1000-14,5 У1	РГСТГ-220-1000-16,7 У1

Таблица 6

Типы синхронных компенсаторов

Номер варианта	СК1	СК2
1-50	КСВБО-160-15У1	КСВБ-160-15У1

Таблица 7

Параметры трансформаторов ТЭЦ и ГЭС

Номер варианта	Трансформаторы ТЭЦ		Трансформаторы ГЭС	
	тип	кол-во	тип	кол-во
1, 7, 29, 32, 33, 35, 49	ТНЦ-1000000/220	3	ТДЦ-250000/220	4
3, 9, 31, 33, 50	ТЦ-160000/220	8	ТДЦ-250000/220	5
11, 13, 15, 19, 27, 34, 37, 41	ТДЦ-250000/220	6	ТДЦ-250000/220	6
12, 14, 16, 20, 36, 38	ТДЦ-400000/220 У1	6	ТДЦ-250000/220	4
17, 19, 21, 39, 41, 43	ТЦ-630000/220	4	ТДЦ-200000/220	7
18, 20, 22, 40, 42	ТНЦ-1000000/220 У1	5	ТДЦ-200000/220	5
24 – 26, 44, 46, 47	ТНЦ-1000000/220	3	ТДЦ-250000/220	3
4, 6, 23, 45, 48	ТНЦ-630000/220	4	ТДЦ-200000/220	6
3, 5, 25	ТДЦ-400000/220 У1	7	ТДЦ-250000/220	6
2, 10, 28, 30	ТНЦ-630000/220	5	ТДЦ-250000/220	4

Таблица 8

Параметры трансформаторов

Обозначение на схеме	Тип	Полная мощность, МВА	Напряжение обмотки, кВ		Потери, кВт	
			ВН	НН	Холостого хода	Короткого замыкания
T1	ТД-80000/220	80	242	10,5	79	315
T3	ТДЦ-250000/220	250	230	15,75	70	265
T4	ТРДН-32000/220	32	242	6,6-6,6	45	150
T6	ТДЦ-250000/220	250	230	15,75	70	265
T7	ТДЦ-125000/220	125	242	10,5	120	380
T9	ТРДНС-40000/220	40	230	6,3-6,3	50	170
T12	ТРДН-63000/220	63	230	11-11	70	265
T13	ТРДНС-40000/220	40	230	6,3-6,3	50	170
T15	ТДТН-40000/220	40	230	11	55	220
T16	ТДЦ-125000/220	125	242	10,5	120	380
T17	ТРДЦН-160000/220	160	230	11-11	155	500
T19	ТДЦ-200000/220	200	242	18	130	660

Таблица 9

Параметры ЛЭП.

Линия	Длина линии по номеру варианта, км									
	1, 2, 3, 4, 8, 29, 30, 31, 34, 48	1, 6-10, 12, 18, 19, 26, 29, 32-35, 40, 41 50	6, 7, 14, 16-20, 32, 33, 37, 39-41, 50	1, 11, 12, 17, 27, 29, 39	4, 11, 27, 28, 34, 48	2, 3, 5, 6, 10, 18, 30, 31, 40, 49, 50	2, 3, 28, 30, 31,	31	6, 17, 22, 39, 40, 43, 50	
Л1	100									
Л2		200								
Л3			250							
Л4				180						
Л5					250					
Л6						260				
Л7							130			
Л8								200		
Л9										290
Линия	Длина линии по номеру варианта, км									
	5, 10, 12, 22, 28, 49	4, 5, 7, 9, 19, 26, 32, 33, 35, 41, 48, 49	8, 10, 11, 13-16, 24, 25, 34, 36-38, 46, 47	14, 21, 37, 42	20	9, 13, 15, 24-27, 35, 36, 28, 46, 47	7, 16, 19, 21, 22, 32, 33, 41-43	13, 14, 23, 24, 27, 36, 37, 44-46	9, 15, 21, 23, 25, 26, 35, 38, 42, 44, 45, 47	4, 5, 15, 16, 22, 23, 25, 43-45, 47, 49
Л10	190									
Л11		100								

Продолжение таблицы 9

Л12			300						
Л13				280					
Л14					230				
Л15						170			
Л16							240		
Л17								280	
Л18									250
Л19									210

Таблица 10

Параметры кабельных линий

Номер варианта	Длина кабельной линии, км							
	ЛК1	ЛК2	ЛК3	ЛК4	ЛК5	ЛК6	ЛК7	ЛК8
	Марка МСС. Сечение жилы 625 мм ² Активное сопротивление (на фазу) 0,002846 Ом/км. Реактивное сопротивление 0,195 Ом/км. Номинальная емкость 0,28 мкФ/км	Марка МССА. Сечение жилы 625 мм ² Активное сопротивление (на фазу) 0,002846 Ом/км Реактивное сопротивление 0,195 Ом/км. Номинальная емкость 0,28 мкФ/км	Марка МССК. Сечение жилы 625 мм ² Активное сопротивление (на фазу) 0,002846 Ом/км Реактивное сопротивление 0,195 Ом/км. Номинальная емкость 0,28 мкФ/км	Марка МВДТ. Сечение жилы 625 мм ² Активное сопротивление (на фазу) 0,002846 Ом/км Реактивное сопротивление 0,195 Ом/км. Номинальная емкость 0,28 мкФ/км				
1-50	0,9	1,0	1,11	0,8	0,9	1,1	1,7	1,85

Таблица 11

Параметры нагрузки

Номер варианта	Нагрузка, МВА									
	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Н6	Н7	Н8	Н9	Н10
1-10, 18, 19, 29-31, 33-35, 40, 41, 48-50	30									
1, 8, 9, 11-20, 24-27, 34-41, 29, 46-47		32								
6, 7, 14, 16-22, 40-43, 50			40							
9, 13-15, 23-27, 20, 34, 36-38, 42, 44-47				60						

Продолжение таблицы 11

4, 5, 7, 9, 15, 16, 21, 23, 33, 34, 38, 44, 45, 48, 49					55					
18, 19, 21, 22, 25, 26, 41, 42, 45, 47						45				
13-16, 24, 25, 27, 36-38, 46, 47							70			
8, 11, 13-15, 18, 22-24, 34, 36-38, 40, 43-49								65		
2, 3, 5, 6, 10, 12, 17, 18, 22, 28, 30, 31, 39, 43, 49, 50									80	
1-4, 8, 11, 12, 17, 27-31, 34, 39										75

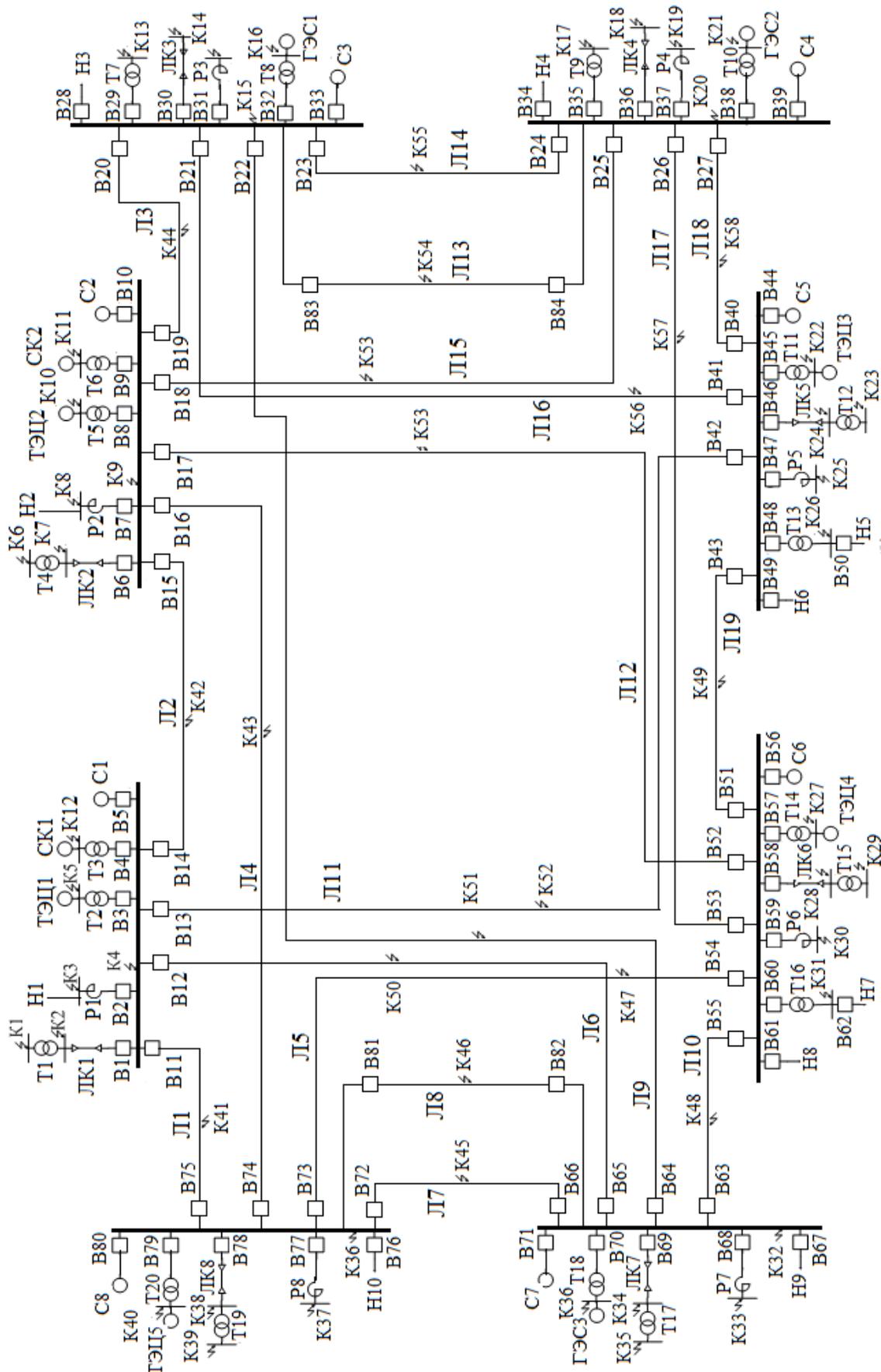


Рис. 1. Расчетная схема электрической системы

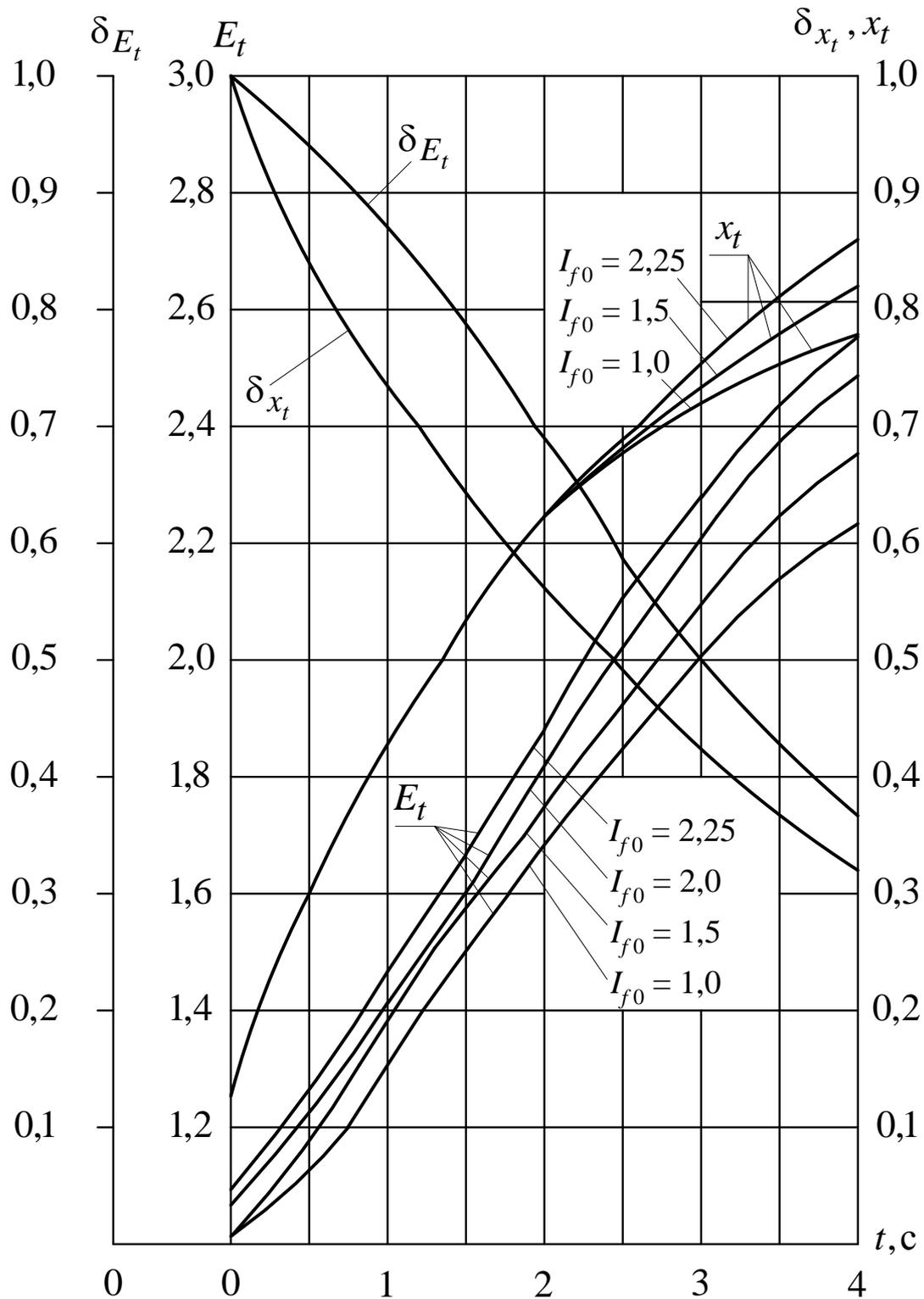


Рис. 2. Графики для определения расчетных значений электродвижущей силы E_t и реактивности x_t турбогенераторов с АРВ в заданный момент времени.

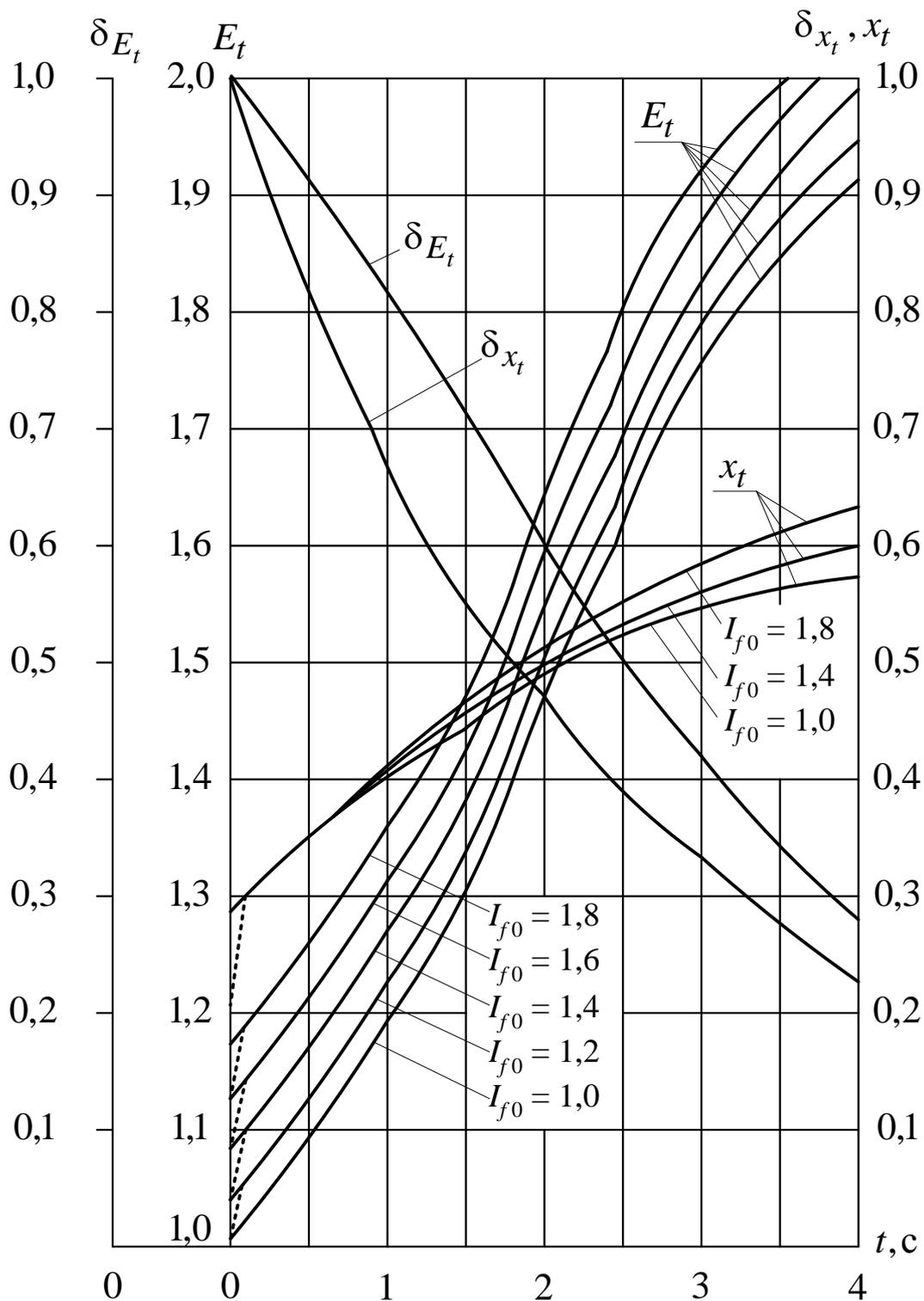


Рис. 3. Графики для определения расчетных значений электродвижущей силы E_t и реактивности x_t гидрогенераторов с АРВ в заданный момент времени.

2. Методические указания по выполнению расчетов токов КЗ

2.1. Расчет тока трехфазного симметричного металлического короткого замыкания.

Целевая задача расчета режима короткого замыкания состоит в определении значений токов, напряжений и мощностей в любом месте электрической сети при аварии, выборе и проверке электрических аппаратов и проводников по условиям КЗ, а также в аналитической проверке режима работы генераторов электростанций, по результатам которой возможно проведение уточняющего расчета. Поэтому в расчетную схему должны быть включены все источники энергии, влияющие на значение тока короткого замыкания: *синхронные генераторы и компенсаторы; синхронные и асинхронные электродвигатели* при мощности последних более 100 кВт при условии отделения их от расчетной точки КЗ токоограничивающим реактором или силовым трансформатором.

При значительной электрической удаленности частей электрической системы их можно представить в виде одного источника энергии с неизменным внутренним сопротивлением, равным эквивалентному сопротивлению заменяемой части системы, и неизменной по амплитуде ЭДС.

2.1.1 Составление схемы замещения

По расчетной схеме системы электроснабжения, составленной по рис. 1 и данным таблицы 3, составляется ее схема замещения (на одну фазу), в которой каждый элемент системы представлен схемой замещения с учетом принятых ограничений. При этом все элементы схемы, по которым возможно протекание тока КЗ, вводятся в схему замещения своими сопротивлениями (полными комплексными для кабельных линий и реактивными для остальных элементов системы), а источники питания – реактивными сопротивлениями и Э.Д.С., значения которых определяются по графикам рис. 2 и рис. 3 для *рассчитанного момента приведенного времени* (предполагается, что режим предельного возбуждения генераторов является исходным).

Всем элементам схемы замещения присваиваются порядковые номера, записанные в виде дроби, знаменатель которой содержит расчетное значение сопротивления элемента (в общем случае комплексное), а числитель – его номер.

Расчетная схема замещения содержит несколько ступеней трансформации. При этом возможны два различных приема составления схем замещения:

1. С исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, принятой за основную, или базисную, ступень;

2. С сохранением трансформаторных связей между различными ступенями напряжения.

В первом случае не приведенными к другому напряжению оказываются только параметры элементов сети и параметры режима (ток и напряжение) базисной ступени трансформации, а параметры элементов параметров режима других ступеней напряжения оказываются измененными, пересчитанных через коэффициенты трансформации промежуточных трансформаторов. Поэтому для получения действительных значений параметров режима и элементов других ступеней трансформации следует проводить обратный пересчет через значения базисных токов и напряжений соответствующих ступеней трансформации.

Во втором случае схемы замещения получатся более сложными, но в результате расчетов получают истинные значения токов и напряжений различных ступеней трансформации. Следует учесть, что при изменении коэффициентов трансформации изменяются только параметры трансформаторов и автотрансформаторов и только эти параметры подлежат пересчету. Расчет при сохранении трансформаторных связей проводится с использованием ЭВМ, а без сохранения трансформаторных связей с использованием формул приведения при аналитических расчетах установившихся режимов и переходных процессов.

2.1.2. Расчет параметров схемы замещения электрической системы в относительных единицах.

Для упрощения теоретических выкладок и придания им более общего характера, значение любой физической величины можно представить не в обычных именованных единицах, а в относительных безразмерных. При этом под относительным значением какой-либо величины понимают ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения.

Для вычисления электрических величин (тока, напряжения, сопротивления, мощности) в относительных единицах необходимо выбрать базисные величины, единые для всей схемы. Базисные величины могут выбираться произвольно, причем каждая базисная величина служит для выражения в относительных единицах как соответствующих полных величин мощности (S), сопротивления (Z), тока (I) так и их активной (P , R , I_a) и реактивной (Q , X , I_p) составляющих.

Если за базисный ток и базисные междуфазные напряжения применить некоторые произвольные величины I_6 и U_6 , то базисная мощность трехфазной системы S_6 и базисное сопротивление определяются по формулам:

$$S_6 = \sqrt{3}U_6 \cdot I_6; \quad Z = U_6 / \sqrt{3} \cdot I_6. \quad (1)$$

Из приведенных формул следует, что только две из четырех базисных величин могут быть выбраны произвольно. Относительные значения Э.Д.С., напряжения, тока, мощности, сопротивления определяются по формулам:

$$E_{*(6)} = E/U_6; \quad U_{*(6)} = U/U_6; \quad I_{*(6)} = I/I_6; \quad S_{*(6)} = S/S_6; \quad Z_{*(6)} = Z/Z_6,$$

где звездочка указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (6) – что она приведена к базисным условиям.

Относительные значения фазных и междуфазных напряжений с учетом соотношений (1) численно одинаковы; равным образом численно одинаковы относительные значения фазной мощности и мощности трех фаз.

Параметры элементов электрической схемы замещения можно выразить в относительных единицах по формулам точного или приближенного приведения к одной ступени трансформации (как правило, это та ступень трансформации, на которой произошла авария). Формулы приближенного приведения применяются в случае отсутствия данных по точным значениям коэффициентов трансформации силовых трансформаторов (это справедливо в случае корректировки выходного напряжения трансформатора под нагрузкой).

Обычно относительные сопротивления элементов задаются при номинальных значениях тока или мощности и напряжения (I_H или S_H и U_H), т.е.

$$Z_{*(6)} = \frac{Z\sqrt{3}}{U_H} I_H \quad \text{и} \quad Z_{*(6)} = \frac{ZS_H}{U_H^2},$$

где Z – заданное сопротивление, Ом на фазу;

I_H, U_H, S_H – соответственно в кА; кВ, МВА.

Если сопротивления (или Э.Д.С.) заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их пересчет к базисным условиям нужно производить по следующим соотношениям:

$$Z_{*(6)} = Z_{*(H)} \frac{I_6 U_6}{I_H U_H}; \quad E_{*(6)} = E_{*(H)} \frac{U_H}{U_6} \quad \text{или} \quad Z_{*(6)} = Z_{*(H)} \frac{S_6 U_H^2}{S_H U_6^2}.$$

При расчете по формулам точного приведения за первую ступень трансформации принимают ступень короткого замыкания и для нее базисные мощность S_6 и напряжение U_{61} . Базисные напряжения других ступеней трансформации выражаются через первое по формулам:

$$U_{62} = U_{61}/K_{1-2}; \quad U_{63} = U_{62}/K_{2-3} \quad \text{и т. д.,}$$

где K_{1-2} и K_{2-3} – коэффициенты трансформации, определяемые как отношение напряжений на выводах трансформатора в направлении от ступени, для которой базисное напряжение известно к той ступени, для которой оно рассчитывается.

Полученные значения U_{62} , U_{63} и т.д. при принятых условиях не должны отличаться от номинальных напряжений соответствующих ступеней трансформации более чем на $\pm(10 \div 15)\%$.

В случае использования *метода расчетных кривых* выбор базисной мощности производится с учетом номинального значения тока возбуждения генератора (множества генераторов), его потолка возбуждения и графиков относительных значений тока возбуждения в следующей последовательности:

- Выражение базисной мощности $S_6 = \sqrt{3}U_6I_6$ записываем с учетом выражения для относительного значения тока возбуждения.

$$I_{*f0(6)} = \frac{I_{f0}}{I_6}; \quad I_6 = \frac{I_{f0}}{I_{*f0}}; \quad I_{*f0} = 1 \div 2,25 \text{ – по графикам, рис. 2 и рис. 3.}$$

Тогда выражение для базисной мощности принимает вид

$$S_6 = \sqrt{3}U_6 \frac{I_{f0}}{I_{*f0}},$$

- Подставляя в полученное выражение базисной мощности минимальное и максимальное значения тока возбуждения генератора (турбоили гидрогенератора) из графиков расчетных кривых рис. 2 и рис. 3 (в относительных единицах (о.е.)) и значение тока возбуждения генератора заданного типа в именованных единицах определим возможный диапазон допустимых значений базисных мощностей конкретного генератора. После подстановки в выражение для базисной мощности минимального и максимального значения тока возбуждения генератора в о. е. (из графиков рис. 2 и 3) получим, например для турбогенератора (ТГ):

$$S_{\delta 1} = \sqrt{3}U_{\delta}I_{f0}; \quad S_{\delta 2} = \sqrt{3}U_{\delta} \frac{I_{f0}}{2,25},$$

Значение базисной мощности конкретного i -генератора заданного типа и мощности выбираем из пересечения этих двух множеств в соответствии с условием

$$S_2 \leq S_{\delta i} \leq S_1$$

- Повторяя эту операцию для всех генераторов расчетной схемы электрической системы, выбираем значение базисной мощности из области пересечения всех множеств полученных базисных мощностей как общий параметр для всех ступеней трансформации системы (т.е. базисная мощность имеет единственное значение при решении конкретной задачи).

Сущность приближенного приведения элементов к одной ступени трансформации состоит в том, что для каждой ступени трансформации вместо действительных напряжений начала и конца передачи, которые разнятся обычно не более чем на 10 %, в расчетах устанавливают среднее номинальное напряжение ступени трансформации.

По стандарту среднее номинальное напряжение для каждой ступени трансформации принимают на 5% выше соответствующего номинального напряжения линии электропередачи (при этом среднее значение напряжения ступени трансформации отличается на 5% от напряжения в начале и в конце передачи), что дает следующий стандартный ряд значений напряжения:

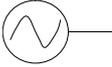
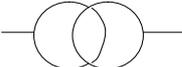
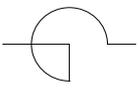
**0,4; 0,525; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75;
18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ.**

При анализе поперечной несимметрии (случаи коротких замыканий) простейшей системы электроснабжения, с питанием от системы (генератора произвольного типа с заданными мощностью и напряжением без указания значения его тока возбуждения), базисную мощность S_{δ} можно выбирать произвольно. При этом значение базисной мощности целесообразно принимать кратным 10 или 100 МВА; 1000 МВА, или равным наиболее часто повторяющейся в данной схеме номинальной мощности, а в качестве базисного напряжения первой ступени трансформации $U_{\delta 1}$ действительное или номинальное напряжение ступени короткого замыкания.

Формулы точного и приближенного приведения для расчета сопротивлений некоторых элементов схемы замещения приведены в табл. 12. В формулах точного приведения приняты следующие размерности:

$$U_H, U_6 \rightarrow \text{в кВ}; S_6, S_H \rightarrow \text{в кВА}; I_6, I_H \rightarrow \text{в А}; L \rightarrow \text{в мГн}$$

Таблица 12

Формулы точного приведения	Формулы приближенного приведения
1	2
Генераторы и синхронные двигатели при заданных параметрах X''_d, S_H, U_H 	
$X = \frac{1000X_H U_H^2}{S_H} = \frac{10X_H \% U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}$ $X_{*6} = \frac{X_H S_6}{S_H} \text{ обычно } X_{*H} = X''_{*d}$ <p>поэтому</p> $X_{*6} = X''_{*d} \frac{U_H^2 S_6}{S_H U_6^2}$	$X_{*6} = X''_{*d} \frac{S_6}{S_H}$
Трансформаторы при условии $r_T \approx 0$ и $X_H \% = U_K \%$ и заданных параметрах $U_K \%; S_H; U_H$	
а) Трансформатор двухобмоточный  $X = \frac{10X_H \% U_H^2}{S_H}, \text{ Ом} \quad X_{*6} = \frac{X_H \% S_6}{100S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_6^2}$	$X_{*6} = \frac{X_H \% S_6}{100S_H}$
Реакторы при заданных параметрах $X_p \%; I_H; U_H$	
реактор обычный  $X = \frac{10X_H \% U_{H.p}}{\sqrt{3} I_{H.p}}, \text{ Ом}$ $X_p \% = X_H \% = \frac{X I_{H.p} \sqrt{3}}{10U_{H.p}} = \frac{\omega L I_{H.p} \sqrt{3}}{10^4 U_{H.p}} = 0,0544 \frac{L I_{H.p}}{U_{H.p}}$ $X_{*6} \% = \frac{X_p \% I_6 U_{H.p}}{U_6 I_{H.p}}$	$X_{*6} = \frac{X_p \% I_6}{I_{H.p}}$

Линии электропередачи (воздушные линии и кабели) при условии равенства $U_H = U_{cp}$		
		
1	2	
$X\% = X \frac{I_6 \sqrt{3}}{10U_H}; \quad X_6\% = X \frac{S_6}{U_H^2}; \quad X_{*6} = X_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$ <p>где S_6 в МВА; U_6 и U_{cp} в кВ; X_0 в Ом/км; l в км</p>	$X_{*6} = X_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$	

Перевод сопротивлений из одних единиц в другие осуществляется по формуле:

$$X\% = X \cdot 100.$$

Отметим, что формулы приближенного приведения используются тогда, когда нет сведений о действительных коэффициентах трансформации всех или части трансформаторов, однако при включении реактора на напряжение меньше номинального, следует пользоваться формулой точного приведения.

2.1.3. Особенности преобразования схем замещения

Расчет тока КЗ всегда связан с эквивалентным преобразованием схемы замещения, с целью определения ее результирующих сопротивлений и ЭДС для рассматриваемого момента времени относительно момента КЗ. При этом для определения упомянутых параметров применяют известные из курса ТОЭ методы преобразования схем замещения, как элементарные (последовательное и параллельное соединение), так и более сложные (преобразование звезда-треугольник или треугольник-звезда, многолучевая звезда в полный многоугольник, замена нескольких генерирующих ветвей с разными э.д.с., присоединенных к общему узлу, одной эквивалентной).

Однако, при преобразовании схем замещения целесообразно руководствоваться следующими указаниями:

1. По возможности сохранять аварийную ветвь до конца преобразования.
2. При нарушении п.1 допускается участие аварийной ветви в преобразовании только на последних его этапах.
3. Концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых для расчетного момента времени (предположительно больше периода промышленной частоты) принимаются равными нулю, объединяются с генераторами в эквивалентные ветви и не соединяются с точкой трехфазного КЗ.

Предполагается, что ток короткого замыкания протекает от генерирующих ветвей через идеальный источник Э.Д.С. с нулевым напряжением, включенный между точкой КЗ и концами нагрузочных и генераторных ветвей.

4. Когда металлическое трехфазное КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой образовавшейся ветви такое же КЗ. Далее полученную схему можно преобразовать относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви с КЗ, как обычные нагрузочные ветви с нулевыми значениями Э.Д.С.

2.1.4. Расчет тока и мощности короткого замыкания для произвольного момента времени.

На этапе предварительных расчетов используют практические (приближенные инженерные) методы расчета переходного процесса при КЗ: аналитический и графоаналитические.

Графоаналитические методы включают в себя метод расчетных кривых, метод спрямленных характеристик и метод типовых кривых.

Различие между практическими методами расчета переходного процесса КЗ состоит в разном подходе к вычислению периодической слагающей тока КЗ в поврежденной фазе и во всех ветвях системы.

Если требуется найти ток не только в месте КЗ, но также его распределение по отдельным ветвям схемы в произвольный момент времени, то метод спрямленных характеристик обладает наибольшей точностью при решении такой задачи.

При условии, что параметры схемы замещения генератора (E и X_r) не зависят от внешних условий, периодическая слагающая тока КЗ при трехфазном коротком замыкании определяется по формуле:

$$I_{\pi} = E / (X_r + X_{\text{вн}}),$$

где $X_{\text{вн}}$ – реактивность внешней цепи при рассматриваемой удаленности короткого замыкания.

Для произвольного момента времени, вследствие нелинейной зависимости параметров $E_t = f_1(X_{\text{вн}}, t)$ и $X_t = f_2(X_{\text{вн}}, t)$ от времени, невозможно точно определить значения параметров схемы замещения генератора E_t и X_t . Однако, для заданного момента времени (расчетного приведенного времени) процесса короткого замыкания можно подобрать некоторые расчетные E_t и X_t , не зависящие от внешней реактивности, и которые позволяют с достаточной для практики точностью определить зна-

чение периодической слагающей тока в расчетный момент времени в точке КЗ и его распределении по всем ветвям системы.

В инженерных расчетах подбор значений E_t и X_t схемы замещения генератора по методу спрямленных характеристик производится по специальным кривым (смотри рис. 2 и рис. 3), представляющим зависимость относительного значения ЭДС типового генератора E_t и его реактивности X_t от времени, при различных значениях тока возбуждения в предшествующем (исходном) режиме I_{f0} .

Параметры типовых генераторов средней мощности приведены в табл.13.

Таблица 13

Наименование параметра	Тип машины	
	Турбогенератор	Гидрогенератор
Отношение короткого замыкания ОКЗ (K_c)	0,70	1,06
Постоянная времени T_{f0} , с	7,00	5,00
Ток возбуждения при номинальной нагрузке I_{f0} , о.е.	3,26	1,80
Предельный ток возбуждения $I_{f\text{ пр}}$, о.е.	3,96	3,15

В случае значительного отличия фактических параметров генератора от типовых, значения E_t и X_t определяются по выражениям:

$$E_t = E_{q.\text{пр}} - \delta_{E_t}(E_{q.\text{пр}} - E''); \quad X_t = X_d - \delta_{X_t}(X_d - X''_d);$$

где $E_{q.\text{пр}}$ и E'' , X_d и X''_d – ЭДС и реактивности генератора в установившемся и сверхпереходном режимах;

δ_{E_t} , δ_{X_t} - коэффициенты, значения которых определяются по соответствующим кривым рис. 2 и рис. 3.

При отличии значения постоянной времени цепи возбуждения T_{f0} от постоянной времени цепи возбуждения типового генератора в 1,5 и более раз, значения E_t , X_t , δ_{E_t} , δ_{X_t} находят не для действительного (заданного) момента времени t , а для его приведенного значения t' , определяемого по формуле:

$$t' = t \frac{T_{f0(\text{типового})}}{T_{f0}}$$

2.1.5. Алгоритм расчета тока при коротких замыканиях по методу спрямленных характеристик:

1. Для рассматриваемого момента времени t все генераторы с АРВ в зависимости от принятого для них режима вводятся в схему замещения параметрами E_t и X_t (режим подъема или предельного возбуждения), либо параметрами $E = U_n$ и $X_r = 0$ (режим номинального или нормального напряжения); генераторы без АРВ вводятся своими E_t и X_t . При $t < 0,5$ с все генераторы с АРВ вводятся своими E_t и X_t из-за малого влияния АРВ.

2. Нагрузки для момента времени $t > 0,5$ с. вводятся в схему замещения параметрами $X_n = 1,2; E = 0$.

3. Для момента времени $t = 0$ все генераторы и нагрузки вводятся в схему замещения параметрами сверхпереходного режима E'' и X'' . В практических расчетах широко используются средние значения параметров E'' и X'' в относительных единицах при номинальных условиях согласно табл. 14.

Таблица 14

Тип машины	Средние значения сверхпереходных параметров	
	X''	E''
Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
Турбогенераторы мощностью до 100 - 500 МВт	0,20	1,13
Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,20	1,13
Гидрогенераторы без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронные компенсаторы	0,20	1,20
Асинхронные двигатели	0,20	0,90
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85
Синхронные двигатели	0,20	1,10

4. После определения для заданной схемы эквивалентной ЭДС E_Σ и эквивалентной реактивности X_Σ (эквивалентного полного сопротивления при наличии кабельных линий) относительно точки КЗ рассчитывается значение периодической слагающей тока в месте короткого замыкания по формуле:

$$I_{пт} = E_\Sigma / X_\Sigma$$

Если окажется, что режимы некоторых генераторов были выбраны неверно, то эти режимы следует изменить, а расчет повторить с последующей проверкой.

6. Мощность короткого замыкания для момента времени t определяется по формуле:

$$S_{к.т} = \sqrt{3} I_{п.т} U_{б.ст},$$

где $U_{б.ст}$ - базисное напряжение ступени трансформации;

$I_{п.т}$ - значение периодической слагающей тока короткого замыкания.

Отметим, что по определению под мощностью короткого замыкания понимают некоторую условную величину, равную увеличенному в $\sqrt{3}$ раз произведению тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент времени на номинальное напряжение соответствующей сети.

3. Примеры расчета параметров режима электрической системы

Рассмотрим примеры расчета параметров режима простейшей электрической системы при поперечной несимметрии в относительных единицах при базисных условиях по методу спрямленных характеристик.

Пример 1.

Рассчитать установившееся значение тока трехфазного короткого замыкания в точке «К⁽³⁾» *простейшей системы электроснабжения ограниченной мощности* и неизменным напряжением 230 кВ. Расчет провести в системе относительных единиц при точном и приближенном приведении параметров элементов системы к первой ступени трансформации.

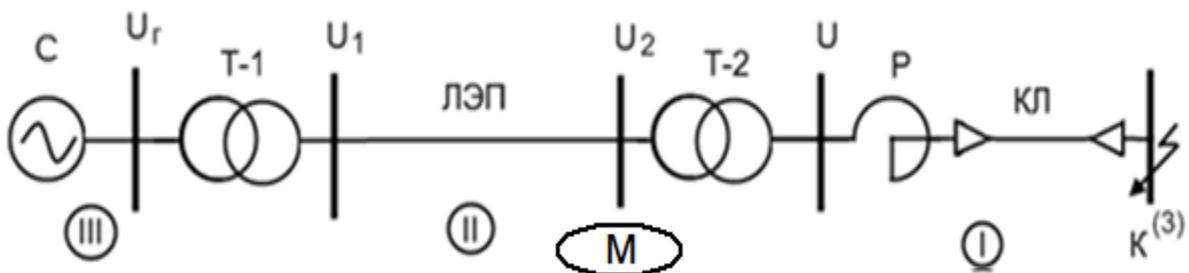


Рис. 5. Расчетная схема простейшей электрической системы.

Параметры элементов простейшей электрической системы:

- **Кабельная линия КЛ**, длина, удельное активное и индуктивное сопротивление соответственно:

- – $\ell = 3$ км; $R_0 = 0,45$ Ом/км; $x_0 = 0,08$ Ом/км;
- **Реактор Р**, номинальные значения напряжения и тока, реактивность реактора в процентах соответственно:
- – $U_H = 6$ кВ; $I_H = 0,4$ кА; $x_p = 5$ %;
- **Трансформатор Т-1**, номинальная полная мощность, напряжения первичной и вторичной обмоток, напряжение короткого замыкания соответственно:
- – $S_H = 60$ МВА; 230/121 кВ; $U_k = 12$ %;
- **Воздушная линия ЛЭП**, номинальное напряжение, длина линии, удельное индуктивное сопротивление соответственно:
- – $U_H = 110$ кВ; $\ell = 80$ км; $x_0 = 0,4$ Ом/км;
- **Трансформатор Т-2**, номинальная полная мощность, напряжения первичной и вторичной обмоток, напряжение короткого замыкания соответственно:
- – $S_H = 31,5$ МВА; 110/6,6 кВ; $U_k = 10,5$ %;
- **Система С** – напряжение системы $U_c = 230$ кВ (const)

П 1.1. Решение при точном приведении параметров элементов всех ступеней трансформации к первой

- Выбор базисных величин:
 - Намечаем ступени трансформации (см. рис. 5), *принимая за первую аварийную ступень* и далее по порядку;
 - Принимаем базисное напряжение первой ступени трансформации с учетом параметров оборудования на этой ступени (номинальное напряжение реактора 6 кВ) равным номинальному среднему напряжению, т.е. $U_{б1} = 6,3$ кВ;
 - Принимаем значение базисной мощности равной $S_{б} = 1000$ МВА произвольно, так как параметры генератора не заданы, а питание осуществляется от системы с неизменным напряжением, и определяем базисный ток первой ступени трансформации в именованных единицах

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,7 \text{ кА};$$

- Определяем базисные напряжения на других ступенях трансформации с учетом заданных значений коэффициентов трансформации трансформаторов между выбранными ступенями трансформации (в данном случае с учетом направления трансформации).

$$U_{\delta \text{ II}} = U_{\delta 1} \frac{1}{K_{\text{I-II}}} = 6,3 \frac{110}{6,6} = 105 \text{ кВ}; \quad U_{\delta \text{ III}} = U_{\delta \text{ II}} \frac{1}{K_{\text{II-III}}} = 105 \frac{230}{121} = 200 \text{ кВ}.$$

II 1.2. Составление электрической схемы замещения.

Электрическую схему замещения простейшей электрической системы составим с учетом схем замещения элементов системы для случая симметричного трехфазного короткого замыкания (рис. 6) с учетом принятых ранее ограничений.

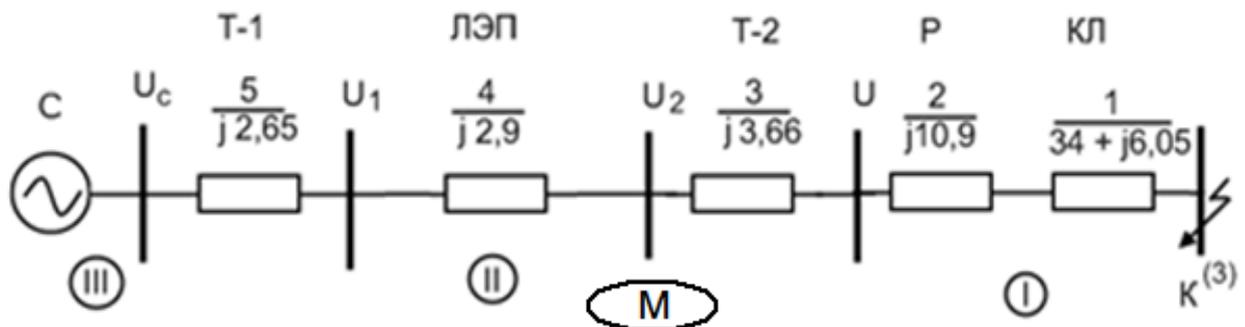


Рис. 6. Электрическая схема замещения простейшей электрической системы при симметричном трехфазном коротком замыкании (обозначения – в числителе порядковый номер элемента (назначается произвольно), в знаменателе – значение сопротивления).

Примечание: при вычислениях рекомендуется приводить расчетную формулу, численные значения входящих в нее величин, конечный результат и его размерность.

II 1.3. Далее по формулам **точного приведения** (табл. 12) определяем значения параметров элементов системы приведенных к первой ступени трансформации в относительных единицах (о.е) [1].

- **Кабельная линия КЛ** – $R_1 = R_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,45 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 34;$

$$x_1 = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 6,05;$$

- **Реактор Р** – $x_2 = \frac{x_p \cdot U_H \cdot I_{\text{б1}}}{100 \% \cdot I_H \cdot U_{\text{б1}}} = \frac{5 \cdot 6 \cdot 91,7}{100 \% \cdot 0,4 \cdot 6,3} = 10,9;$

- **Трансформатор Т-2**

- – $x_3 = \frac{U_k}{100 \%} \cdot \frac{U_{\text{H(НН)}}^2 \cdot S_{\text{б}}}{S_{\text{H}} \cdot U_{\text{б1}}^2} = \frac{10,5 \cdot 6,6^2 \cdot 1000}{100 \% \cdot 31,5 \cdot 6,3^2} = 3,66;$

- **Линия электропередачи ЛЭП**

- – $x_4 = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{105^2} = 2,9;$

- **Трансформатор Т-1**

- – $x_5 = \frac{U_k}{100 \%} \cdot \frac{U_{\text{H(НН)}}^2 \cdot S_{\text{б}}}{S_{\text{H}} \cdot U_{\text{бII}}^2} = \frac{12 \cdot 121^2 \cdot 1000}{100 \% \cdot 60 \cdot 105^2} = 2,65;$

Система С – источник с неизменным напряжением.

Для расчета тока КЗ определим результирующее сопротивление от источника питания до точки КЗ и напряжение системы в относительных единицах

- $z_{*\Sigma} = \sqrt{x_{*\Sigma}^2 + R_{*\Sigma}^2} = \sqrt{26,16^2 + 34^2} = 42,8;$

где – $R_{*\Sigma} = R_{*1} = 34;$

$$x_{*\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 6,05 + 10,9 + 3,66 + 2,9 + 2,65 = 26,16.$$

- Напряжение системы в относительных единицах

$$U_{*c} = \frac{U_c}{U_{\text{бIII}}} = \frac{230}{200} = 1,15.$$

- Относительное значение тока КЗ

- $I_{*k} = \frac{U_{*c}}{z_{*\Sigma}} = \frac{1,15}{42,8} = 0,0269;$

- Значение тока КЗ в именованных единицах

$$I_k = I_{*k} \cdot I_{\text{бI}} = 0,0269 \cdot 91,7 = 2,46 \text{ кА}$$

II 1.4. Мощность КЗ и остаточное напряжение в узловых точках системы

- Напряжение системы, приведенное к ступени КЗ
- $U_{c(в)} = U_c \cdot K_{I-II} \cdot K_{II-III} = 230 \cdot \frac{6,6}{110} \cdot \frac{121}{230} = 7,25 \text{ кВ};$
- Мощность КЗ в установившемся режиме
- $S_k = \sqrt{3} \cdot I_k \cdot U_{c(в)} = 1,73 \cdot 2,46 \cdot 7,25 = 30,8 \text{ МВА}$

Мощность КЗ в относительных и именованных единицах можно также определить по формулам

- $S_{*k} = I_{*k} \cdot U_{*c} = 0,0269 \cdot 1,15 = 0,0308;$
 $S_k = S_{*k} \cdot S_{\sigma} = 0,0308 \cdot 1000 = 30,8 \text{ МВА}$

Остаточное напряжение в начале электропередачи (в начале ЛЭП) в относительных единицах (расчет от источника питания) определим по схеме рис. 7, на котором напряжение короткого замыкания отображено идеальным источником ЭДС с нулевым напряжением и током КЗ.

$$\begin{aligned} \dot{U}_{*1} &= \dot{U}_{*c} - \dot{I}_{*k} \cdot jX_{T1} = 1,15 - 0,0269e^{-j37,57^\circ} \cdot 2,65e^{j90^\circ} = \\ &= 1,15 - 0,0713e^{j52,43^\circ} = 1,15 - j0,05651 = 1,10797e^{j2,92^\circ}. \end{aligned}$$

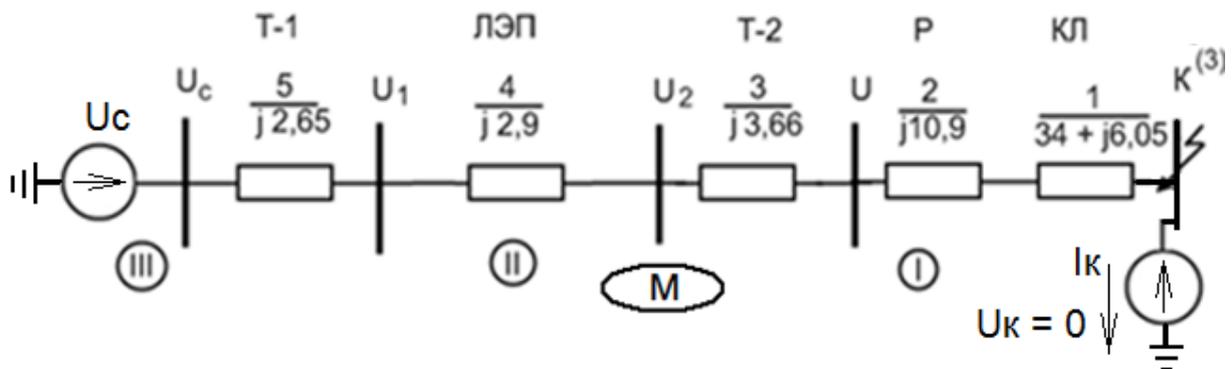


Рис. 7. Электрическая схема замещения простейшей электрической системы с источником напряжения КЗ.

Значение напряжения в конце электропередачи (точка М)

$$\begin{aligned}\dot{U}_{*2} &= \dot{U}_{*1} - \dot{I}_{*к} \cdot jX_4 = 1,10797e^{j2,92^\circ} - 0,0269e^{-j37,57^\circ} \cdot 2,9e^{j90^\circ} = \\ &= 1,10797 \cos 2,92^\circ + j1,10797 \sin 2,92^\circ - 0,0780 \cos(52,43^\circ) - j0,0780 \sin(52,43^\circ) = \\ &= 1,0589 - j0,00539 = 1,05891e^{-j0,279^\circ}.\end{aligned}$$

Остаточное напряжение в начале и в конце электропередачи в именованных единицах

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_{*1} \cdot U_{\sigma\Pi} = 1,10797 \cdot 105 = 116,3368 \text{ кВ.} \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_{*2} \cdot U_{\sigma\Pi} = 1,05891 \cdot 105 = 111,185 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Остаточное напряжение в конце электропередачи (в конце ЛЭП) в относительных единицах можно определить с учетом падения напряжения на элементах системы от конца ЛЭП (точка М) до точки КЗ при протекании тока КЗ через источник напряжения (см. рис. 7) (учитываются сопротивления трансформатора Т2, реактора Р, кабельной линии КЛ и переходное сопротивление в точке КЗ)

$$\begin{aligned}U_{*2} = U_{*М} &= U_{*к} + I_{*к} \cdot \sqrt{R_1^2 + (X_{1кЛ} + X_{2Р} + X_{3Т2})^2} = \\ &= 0 + 0,0269 \cdot \sqrt{34^2 + (6,05 + 10,9 + 3,66)^2} = 1,06,\end{aligned}$$

где напряжение в точке короткого замыкания $U_{*к} = 0$ – при металлическом коротком замыкании.

Расчетное значение остаточного напряжения в конце электропередачи в именованных единицах практически не отличается от полученного выше

- $U_2 = U_{М} = U_{*М} \cdot U_{\sigma\Pi} = 1,06 \cdot 105 = 111 \text{ кВ.}$

П 1.5. Приближенное приведение параметров элементов схемы замещения в относительных единицах в случае отсутствия данных о значениях коэффициентов трансформации силовых трансформаторов системы электроснабжения.

Значение базисной мощности оставляем прежним $S_{\sigma} = 1000 \text{ МВА}$, а в качестве базисных напряжений принимаем среднономинальные напря-

жения соответствующих ступеней трансформации по стандартному ряду средних напряжений:

$$U_{6I} = 6,3 \text{ кВ}; \quad U_{6II} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{6III} = 230 \text{ кВ}.$$

Так как базисная мощность и базисное напряжение первой ступени трансформации не изменились, то и базисный ток остается прежним:

$$I_{6I} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot U_{6I}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,7 \text{ кА};$$

Расчет значений сопротивлений элементов системы в относительных единицах по **формулам приближенного приведения**:

- **КЛ:** $R_1 = R_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{6I}^2} = 0,45 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 34;$

$$x_1 = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{6I}^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 6,05;$$

- **Реактор Р:** $x_2 = \frac{x_p \cdot I_{6I}}{100\% \cdot I_H} = \frac{5 \cdot 91,7}{100 \cdot 0,4} = 11,45;$

- **Т-2:** $x_3 = \frac{U_k \cdot S_{\bar{6}}}{100\% \cdot S_H} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 31,5} = 3,33;$

- **ЛЭП:** $x_4 = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2,42;$

- **Т-1:** $x_5 = \frac{U_k \cdot S_{\bar{6}}}{100\% \cdot S_H} = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 60} = 2,0;$

- Результирующее сопротивление схемы от источника до точки КЗ:

- $z_{*\Sigma} = \sqrt{R_{*\Sigma}^2 + x_{*\Sigma}^2} = \sqrt{34^2 + 25,25^2} = 42,4;$

где $R_{*\Sigma} = R_1 = 34;$

- $x_{*\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 6,05 + 11,45 + 3,33 + 2,42 + 2,0 = 25,25.$

- Значение тока КЗ в относительных единицах:

$$\bullet I_{*k} = \frac{U_{*c}}{z_{*\Sigma}} = \frac{U_c}{U_{\text{б}} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{230}{230 \cdot 42,4} = 0,0236;$$

- и в именованных единицах: (меньше на 11,8 %)

$$\bullet I_k = I_{*k} \cdot I_{\text{бI}} = 0,0236 \cdot 91,7 = 2,17 \text{ кА.}$$

Мощность КЗ: (меньше на 23 %)

$$S_k = \sqrt{3} \cdot I_k \cdot U_{\text{бI}} = 1,73 \cdot 2,17 \cdot 6,3 = 23,6 \text{ МВА};$$

Мощность короткого замыкания можно вычислить с учетом того, что при использовании формул приближенного приведения параметров элементов действительное напряжение каждой ступени трансформации считают равным среднономинальному напряжению. Следовательно, в этом случае действительное напряжение в относительных единицах равно единице. При этих условиях численные значения относительного тока и относительной мощности КЗ одинаковы.

Тогда: $S_{*k} = I_{*k}; S_k = I_{*k} \cdot S_{\text{б}} = 0,0236 \cdot 1000 = 23,6 \text{ МВА};$

Остаточное напряжение в конце передачи при использовании формул приближенного приведения

Остаточное напряжение в конце ЛЭП в именованных единицах (точка М):

$$\bullet U_M = I_{*k} \cdot U_{\text{бII}} \cdot z_{*\text{МК}} = 0,0236 \cdot 115 \cdot 39,8 = 108 \text{ кВ}; \text{ (меньше на 2,7 \%)},$$

где –

$$z_{*\text{МК}} = \sqrt{R_{*\text{МК}}^2 + (x_1 + x_2 + x_3)^2} = \sqrt{34^2 + (6,05 + 11,55 + 3,33)^2} = 39,8. \text{ – суммарное сопротивление от точки КЗ до конца передачи (точка М);}$$

$$R_{*\text{МК}} = R_1 = 34.$$

Пример 2

Рассмотрим решение задачи *примера 1* для момента времени $t = 1$ с при питании простейшей системы (рис. 5) от турбогенератора типа ТВФ-63-2У3, параметры которого приведены в таблице 15. В начале ЛЭП установ-

лен трансформатор Т-1, номинальная полная мощность, напряжения первичной и вторичной обмоток, напряжение короткого замыкания соответственно:

- – $S_H = 63 \text{ МВА}$; $20/121 \text{ кВ}$; $U_k = 12 \%$;

Параметры остальных элементов системы принимаем по примеру 1.

Таблица 15

Тип ТГ	Номинальная мощность		Номинальное напряжение, кВ	$\cos \varphi$	Номинальный ток, кА	Номинальный ток возбуждения, $I_{f\text{ном}}$, А	Ток возбуждения холостого хода, $I_{fх}$, А	Свехпереходная реактивность, X''_d , о.е.	Реактивность обратной последовательности, X_2 , о.е.	Реактивность нулевой последовательности, X_0 , о.е.	Постоянная времени цепи возбуждения, с
	Полная, МВА	активная, МВт									
ГВФ-63-2У3	78,75	63	10,5	0,8	4,33	1465	538	0,153	0,186	0,088	8,85

- П 2.1. Выбор базисных величин:

- Как и в первом примере намечаем ступени трансформации (см. рис. 7), принимая за первую аварийную ступень и принимаем базисное напряжение первой ступени трансформации с учетом параметров оборудования на этой ступени (номинальное напряжение реактора 6 кВ) равным номинальному среднему напряжению, т.е. $U_{б1} = 6,3 \text{ кВ}$;

- Определяем базисные напряжения других ступеней трансформации с учетом значений коэффициентов трансформации трансформаторов между выбранными ступенями трансформации (в данном случае направление трансформации).

$$U_{б II} = U_{б I} \frac{1}{K_{I-II}} = 6,3 \frac{110}{6,6} = 105 \text{ кВ};$$

$$U_{б III} = U_{б II} \frac{1}{K_{II-III}} = 105 \frac{20}{121} = 17,35 \text{ кВ}.$$

- По формуле для базисной мощности, $S_б = \sqrt{3} U_б \frac{I_{f0}}{I_{*f0}}$, записанной через ток возбуждения генератора в именованных и относительных единицах, определим область существования возможных значений базисной мощно-

сти для заданного тока возбуждения генератора $I_{f0} = I_{f\text{ном}} = 1465 \text{ А}$ с учетом значений тока возбуждения в относительных единицах $I_{*f0} = 1 \div 2,25$ – по графикам расчетных кривых (рис. 2) и значения базисного напряжения третьей ступени трансформации $U_{\text{бIII}} = 17,35 \text{ кВ}$ определим возможную область определения базисной мощности:

$$S_{\text{б1}} = \sqrt{3}U_{\text{бIII}}I_{f0} = \sqrt{3} \cdot 17,35 \cdot 1,465 = 44,024 \text{ МВА};$$

$$S_{\text{б2}} = \sqrt{3}U_{\text{бIII}} \frac{I_{f0}}{2,25} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17,35 \cdot 1,465}{2,25} = 19,566 \text{ МВА},$$

Значение базисной мощности необходимо получить из условия

$$S_{\text{б2}} \leq S_{\text{бi}} \leq S_{\text{б1}}$$

Из области определения базисных мощностей $19,566 \leq S_{\text{б}} \leq 44,024$ окончательно принимаем значение базисной мощности равной $S_{\text{б}} = 40 \text{ МВА}$. В этом случае базисный ток первой ступени трансформации в именованных единицах

$$I_{\text{б1}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б1}}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 3,665 \text{ кА};$$

Базисные токи второй и третьей ступеней трансформации

$$I_{\text{бII}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{бII}}} = \frac{40}{105 \cdot \sqrt{3}} = 0,2199 \text{ кА}.$$

$$I_{\text{бIII}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{бIII}}} = \frac{40}{17,35 \cdot \sqrt{3}} = 1,331 \text{ кА}.$$

Для определения Э.Д.С. и индуктивного сопротивления генератора по графикам расчетных кривых рассчитаем значение приведенного времени [1]:

$$t' = t \frac{T_{f0(\text{типового})}}{T_{f0}} = 1 \cdot \frac{7,0}{8,85} = 0,79 \text{ с}.$$

Определим значение тока возбуждения генератора удовлетворяющего заданным условиям:

$$I_{*f0} = \frac{I_{f0}}{I_{6III}} = \frac{1,465}{1,331} = 1,1.$$

По графикам рис. 2 для момента времени $t = 0,79$ с и $I_{*f0} = 1,1$ находим относительные значения Э.Д.С. и реактивности генератора

$$E_t = E_r = 1,28 \text{ и } X_t = X_r = 0,39.$$

Схема замещения *примера 2* с указанием параметров элементов показана на рис.8.

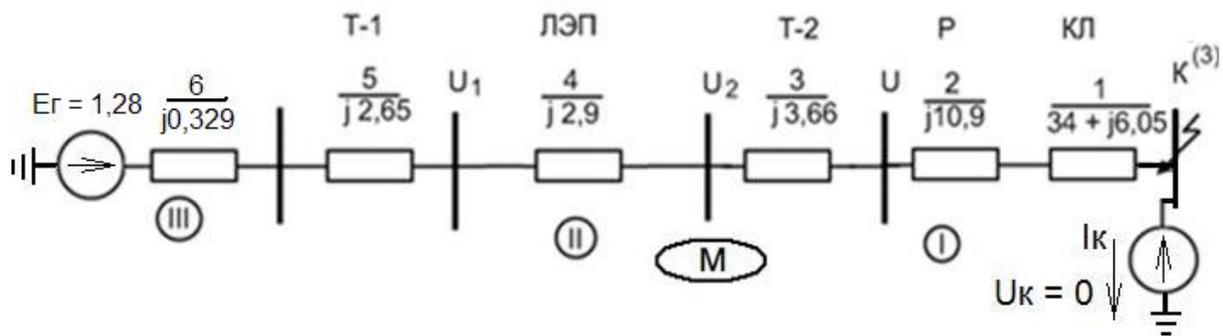


Рис. 8. Схема замещения простейшей электрической системы примера 2.

П 2.2. Далее по формулам **точного приведения** определяем значения параметров элементов системы приведенных к первой ступени трансформации.

- **Кабельная линия КЛ** – $R_1 = R_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,45 \cdot 3 \cdot \frac{40}{6,3^2} = 1,36;$

$$x_1 = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{40}{6,3^2} = 0,242;$$

- **Реактор Р** – $x_2 = \frac{x_p \cdot U_H \cdot I_{\delta 1}}{100 \% \cdot I_H \cdot U_{\delta 1}} = \frac{5 \cdot 6 \cdot 3,665}{100 \% \cdot 0,4 \cdot 6,3} = 0,4363;$

- **Трансформатор Т-2**

- – $x_3 = \frac{U_k}{100 \%} \cdot \frac{U_{H(НН)}^2 \cdot S_{\delta}}{S_H \cdot U_{\delta 1}^2} = \frac{10,5 \cdot 6,6^2 \cdot 40}{100 \% \cdot 31,5 \cdot 6,3^2} = 0,1464;$

- **Линия электропередачи ЛЭП**

- $x_4 = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{40}{105^2} = 0,116;$

- **Трансформатор Т-1**

- $x_5 = \frac{U_k}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{H(ВВ)}}^2 \cdot S_{\text{б}}}{S_{\text{H}} \cdot U_{\text{бII}}^2} = \frac{12 \cdot 121^2 \cdot 40}{100\% \cdot 60 \cdot 105^2} = 0,106;$

-

- **Генератор –**

- $x_6 = X_t \frac{U_{\text{H}}^2 \cdot S_{\text{б}}}{S_{\text{H}} \cdot U_{\text{б}}^2} = 0,39 \frac{20^2 \cdot 40}{63 \cdot 17,35^2} = 0,329.$

Результирующее сопротивление от источника питания до точки КЗ

- $z_{*\Sigma} = \sqrt{x_{*\Sigma}^2 + R_{*\Sigma}^2} = \sqrt{1,3757^2 + 1,36^2} = 1,9344;$

где – $R_{*\Sigma} = R_1 = 1,36;$

$$x_{*\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0,242 + 0,4363 + 0,1464 + 0,116 + 0,106 + 0,329 = 1,3757.$$

- Напряжение на шинах генератора в относительных единицах

$$U_{*\Gamma} = \frac{U_{\Gamma}}{U_{\text{бIII}}} = \frac{20}{17,35} = 1,1527.$$

- Относительное значение тока КЗ $I_{*к} = \frac{U_{*\Gamma}}{z_{*\Sigma}} = \frac{1,1527}{1,9344} = 0,59587;$

- Значение тока КЗ в именованных единицах на первой ступени трансформации (в аварийной ветви)

-

$$I_k = I_{*к} \cdot I_{\text{бI}} = 0,59587 \cdot 3,665 = 2,1838 \text{ кА.}$$

- Напряжение на шинах генератора, приведенное к ступени КЗ

- $U_{ГI} = U_{Г} \cdot K_{I-II} \cdot K_{II-III} = 20 \cdot \frac{6,6}{110} \cdot \frac{121}{20} = 7,26 \text{ кВ};$

- Относительное значение тока КЗ

- $I_{*k} = \frac{U_{*ГI}}{z_{*\Sigma}} = \frac{U_{ГI}}{U_{бI} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{7,26}{6,3 \cdot 1,9344} = 0,59573;$

- Мощность КЗ в установившемся режиме

- $S_k = \sqrt{3} \cdot I_k \cdot U_{ГI} = 1,73 \cdot 2,1838 \cdot 7,26 = 27,46 \text{ МВА} .$

Мощность КЗ в относительных и именованных единицах можно также определить по формулам

- $S_{*k} = I_{*k} \cdot U_{*c} = 0,59573 \cdot 1,1527 = 0,6867;$

- $S_k = S_{*k} \cdot S_{б} = 0,6867 \cdot 40 = 27,468 \text{ МВА}$

Остаточное напряжение в конце электропередачи (в конце ЛЭП) в относительных единицах

- $U_{*M} = U_{*K} + I_{*k} \cdot z_{*MK} = 0 + 0,59573 \cdot 1,5905 = 0,9475;$

- где $z_{*MK} = \sqrt{R_{*MK}^2 + x'_{*MK}{}^2} = \sqrt{1,36^2 + 0,8247^2} = 1,5905;$

- $x'_{*MK} = x_1 + x_2 + x_3 = 0,242 + 0,4363 + 0,1464 = 0,8247.$

Остаточное напряжение в конце электропередачи в именованных единицах

- $U_2 = U_M = U_{*M} \cdot U_{бII} = 0,9475 \cdot 105 = 99,49 \text{ кВ}.$

В исходном режиме расчета тока короткого замыкания предполагалось, что генератор при трехфазном коротком замыкании работает в режиме предельного возбуждения и моделируется источником Э.Д.С. за реактивностью. Для проверки правильности выбранного режима работы генератора рассчитаем его критические параметры:

- критическая реактивность при $E_{*q\text{пр}} = E_{\Gamma} = 1,28$ и $U_{*н} = \frac{U_{н}}{U_{6\Pi\Pi}} = \frac{20}{17,35} = 1,1527$

$$X_{*к\text{р}} = \frac{X_{*6} U_{*н}}{E_{*q\text{пр}} - U_{*н}} = \frac{0,329 \cdot 1,1527}{1,28 - 1,1527} = 2,97918.$$

- критический ток:

$$I_{*к\text{р}} = \frac{U_{*н}}{X_{*к\text{р}}} = \frac{1,1527}{2,97918} = 0,38691.$$

Значение критического тока в относительных единицах меньше тока короткого замыкания, т.е. $I_{*к\text{р}} = 0,38691 < I_{*к} = 0,59587$. Следовательно, генератор работает в **режиме предельного возбуждения** и его в схему замещения необходимо вводить идеальным источником Э.Д.С. (в данном случае источником $E_{*q\text{пр}} = 1,28$) за реактивностью генератора X_{*6} . Таким образом исходный режим генератора выбран правильно.

Пример 3

Вычислить аналитическим методом ударный ток при трехфазном КЗ в точке «К» расчетной схемы электрической системы, показанной на рис. 9. Проанализировать влияние обобщенной нагрузки «Н-1» на сверхпереходный ток короткого замыкания. Параметры элементов электрической системы приведены на рис. 9.

• Решение:

При отсутствии сведений о коэффициентах трансформации силовых трансформаторов расчет параметров элементов схемы замещения выполним по формулам приближенного приведения.

• Выбор базисных величин:

- Намечаем ступени трансформации (см. рис. 9), **принимая за первую аварийную ступень** и далее по порядку;

- Принимаем базисное напряжение первой ступени трансформации с учетом параметров оборудования на этой ступени (номинальное напряжение на шинах АД 6,3 кВ) равным номинальному среднему напряжению, т.е. $U_{61} = 6,3 \text{ кВ}$;

- Принимаем значение базисной мощности равной $S_{\Gamma} = 100 \text{ МВА}$ произвольно, так как параметры генератора заданы частично без указания ти-

па, и определяем базисный ток первой ступени трансформации в именованных единицах

$$I_{бI} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{бI}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,17 \text{ кА};$$

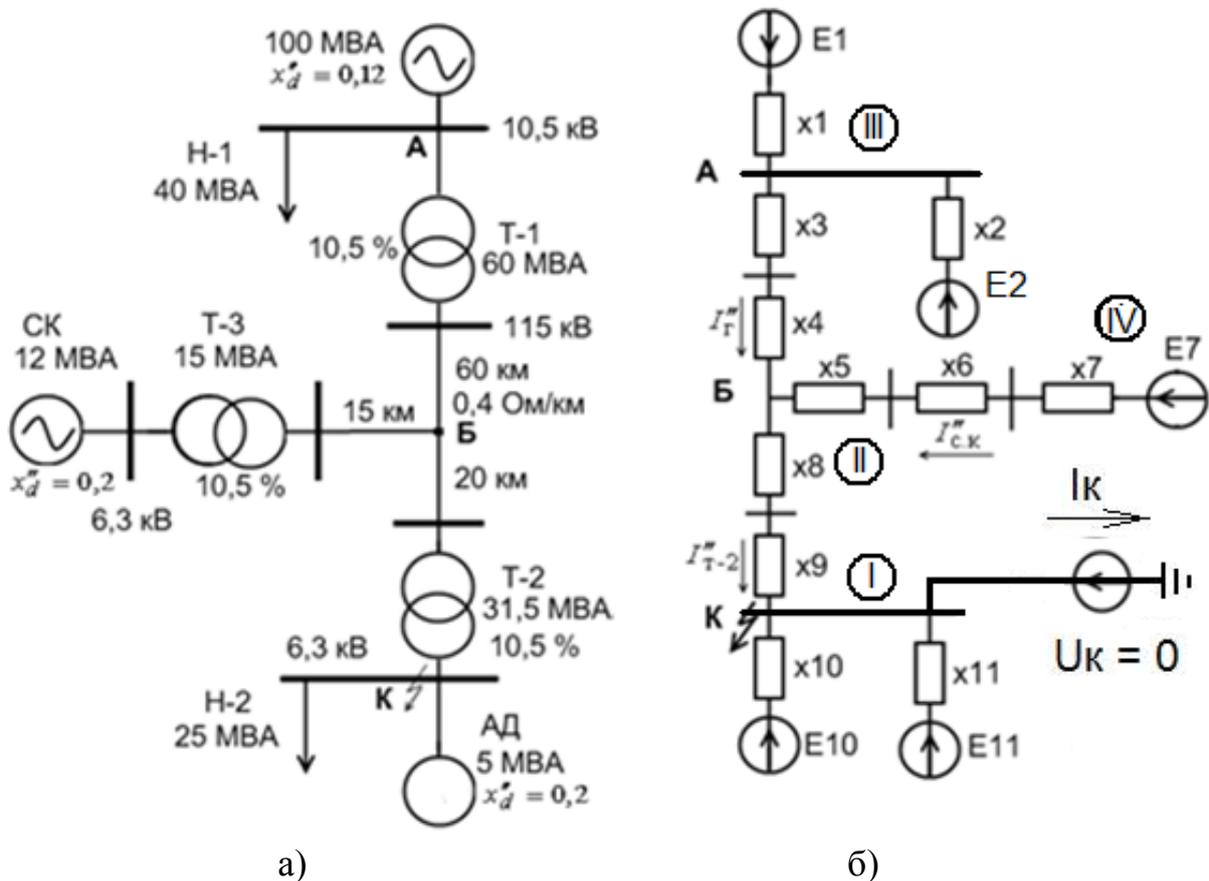


Рис. 9. Электрические схемы примера 3: – а) расчетная схема электрической системы; б) – схема замещения электрической системы с нулевым источником напряжения короткого замыкания в узле «К».

В качестве базисных напряжений участков схемы принимаем средненоминальные напряжения соответствующих ступеней трансформации по стандартному ряду (в соответствии с данными приведенными на схеме рис. 9):

$$U_{бI} = 6,3 \text{ кВ}; \quad U_{бII} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{бIII} = 10,5 \text{ кВ}. \quad U_{бIV} = 6,3 \text{ кВ}.$$

Составляем электрическую схему замещения с учетом всех присоединенных нагрузок и схем замещения элементов системы. Относительные значения сверхпереходных ЭДС генераторов синхронных компенсаторов, асинхронных двигателей и нагрузок принимаем по условиям номинального предшествующего режима согласно табл. 16 [1].

Таблица 16

Тип машины	Обозначение на схеме	Сверхпереходная реактивность x''	Сверхпереходная ЭДС E''
Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	E_1	0,125	1,08
Обобщенная нагрузка (Н)	E_2, E_{11}	0,35	0,85
Синхронные компенсаторы (СК)	E_7	0,2	1,2
Асинхронные двигатели (АД)	E_{10}	0,2	0,9

Далее по формулам **приближенного приведения** определяем значения параметров элементов системы приведенных к первой ступени трансформации.

- Генератор: $x_1 = x_d'' \frac{S_6}{S_H} = 0,125 \frac{100}{100} = 0,125;$

- Нагрузка Н-1 $x_2 = x_H'' \frac{S_6}{S_H} = 0,35 \frac{100}{40} = 0,875;$

- Трансформатор Т1 $x_3 = \frac{U_K \% \cdot S_6}{100 \cdot S_{H1}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 60} = 0,175;$

- ЛЭП1 $x_4 = x_0 l_1 \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,18147;$

- ЛЭП2 $x_5 = x_0 l_2 \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,045368;$

- Трансформатор Т3 $x_6 = \frac{U_K \% \cdot S_6}{100 \cdot S_{H3}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 15} = 0,7;$

- СК $x_7 = x'' \frac{S_6}{S_{H7}} = 0,2 \frac{100}{12} = 1,666 ;$

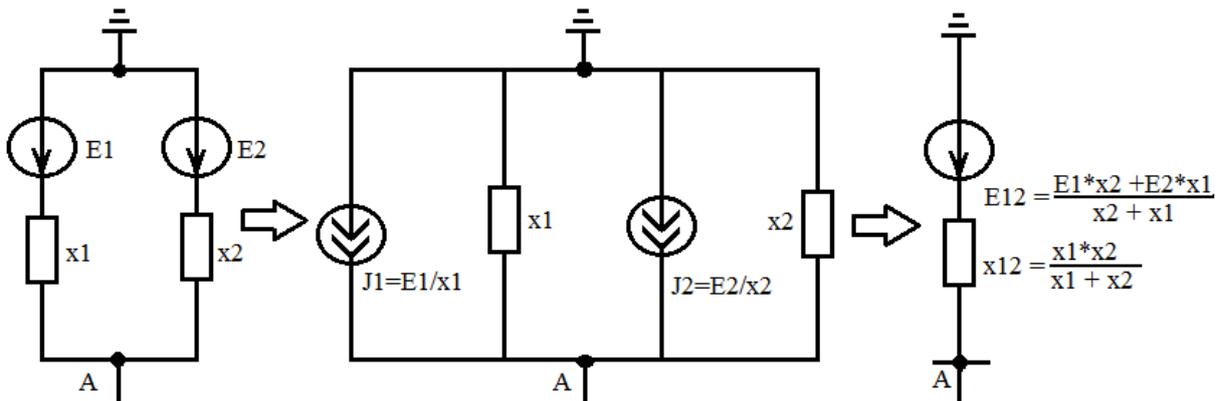
- ЛЭП3 $x_8 = x_0 l_3 \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,06049;$

- Трансформатор Т2 $x_9 = \frac{U_K \% \cdot S_6}{100 \cdot S_{H9}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 31,5} = 0,3333;$

- Нагрузка Н-2 $x_{10} = x_H'' \frac{S_6}{S_{H2}} = 0,35 \frac{100}{25} = 1,4;$

- АД $x_{11} = x_{АД}'' \frac{S_6}{S_{АД}} = 0,2 \frac{100}{5} = 4,0.$

С целью сокращения числа ветвей с источниками преобразуем участка схемы с параллельным соединением ветвей с источниками и затем определим токи ветвей по методу контурных токов. При параллельном соединении ветвей с неидеальными источниками ЭДС каждую ветвь представляют неидеальным источником тока, а затем алгебраически суммируют их токи и преобразуют в эквивалентный неидеальный источник ЭДС. Этапы преобразования первой и второй ветвей показаны на рис. 10. Упрощенная схема замещения с преобразованными ветвями показана на рис. 11.



• Рис.10. Этапы преобразования ветвей с источниками.

Эквивалентные параметры элементов ветви рис. 10, после преобразования участка с параллельным соединением первой и второй ветвей вычисляются по формулам:

$$x_{12} = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} = \frac{0,125 \cdot 0,875}{0,125 + 0,875} = 0,10937;$$

$$E_{12} = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_2 + x_1} = \frac{1,08 \cdot 0,875 + 0,85 \cdot 0,125}{0,875 + 0,125} = 1,05125;$$

При сохранении узлов исходной схемы замещения для участков с последовательным соединением элементов получим

$$x_{13} = x_3 + x_4 = 0,175 + 0,18147 = 0,35647;$$

$$x_{14} = x_5 + x_6 + x_7 = 0,045368 + 0,7 + 1,666 = 2,411368;$$

$$x_{15} = x_8 + x_9 = 0,06049 + 0,3333 = 0,39379;$$

Аналогичные преобразования проведем для параллельно включенных ветвей с неидеальными источниками 10 и 11.

$$x_{16} = \frac{x_{10} \cdot x_{11}}{x_{10} + x_{11}} = \frac{1,4 \cdot 4,0}{1,4 + 4,0} = 1,037;$$

$$E_{13} = \frac{E_{10} \cdot x_{11} + E_{11} \cdot x_{10}}{x_{10} + x_{11}} = \frac{0,9 \cdot 4,0 + 0,85 \cdot 1,4}{1,4 + 4,0} = 0,887.$$

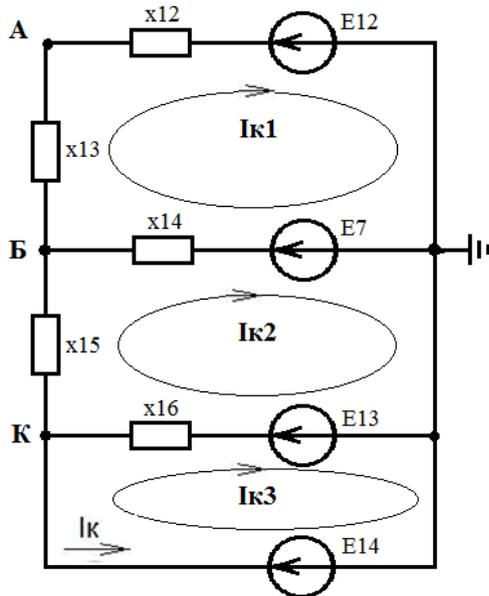


Схема замещения после проведенных преобразований с обозначенными контурами и контурными токами показана на рис. 11. Источник ЭДС $E_{14} = U_k = 0$ введен в схему замещения для отображения пути протекания тока короткого замыкания.

Рис 11. Преобразованная схема замещения.

Принимаем, что номер контура совпадает с индексом протекающего по обозначенному контуру контурного тока, равного началь-

ному сверхпереходному току.

Уравнения с контурными токами в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} (x_{12} + x_{13} + x_{14}) & -x_{14} & 0 \\ -x_{14} & (x_{14} + x_{15} + x_{16}) & -x_{16} \\ 0 & -x_{16} & x_{16} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{к1} \\ I_{к2} \\ I_{к3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_7 - E_{12} \\ E_{13} - E_7 \\ E_{14} - E_{13} \end{vmatrix}$$

После подстановки численных значений

$$\begin{vmatrix} 2,8772 & -2,411368 & 0 \\ -2,411368 & 3,842158 & -1,037 \\ 0 & -1,037 & 1,037 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{к1} \\ I_{к2} \\ I_{к3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,15 \\ -0,313 \\ -0,887 \end{vmatrix}.$$

Определим по правилу Крамера ток третьего контура $I_{к3} = -I_k$

$$I_{*K3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 2,877 & -2,411 & 0,15 \\ -2,411 & 3,842 & -0,313 \\ 0 & -1,037 & -0,887 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2,877 & -2,411 & 0 \\ -2,411 & 3,842 & -1,037 \\ 0 & -1,037 & 1,037 \end{vmatrix}} = \frac{-5,24485}{2,340573} = -2,2408379.$$

Значение тока КЗ в именованных единицах

$$I_K = I_{*K3} \cdot I_{6I} = -2,2408379 \cdot 9,17 = -20,54848 \text{ кА.}$$

Аналогично определяем контурные токи первого и второго контуров

$$I_{*K1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 0,15 & -2,411 & 0 \\ -0,313 & 3,842 & -1,037 \\ -0,887 & -1,037 & 1,037 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{-2,56393}{2,340573} = -1,095428.$$

$$I_{*K2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 2,877 & 0,15 & 0 \\ -2,411 & -0,313 & -1,037 \\ 0 & -0,887 & 1,037 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{-3,21754}{2,340573} = -1,374684.$$

В именованных единицах

$$I_{K1} = I_{*K1} \cdot I_{6III} = I_{*K1} \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{6III}} = \frac{-1,095428 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = -6,02329 \text{ кА};$$

$$I_{K2} = I_{*K2} \cdot I_{6II} = I_{*K2} \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{6II}} = \frac{-1,374684 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 115} = -0,6901516 \text{ кА.}$$

Для расчета ударного тока определим начальные сверхпереходные токи:

- Со стороны трансформатора Т-2

$$\bullet \quad I''_{*T-2} = -I_{K2} = 1,374684.$$

- Асинхронного двигателя

$$\bullet \quad I''_D = \frac{E''_{10}}{x''_{10}} = \frac{0,9}{4} = 0,225.$$

- Обобщенной нагрузки

$$I''_{об.н} = \frac{E''_{11}}{x''_{11}} = \frac{0,85}{1,4} = 0,605.$$

Ударный ток в месте КЗ с учетом подпитки генератором, синхронным компенсатором и нагрузкой **Н-1**, для которых принято значение ударного коэффициента **1,7**, асинхронным двигателем (**1,72**) и обобщенной нагрузки **Н-2** будет:

$$\begin{aligned} i_y &= \sqrt{2} \cdot (I''_{Т-2} K_y + I''_д K_{y.д} + I''_{об.н}) \cdot I_б = \\ &= 1,41 \cdot (1,374684 \cdot 1,7 + 0,225 \cdot 1,72 + 0,605) \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 29,12 \text{ кА} \end{aligned}$$

Для оценки влияния нагрузки Н-1 на сверхпереходный ток КЗ определим:

- остаточное напряжение на шинах ее присоединения (узел **А**):

$$U_A = I_{*к1} \cdot x_{12} + E_{12} = -1,095428 \cdot 0,10937 + 1,05125 = 0,93144.$$

- Остаточное напряжение в узле **Б**:

$$U_B = I''_{Т-2} \cdot (x''_9 + x''_8) = -I_{*к2} \cdot (x''_9 + x''_8) = 1,374 \cdot (0,333 + 0,06) = 0,5409;$$

Сравнивая остаточное напряжение на шинах нагрузки Н-1 (узел А) с ЭДС обобщенной нагрузки делаем вывод, что она по-прежнему является потребителем, уменьшая тем самым ток в месте КЗ

$$U_A = 0,93144 > E''_2 = 0,85.$$

Пример 4

1. Для расчетной схемы электрической системы, изображенной на рис. 12, составить схему замещения нулевой последовательности при коротком замыкании в точке «К» для нахождения в общем виде суммарного сопротивления нулевой последовательности $X_{\Sigma 0}$, с учетом схем соединения обмоток трансформаторов.

Составим уточненную схему замещения для токов нулевой последовательности расчетной схемы примера 4 с учетом схем соединения обмоток и цепей намагничивания силовых трансформаторов (рис. 13) в следующей последовательности:

- Начиная от точки КЗ, где приложено напряжение нулевой последовательности, прослеживаем пути прохождения токов нулевой последовательности и вводим в схему замещения только те элементы, которые обтекаются током. На первом этапе составляем уточненную схему замещения нулевой последовательности, в которой трансформаторы представлены полной схемой замещения с учетом реактивности цепи намагничивания (рис. 13).

- Сопротивление заземления (19) нейтрали обмотки (7) трансформатора Т-2 введено в схему замещения утроенным значением $3x_{19}$ последовательно сопротивлению x_7 .

- Аналогично этому, сопротивление заземления (18) генератора Г-1 учтено утроенным значением $3x_{18}$ последовательно с реактивным сопротивлением генератора x_1 .

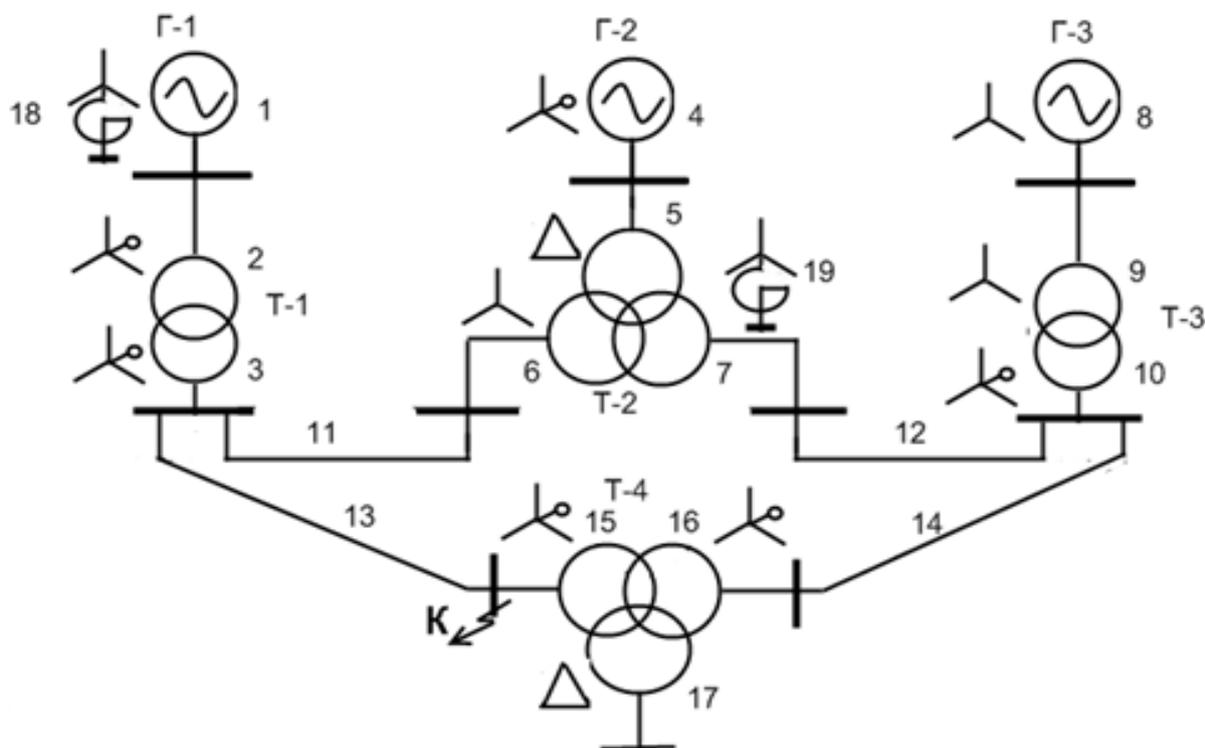


Рис. 12. Расчетная схема примера 4.1.

- Для трансформаторов Т-2 и Т-4, имеющих обмотку, соединенную в треугольник, реактивность намагничивания можно считать равной бесконечности независимо от конструкции трансформаторов. Это следует из того, что сопротивление ветви намагничивания (реактивность 40 – 100%)

зашунтировано малым сопротивлением обмотки, соединенной в треугольник (для трансформаторов Т-2 – это x_5 и для Т-4 это x_{17}), реактивность которого составляет 5 – 7%.

- Для схем замещения трансформаторов Т-1 и Т-3 ветвь намагничивания находится в иных условиях. Если данные трансформаторы считать пятистержневыми, то реактивность ветви намагничивания составит 5000%, в то время как сопротивление реактивности рассеяния каждой из обмоток 2, 3, 10 составляет 5 – 7%, что позволяет практически считать сопротивление ветви намагничивания равным бесконечности. Если же трансформаторы Т-1 и Т-3 считать трехстержневыми, то сопротивление реактивности ветви намагничивания составляет 40 – 100%, и пренебречь влиянием этого реактанса можно только с определенной натяжкой.

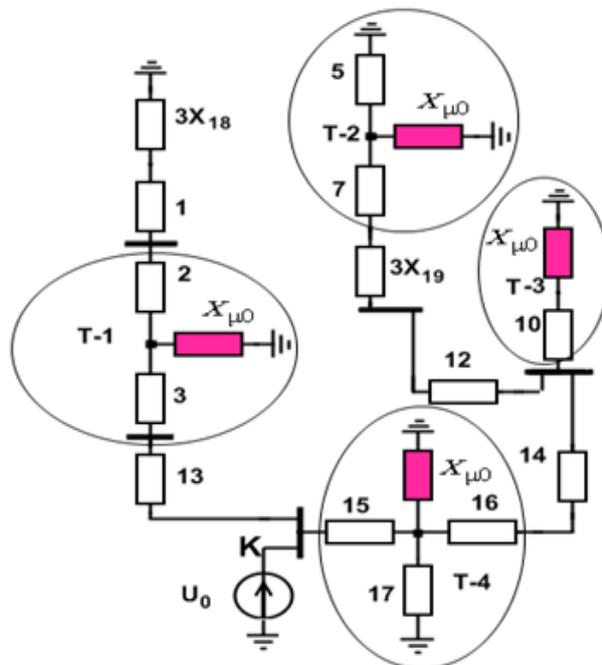
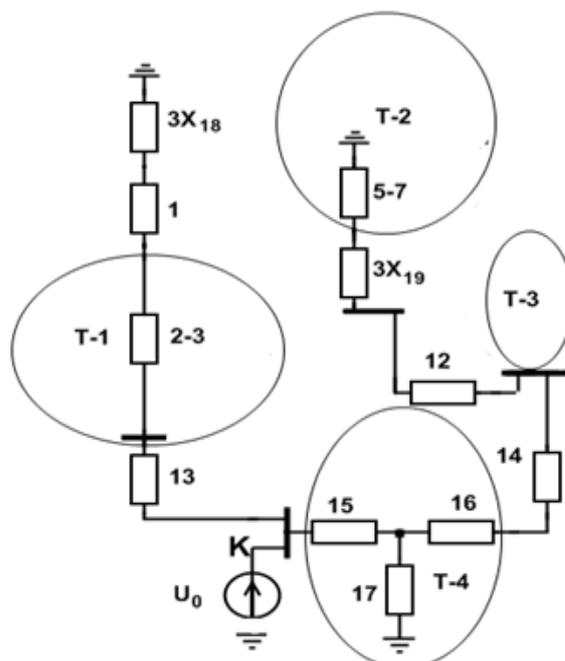


Рис. 13. Уточненная схема замещения нулевой последовательности.

Схема замещения, с учетом изложенных выше замечаний, без учета ветвей намагничивания (упрощенная) показана на рис.14.

Рис.14. Упрощенная схема замещения электрической системы рис. 12 для определения суммарной реактивности нулевой последовательности.

2. Для случая однофазного короткого замыкания на землю в точке «К» расчетной схемы, показанной на рис. 15, составить схему замещения нулевой последовательности и определить ее результирующую реактивность относительно места КЗ.



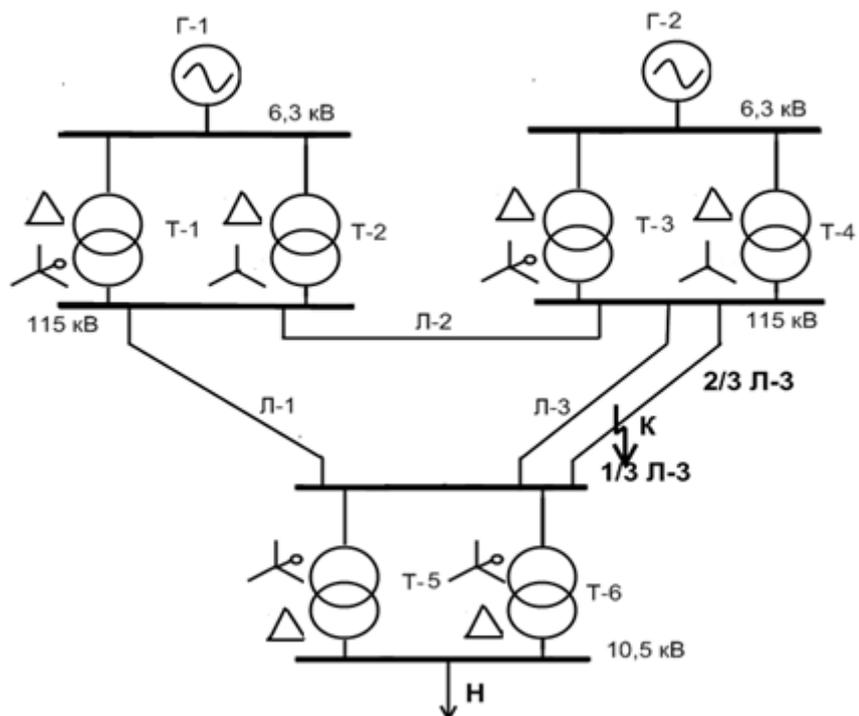


Рис. 15. Расчетная схема примера 4.2.

- Исходные данные:

Таблица 17

Тип оборудования	Полная мощность, МВА	Номинальное напряжение, кВ	Сверх-переходная реактивность x''_d	Реактивность обратной последовательности x_2	Напряжение короткого замыкания $U_k\%$	Коэффициент трансформации $K_T = \frac{U_H}{U_B}$
Турбогенератор Г-1	60,0	6,3, АРВ- сеть	0,15	0,15	-	-
Турбогенератор Г-2	60,0	6,3, АРВ- сеть	0,15	0,15	-	-
Трансформаторы Т-1, Т-2, Т-3, Т-4	10,0	-	-	-	10,5	10,5/115
Трансформаторы Т-5, Т-6	20,0	-	-	-	10,5	10,5/115

Таблица 18

Линия электропередачи	Длина, км	Погонное сопротивление, Ом/км	Сопротивление взаимной индуктивности между цепями двухцепной линии на одну фазу
Л-1	40	0,4	$x_{1-2} = 0,6x_{(1)}$
Л-2	30	0,4	
Л-3	60	0,4	

Нагрузка Н – 35 МВА.

Расчет.

- Составляем схему замещения нулевой последовательности исходной расчетной схемы (рис. 15) и принимаем базисные условия по мощности произвольно, так как тип генератора не указан, $S_6 = 100$ МВА и $U_6 = U_{cp}$, т.е. в дальнейшем используем формулы приближенного приведения.

- Рассчитываем по формулам приближенного приведения сопротивления элементов схемы в относительных единицах в следующей последовательности:

- принимая сопротивление нулевой последовательности каждой цепи электропередачи равным $x_{0i} = 3,5x_{л(1)}$ определим сопротивление 1 км одноцепной электропередачи для прямой последовательности

$$X_{л(1)} = X_{(1)} \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \frac{100}{115^2} = 0,00303.$$

Тогда реактивности нулевой последовательности ЛЭП:

- - Л-1 $X_{01} = 3,5X_{л(1)} \cdot l_1 = 3,5 \cdot 0,00303 \cdot 40 = 0,424.$

- - Л-2 $X_{02} = 3,5X_{л(1)} \cdot l_2 = 3,5 \cdot 0,00303 \cdot 30 = 0,318.$

- - Л-3 $X_{03} = 3,5X_{л(1)} \cdot l_3 = 3,5 \cdot 0,00303 \cdot 60 = 0,636.$

- - реактивность нулевой последовательности участка расчетной схемы от трансформатора Т-6 до точки короткого замыкания

$$x_{05} = \frac{x_{03}}{3} = \frac{0,636}{3} = 0,212$$

- - реактивность нулевой последовательности участка расчетной схемы от трансформатора Т-4 до точки КЗ

$$x_{04} = 2 \frac{x_{03}}{3} = \frac{2 \cdot 0,636}{3} = 0,424$$

- - реактивности трансформаторов Т-1 и Т-3:

$$x_6 = x_7 = \frac{U_k \cdot S_6}{100\% \cdot S_{T1}} = \frac{10,5\% \cdot 100}{100\% \cdot 10} = 1,05$$

- реактивности трансформаторов - Т-5 и Т-6 (группы соединения обмоток этих трансформаторов одинаковы, поэтому их реактивности равны и включены параллельно), поэтому оба трансформатора представим эквивалентной реактивностью

$$x_8 = \frac{U_k \cdot S_6}{100\% \cdot S_{T5}} = 0,5 \cdot \frac{10,5\% \cdot 100}{100\% \cdot 20} = 0,263$$

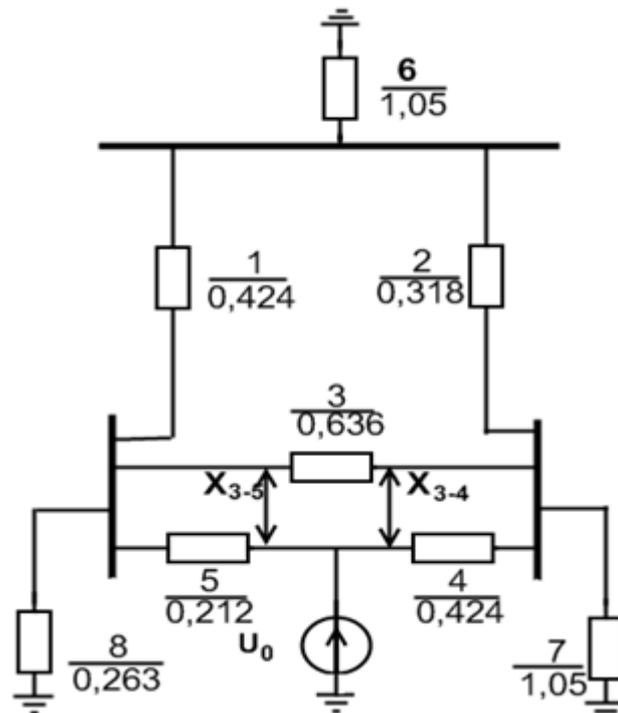


Рис. 16. Схема замещения расчетной схемы примера 4.2.

• - сопротивление взаимной индуктивности на участках двухцепной линии Л-3 для токов нулевой последовательности составляет

$$x_{3-5} = 3 \cdot x_{I-II} \cdot x_{л(1)} \cdot \frac{l_3}{3} = 3 \cdot 0,6 \cdot 0,00303 \cdot \frac{60}{3} = 0,1089;$$

$$x_{3-4} = 3 \cdot x_{I-II} \cdot x_{л(1)} \cdot \frac{2 \cdot l_3}{3} = 3 \cdot 0,6 \cdot 0,00303 \cdot 2 \cdot \frac{60}{3} = 0,2176$$

Коэффициент 3 в расчетных выражениях обусловлен взаимодействием токов нулевой последовательности трех фаз одной из цепей с каждой фазой второй цепи.

С целью упрощения схемы замещения проведем предварительное преобразование схемы: заменим звезду сопротивлений с лучами 1, 2, 6 эквивалентным треугольником сопротивлений со сторонами 9, 10, 11, т.е.

$$x_9 = x_{01} + x_6 + \frac{x_6 \cdot x_{01}}{x_{02}} = 0,424 + 1,05 + \frac{0,424 \cdot 1,05}{0,318} = 2,874;$$

$$x_{10} = x_{02} + x_6 + \frac{x_6 \cdot x_{02}}{x_{01}} = 0,318 + 1,05 + \frac{0,318 \cdot 1,05}{0,424} = 2,155;$$

$$x_{11} = x_{01} + x_{02} + \frac{x_{01} \cdot x_{02}}{x_6} = 0,318 + 0,424 + \frac{0,424 \cdot 0,318}{1,05} = 0,87.$$

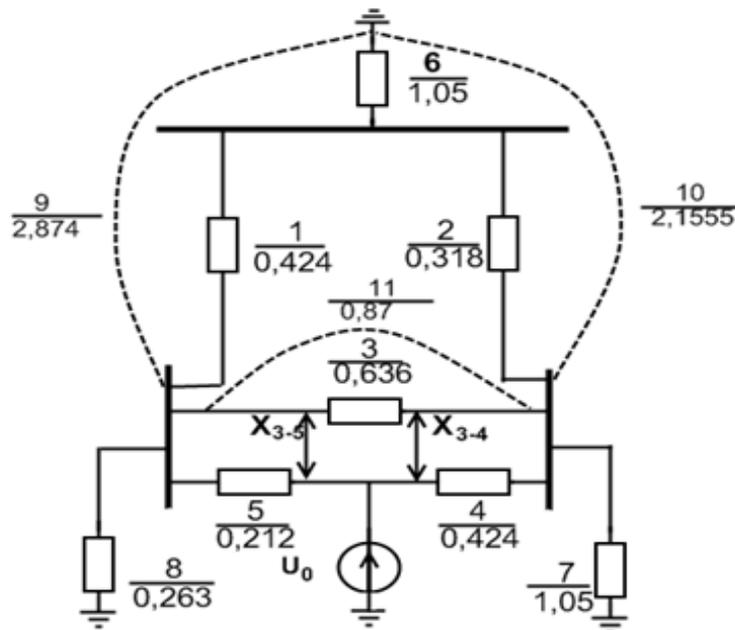


Рис. 17. Преобразование схемы замещения: 1-й этап.

- Заменяем сопротивления ветвей 8, 9 и 7, 10 эквивалентными
-

$$x_{12} = \frac{x_8 \cdot x_9}{x_8 + x_9} = \frac{0,263 \cdot 2,874}{0,263 + 2,874} = 0,241;$$

$$x_{13} = \frac{x_7 \cdot x_{10}}{x_7 + x_{10}} = \frac{1,05 \cdot 2,155}{1,05 + 2,155} = 0,706.$$

С учетом проведенных преобразований получаем расчетную схему, изображенную на рис. 18, на которой обозначаем выбранные контуры и записываем систему уравнений с контурными токами $I_{к1}, I_{к2}, I_{к3}, I_{к4}, I_3, I_4, I_5, I_{11}$ с учетом *взаимной индуктивности* между участками двухцепной линии Л-3.

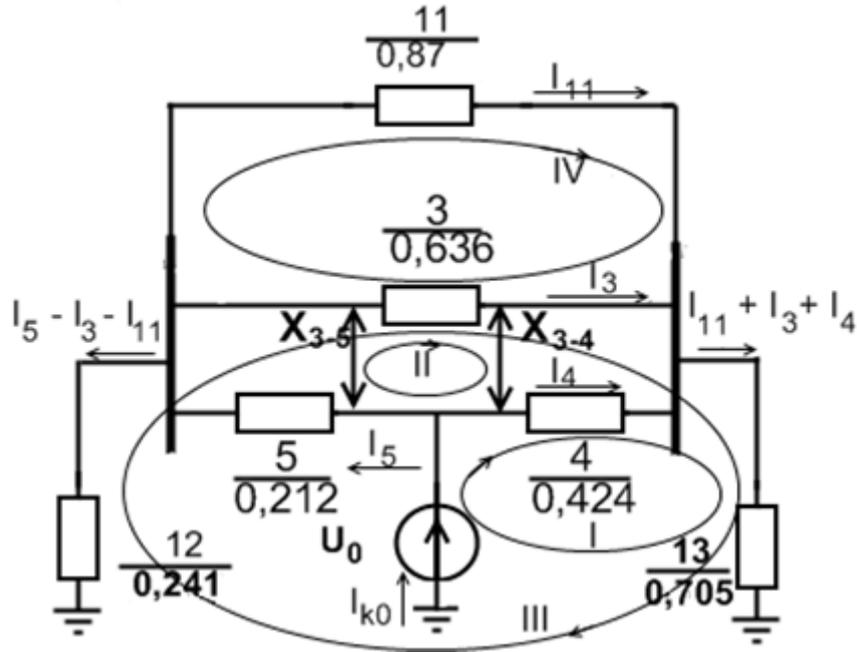


Рис. 18. Преобразование схемы замещения: 2-й этап и выбор контуров.

Результирующее (суммарное) сопротивление нулевой последовательности определим как входное сопротивление схемы замещения относительно зажимов источника напряжения нулевой последовательности U_0 при протекании по нему нулевой составляющей тока короткого замыкания

$$x_{0\Sigma} = U_0 / I_{к0}.$$

Для решения задачи составим уравнения Кирхгофа согласно обозначениям на рис.18.

$$I_4 x_4 + (I_{11} + I_3 + I_4) \cdot x_{13} + I_3 x_{3-4} = U_0;$$

$$I_3 \cdot x_3 + I_4 \cdot x_{3-4} - I_5 \cdot x_{3-5} - I_4 \cdot x_4 - I_3 \cdot x_{3-4} + I_5 \cdot x_5 - I_3 \cdot x_{3-5} = 0;$$

$$I_3 \cdot x_3 + I_4 \cdot x_{3-4} - I_5 \cdot x_{3-5} + (I_{11} + I_3 + I_4 \cdot x_{13}) - (I_5 - I_3 - I_{11})x_{12} = 0;$$

$$-I_3 \cdot x_3 - I_4 \cdot x_{3-4} + I_5 \cdot x_{3-5} + I_{11} \cdot x_{11} = 0$$

После подстановки численных значений система уравнений принимает вид

$$I_3 \cdot 0,9238 + I_4 \cdot 1,13 + I_5 \cdot 0 + I_{11} \cdot 0,706 = U_0;$$

$$I_3 \cdot 0,3093 + I_4 \cdot 0,2062 + I_5 \cdot 0,1031 + I_{11} \cdot 0 = 0;$$

$$I_3 \cdot 1,583 + I_4 \cdot 0,9238 + I_5 \cdot 0,3499 + I_{11} \cdot 0,947 = 0;$$

$$I_3 \cdot 0,636 + I_4 \cdot 0,2178 + I_5 \cdot 0,1089 + I_{11} \cdot 0,87 = 0.$$

Представив полученную систему уравнений в матричном виде определим искомые переменные по методу Крамера.

Определитель системы уравнений

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0,9238 & 1,13 & 0 & 0,706 \\ 0,3093 & -0,2062 & 0,1031 & 0 \\ 1,583 & 0,9238 & -0,3499 & 0,947 \\ -0,636 & -0,2178 & 0,1089 & 0,870 \end{vmatrix} = 0,3388;$$

Для расчета нулевой составляющей тока короткого замыкания определим токи четвертой и пятой ветвей, поскольку в соответствии с выбранными условными положительными направлениями токов ветвей схемы рис. 14X ток КЗ $I_{к0} = I_4 + I_5$. Подставляя в определитель системы уравнений вместо второго столбца матрицу столбец задающих переменных по правилу Крамера определим ток четвертой ветви

$$I_4 = \frac{\hat{\Delta}_4}{\Delta}$$

где

$$\Delta'_4 = \begin{vmatrix} 0,9238 & U_0 & 0 & 0,706 \\ 0,3093 & 0 & 0,1031 & 0 \\ 1,583 & 0 & -0,3499 & 0,947 \\ -0,636 & 0 & 0,1089 & 0,870 \end{vmatrix} = 0,33014 \cdot U_0;$$

Аналогично определим ток пятой ветви, подставив в определитель матричного уравнения вместо третьего столбца матрицу-столбец задающих переменных

$$I_5 = \frac{\hat{\Delta}_5}{\Delta}$$

где

$$\Delta'_5 = \begin{vmatrix} 0,9238 & 1,13 & U_0 & 0,706 \\ 0,3093 & -0,2062 & 0 & 0 \\ 1,583 & 0,9238 & 0 & 0,947 \\ -0,636 & -0,2178 & 0 & 0,870 \end{vmatrix} = 0,72055 \cdot U_0.$$

Тогда

$$I_{к0} = I_4 + I_5 = \frac{\hat{\Delta}_4}{\Delta} + \frac{\hat{\Delta}_5}{\Delta} = \frac{\hat{\Delta}_4 + \hat{\Delta}_5}{\Delta}$$

Суммарное сопротивление нулевой последовательности относительно зажимов источника напряжения нулевой последовательности определим в относительных единицах по закону Ома

$$x_{0\Sigma} = \frac{U_0}{I_{к0}} = \frac{U_0 \cdot \Delta}{\hat{\Delta}_4 + \hat{\Delta}_5} = \frac{U_0 \cdot \Delta}{0,33014U_0 + 0,72055U_0} = \frac{0,3388}{1,05069} = 0,32245.$$

4. Контрольные вопросы.

4.1. Симметричные короткие замыкания.

1. Алгоритм расчета тока трехфазного КЗ по методу спрямленных характеристик.
2. Алгоритм расчета тока трехфазного КЗ по методу расчетных кривых.
3. Алгоритм расчета тока трехфазного КЗ по методу типовых кривых.
4. Алгоритм определения сопротивлений основных элементов схемы замещения в относительных единицах по формулам точного и приближенного приведения.

5. Порядок перехода от относительных к именованным единицам при использовании формул точного и приближенного приведения.
6. Векторная диаграмма синхронной машины в переходном режиме и порядок ее построения.
7. Схемы замещения синхронной машины в переходном режиме.
8. Векторная диаграмма синхронной машины в сверхпереходном режиме и порядок ее построения.
9. Схемы замещения синхронной машины в сверхпереходном режиме.
10. Порядок практического расчета начального сверхпереходного и ударного тока.
11. Влияние и учет нагрузки при трехфазном КЗ.
12. Алгоритм расчета тока симметричного трехфазного КЗ при наличии и отсутствии АРВ.
13. Какими параметрами характеризуют процесс в начальный момент внезапного нарушения режима СМ и почему?
14. Алгоритм расчета начального сверхпереходного тока.
15. Алгоритм расчета ударного тока.
16. Дифференциальные уравнения СМ без демпферных обмоток.
17. Уравнения Парка-Горева в двухосной системе координат ротора.
18. Уравнения Парка-Горева в операторной форме.
19. Форсировка возбуждения синхронной машины. Критическое время.
20. Гашение магнитного поля синхронной машины.
21. Внезапное КЗ синхронной машины.
22. Влияние АРВ при внезапном КЗ синхронной машины.
23. Каскадное отключение и повторное включение КЗ.
24. Взаимное электромагнитное влияние синхронных машин при переходном процессе.
25. Практические методы расчета переходного процесса КЗ.
26. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности.
27. Приближенный учет системы при практических расчетах симметричных КЗ.

4.2 Несимметричные короткие замыкания.

1. Влияние магнитной несимметрии ротора на переходный процесс при несимметричном КЗ.
2. Основные уравнения Кирхгофа в базисе несимметричных составляющих.

3. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной цепи.
4. Параметры синхронных машин для токов обратной и нулевой последовательности.
5. Параметры асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки для токов обратной и нулевой последовательностей.
6. Параметры трансформаторов и автотрансформаторов для токов обратной и нулевой последовательностей.
7. Параметры воздушных линий для токов нулевой последовательности.
8. Порядок составления схем замещения отдельных последовательностей.
9. Результирующие Э.Д.С. и сопротивления при несимметричных режимах.
10. Распределение и трансформация токов и напряжений при несимметричных КЗ.
11. Расчет тока КЗ при двухфазном КЗ .
12. Расчет тока при однофазном КЗ.
13. Расчет тока при двухфазном КЗ на землю.
14. Влияние переходного сопротивления на величину тока КЗ.
15. Комплексные схемы замещения.
16. Сущность правила эквивалентности прямой последовательности и порядок его применения в расчетах несимметричного КЗ.
17. Порядок построения векторных диаграмм токов и напряжений в месте КЗ (например, для однофазного КЗ).
18. Порядок расчета несимметричного КЗ по методу расчетных кривых.
19. Порядок расчета несимметричного КЗ по методу спрямленных характеристик.
20. Приведите сравнение видов КЗ по величине остаточного напряжения в месте КЗ и токов прямой последовательности.
21. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности при несимметричном КЗ.
22. Порядок расчета фазных токов при разрыв одной фазы.
23. Порядок расчета разности фазовых напряжений при разрыве двух фаз.
24. Порядок построения векторных диаграмм при однократной продольной несимметрии.
25. Комплексные схемы замещения для случаев продольной несимметрии.
26. Расчет симметричных составляющих токов КЗ при двойном замыкании на землю.

27. Простое замыкание на землю в распределительных сетях.
28. Учет изменения параметров проводников распределительной сети.
29. Порядок расчета токов КЗ в установках до 1000 В.
30. Короткие замыкания в длинных линиях передачи переменного тока.

Приложение 1

Таблица П1.1

Типы турбогенераторов				
Наименование серии*	Расшифровка	Система охлаждения		
		Обмотка статора	Сердечник статора	Обмотка ротора
T2-2,5-2; T2-4-2; T2-6-2; T2-12-2 (завод «Электросила»); T-2,5-2УЗ; T-4-2УЗ; T6-2УЗ; T-12-2УЗ (Лысьвинский завод)	Т — турбогенератор; 2 — вторая серия; 2,5 — мощность, 2 — двухполюсный, УЗ — климатическое исполнение и категория размещения	Косвенное воздушное	Непосредственное воздушное	Косвенное воздушное
ТВ2-30-2; ТВ2-100-2; ТВ2-150-2 (завод «Электросила»)	В — водородное охлаждение	Косвенное водородом	Непосредственное водородом	Косвенное водородом
ТВФ-63-2ЕУЗ; ТВФ-110-2ЕУЗ (ЛПЭО «Электросила»)	Ф — форсированное охлаждение ротора	Косвенное водородом	Непосредственное водородом	Непосредственное водородом
ТВВ-160-2ЕУЗ; ТВВ-220-2ЕУЗ; ТВВ-320-2ЕУЗ; ТВВ-500-2ЕУЗ; ТВВ-800-2ЕУЗ (ЛПЭО «Электросила»); ТВВ-1000-2УЗ; ТВВ-1200-УУЗ (ЛПЭО «Электросила»)	ВВ — водородно-водяное охлаждение, Е — единая серия	Непосредственное водой	Непосредственное водородом	Непосредственное водородом
ТЗВ-800-2УЗ (ЛПЭО «Электросила»)	ЗВ — трижды водяное охлаждение	Непосредственное водой	Непосредственное водой	Непосредственное водой
ТГВ-200-2; ТГВ-200-2Д; ТГВ-200-МТ; ТГВ-200-2М; ТГВ-300-2; ТГВ-500-2 (Харьковский завод «Электротяжмаш»)	ТГ — турбогенератор, водородно-водяное охлаждение обмоток, М — модификация	Непосредственное водородом, для ТГВ-500, 800, ТГВ-200-2М — водой	Непосредственное водородом	Непосредственное водородом, для ТГВ-500, 800 — водой
ТВМ-300, ТВМ-500 (ПО «Сибэлектротяжмаш»)	М — масляное охлаждение статора погружного исполнения, В — водяное охлаждение обмотки ротора	Непосредственное маслом	Непосредственное маслом	Непосредственное водой

* Число после первой черточки — мощность в мегаваттах.

Следует отметить, что в связи с изменением организации хозяйственной деятельности в последнее десятилетие и распадом СССР наблюдаются негативные тенденции в состоянии и структуре электроэнергетических мощностей. Так, более 50 % общего числа турбогенераторов России отработали установленными нормами минимальные сроки службы. Например, парк турбогенераторов мощностью 60 МВт и более, отслуживших более 25 лет, составляет 55 % против 41 % в США, и в то же время турбогенераторы, прослужившие в России менее 20 лет, составляют 26 %, а в США — 43 %. Такая ситуация диктует необходимость осуществления замены наиболее изношенных генераторов на новые наряду с мероприятиями по продлению срока службы остальных машин путем совершенствования профилактического обслуживания на базе непрерывного контроля и текущего ремонта.

II.1. Турбогенераторы серии ТГВ и ТВМ

В серию ТГВ входят турбогенераторы мощностью 200, 300 и 500 МВт (табл. П2). Корпус статора — цилиндрический, сварной, газоплотный. Турбогенераторы мощностью 200 и 300 МВт выполнены в однокорпусном исполнении. Корпус статора турбогенератора мощностью 500 МВт состоит из трех частей — центральной и двух приставных с торцов коробов. Корпус статора заполнен водородом под давлением.

Сердечник статора собран на продольные призмы. Для снижения вибрации внутренний корпус устанавливается в корпусе статора на пластинчатых пружинах, расположенных в несколько рядов по длине машины. Сердечник состоит из отдельных пакетов, разделенных кольцевыми радиальными каналами. Сердечник запрессовывается с помощью массивных нажимных фланцев, изготавливаемых из немагнитной стали.

Обмотка статора - трехфазная, двухслойная, стержневая, с укороченным шагом. Лобовые части обмотки — корзиночного типа. Стержни обмотки с непосредственным газовым охлаждением имеют вентиляционные каналы, образованные изолированными трубками из немагнитной стали. Стержни обмотки с водяным охлаждением состоят из сплошных и полых медных проводников. Изоляция стержня — терморезистивная, типа ВЭС-2.

Ротор изготавливается из высококачественной стали. В бочке ротора имеются радиальные пазы с параллельными стенками. Обмотка ротора с газовым охлаждением выполняется из медных полос специального профиля. В турбогенераторах мощностью 200 и 300 МВт используется одноступенчатый центробежный компрессор, расположенный на валу ротора.

Для турбогенератора мощностью 500 МВт принято непосредственное водяное охлаждение обмотки ротора, выполненной из медных проводников прямоугольной формы с круглым внутренним отверстием. Подход

воды осуществляется через торец ротора. Водой охлаждаются также токоподвод и частично контактные кольца. Бандажные кольца для крепления лобовых частей обмотки ротора непосредственно насажены на бочку ротора и закреплены с помощью кольцевой зубчатой шпонки.

Турбогенераторы мощностью 200 и 300 МВт имеют массивные торцевые щиты с встроенным узлом подшипников. Подшипники турбогенератора мощностью 500 МВт встроены в концевые части статора. В турбогенераторах применяются водородные уплотнения торцевого или кольцевого типа. В серию ТВМ входят турбогенераторы мощностью 300 и 500 МВт (см. табл. П2). Турбогенераторы имеют масляное охлаждение обмотки и сердечника статора и водяное ротора.

Таблица П1.2.

Технические данные турбогенераторов серии ТГВ и ТВМ ($\cos\phi = 0,85$)

Тип генератора	Мощность активная, МВт	Напряжение статора, кВ	Ток статора, кА	Напряжение возбуждения, В	Ток возбуждения, А	КПД, %
ТГВ-200-2М	200	15,75	8,625	420	1890	98,6
ТГВ-300-2	300	20	10,2	420	3050	98,7
ТГВ-500-2	500	20	17,0	440	5120	98,83
ТГВ-500-4	500	20	17,0	440	4380	98,8
ТВМ-300-2	300	20	10,2	282	4420	98,8
ТВМ-500-2	500	36,75	9,24	430	5560	98,8

Продолжение табл. П1.2

Тип турбогенератора	Частота вращения, об/мин	Расход материалов, кг/(кВ-А)	Давление водорода в корпусе, кПа	ОКЗ	Статическая перегружаемость	Индуктивные сопротивления, о. е.	
						$x'd$	
ТГВ-200-2М	3000	1,09		0,555	1,73	0,31	0,204
ТГВ-300-2	3000	1,03	300	0,505	1,715	0,30	0,195
ТГВ-500-2	3000	0,615	300	0,44	1,65	0,373	0,243
ТГВ-500-4	1500	0,84	300	0,5	1,87	0,398	0,268
ТВМ-300-2	3000	1,11	300	0,494	1,70	0,352	0,204
ТВМ-500-2	3000	0,58		0,44	1,65	0,38	0,268

Статор турбогенераторов заполнен изоляционным маслом, объем которого ограничивается корпусом, торцевыми щитами и изоляционным цилиндром, заведенным в расточку статора. Сердечник статора выполнен в виде одного сплошного пакета, набранного из штампованных сегментов электротехнической стали. Обмотка статора — стержневая, двухслойная с

бумажно-масляной изоляцией. Обмотка охлаждается маслом, протекающим внутри полых проводников (турбогенератор мощностью 300МВт) или по щелевому каналу в стержне (турбогенератор мощностью 500 МВт).

Ротор изготавливается из цельной поковки высокопрочной легированной стали. Катушки обмотки ротора выполнены из полых медных проводников. Ротор охлаждается конденсатом, циркулирующим по каналам проводников. В турбогенераторе мощностью 500 МВт применено жидкостное охлаждение поверхности бочки ротора, осуществляемое с помощью конденсата, протекающего по трубкам, расположенным в зубцах ротора.

II.1. Гидрогенераторы

На 64 гидроэлектростанциях России мощностью 30 МВт и более работают 395 агрегатов общей мощностью около 44 ГВт (44 тыс. МВт) (табл. ПЗ).

Таблица П1.3

Мощность гидрогенераторов		
Группа	Диапазон мощностей генераторов, МВт	Суммарная мощность генераторов, ГВт
1	до 49	6,60
2	50—99	6,64
3	100—199	6,94
4	200—300	11,42
5	500 и более	12,40
		Итого 44,00

Основная доля вырабатываемой гидроэлектростанциями электроэнергии (54,2 %) в России приходится на *гидрогенераторы* большой мощности (200—640 МВт). Из 120 ГЭС в мире мощностью 1000 МВт и более российских — 10, т.е. одна двенадцатая часть. Однако использование гидропотенциала по нашей стране неравномерное: в европейской части страны оно составляет 46,4 %, в Сибири 19,7 %, в восточных регионах только 3,3 % и в среднем по стране около 20 %. Экономически целесообразный к использованию гидропотенциал страны составляет 850 млрд кВт ч в год, что примерно в 5 раз больше возможностей сегодняшних ГЭС. Во Франции и Германии степень использования экономически целесообразного гидропотенциала более 90 %, в Японии — 84 %, в США — 73 %, Испании — 63 % и т.д.

Мощности единичных гидроагрегатов определяются прежде всего параметрами источников гидроэнергии, однако в настоящее время имеется тенденция увеличения мощности применяемых гидрогенераторов. Рекордными по полной или кажущейся (измеряемой в мегавольт-амперах — МВ·А) мощности гидрогенераторами могут быть названы машины ГЭС Итайпу (Бразилия) — 823,6 МВ·А, Саяно-Шушенской ГЭС (Россия) — 820 МВ·А, 142,8 об/мин, Гранд-Кули (США) — 600 МВ·А, 73,2 об/мин.

Обычно в гидрогенераторах используется воздушное и водяное охлаждение (косвенное, форсированное или непосредственное). При *непосредственном охлаждении* охлаждающий агент (воздух или жидкость) непосредственно соприкасается с проводниками, отводя от них теплоту. Эффективность охлаждения резко возрастает, если в качестве охлаждающего агента применяется вода. Непосредственное водяное охлаждение обмотки статора впервые в мире было применено на гидрогенераторах Красноярской ГЭС. Зарубежные фирмы также уделяют много внимания проблемам использования непосредственного водяного охлаждения гидрогенераторов. Водой могут охлаждаться не только обмотки статора и ротора, но и сердечники статора, его нажимные плиты. КПД гидрогенераторов весьма высок. При больших мощностях он достигает 97—98,7 %.

Большая доля отечественных гидрогенераторов отработала уже 30 лет и более. Ввод новых мощностей в последние 20 лет существенно отстает от среднего мирового уровня. Доля гидрогенераторов со сроком службы менее 30 лет в мире составляет около 65 %, в России только 40 %. Для 77 % отечественных гидрогенераторов по ГОСТ уже истек нормативный срок службы. Зарубежный опыт многих стран показывает, что полная замена гидрогенераторов может быть экономически выгодной только для машин малой мощности, для остальной же части более целесообразна модернизация действующего оборудования.

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**
(ВлГУ)

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Курсовая работа
по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических
системах» на тему:

«Расчет токов при коротких замыканиях в электрических системах»

Выполнил: ст. гр. _____

Ф.И.О. _____

Принял: Колесник Г.П.

Владимир 2016

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**
(ВлГУ)

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Расчетно-графическая работа
по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических
системах» на тему:

«Расчет устойчивости системы электроснабжения по практическим
критериям»

Выполнил: ст. гр. _____

Ф.И.О. _____

Принял: Колесник Г.П.

Владимир 2016

Библиографический список:

1. Колесник, Г. П. Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие / Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2004. – 128 с.
2. Колесник, Г. П. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие / Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2008. – 116 с.
3. Расчет токов при коротких замыканиях и устойчивости систем электроснабжения по практическим критериям. Методические указания к практическим занятиям / Г.П. Колесник. Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2005. 86 с.
4. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов. / С.А. Ульянов. – М.: Энергия. 1970. – 470 с.
5. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 416 с. : ил.
6. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 2-е. Учебник для энергетич. спец. вузов. / В.А. Веников. – М.: «Высшая школа», 1970. 472 с.: ил.
7. «Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях»; Учебн. пособие для вузов. / Под ред. Веникова В.А. – М.: Энергоиздат, 1983.- 504с.
8. Жданов, П.С. «Вопросы устойчивости электрических систем». / П.С. Жданов. – М: Энергия, 1979. - 520с.