



Министерство образования и науки Самарской области
Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение
Самарской области

«САМАРСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»
(ГБПОУ «СЭК»)

Кафедра электротехники

О.Н. Спирина, А.П. Волков

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Методические указания к лабораторно-практическим занятиям
для студентов
специальности 13.02.03. Электрические станции, сети и системы

ПМ.02 Эксплуатация электрооборудования электрических станций,
сетей и систем

МДК 02.02 Релейная защита электрооборудования электрических
станций, сетей и систем

Самара 2018

Расчет токов короткого замыкания. Методические указания к лабораторно-практическим занятиям МДК 02.02 *Релейная защита электрооборудования электрических станций сетей и систем* для студентов специальности 13.02.03 / сост.: О.Н. Спирина – Самара: ГБПОУ «СЭК», 2018 – 36 с.

Издание содержит методические указания к лабораторно-практическим занятиям. Соответствует Федеральным государственным образовательным стандартам среднего профессионального образования специальности 13.02.03 *Электрические станции, сети и системы*.

Рассмотрено на заседании кафедры электротехники (протокол № 9 от 14.03.2018)

Рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим советом ГБПОУ «СЭК» (протокол № 4 от 15.03.2018 г.)

Рецензенты:

Волков А.П. – преподаватель ГБПОУ «Самарский энергетический колледж»

Путько В.Ф. – д.т.н., профессор, председатель Саморегулируемой организации «Ассоциация энергоаудиторов и энергосервисных компаний Самарской области»

Замечания, предложения и пожелания направлять в ГБПОУ «СЭК» по адресу: 443001, г. Самара, ул. Самарская 205-А.

Введение

Методические указания к лабораторно-практическим занятиям по теме *Расчет токов короткого замыкания* междисциплинарного курса МДК 02.02 *Релейная защита электрооборудования электрических станций сетей и систем* предназначены для студентов и преподавателей специальности 13.02.03 *Электрические станции, сети и системы*.

Комплекс лабораторно-практических работ разработан в соответствии с программой профессионального модуля ПМ.02 *Эксплуатация электрооборудования электрических станций, сетей и систем* и включает в себя часть лабораторных и практических работ второго раздела *Настройка устройств релейной защиты электрооборудования электрических станций, сетей и систем*. Содержание методических указаний соответствует федеральным государственным образовательным стандартам среднего профессионального образования специальности 13.02.03.

Цель методической разработки: самостоятельная работа студентов при подготовке к лабораторному и практическому занятию; работа на уроке по закреплению полученных теоретических знаний, приобретению практических навыков и умений.

Для повышения эффективности при проведении лабораторно-практических занятий и активного участия в них каждый студент должен заранее готовиться. Подготовка к занятию складывается из освоения теоретического материала, изучения цели и содержания лабораторной и практической работы. Результаты подготовки отражаются студентом в заранее подготовленном отчете по лабораторно-практическим занятиям, куда записываются: название работы, цель, материально-техническое оснащение, план выполнения лабораторной или практической работы, расчетные формулы, зарисовываются электрические схемы и таблицы для записи опытных и расчетных данных.

Все записи и рисунки в отчете, как при подготовке, так и в процессе выполнения работы, должны вестись аккуратно с соблюдением действующих ГОСТ и ЕСКД.

Лабораторные занятия проводятся в подгруппах, состав которых определяет преподаватель. В каждой подгруппе выделяется несколько звеньев из 3-4 человек, один из студентов звена назначается старшим. Он отвечает за выполнение звеном лабораторных работ, бережное отношение к оборудованию рабочего места и сохранению его в исправном состоянии. В обязанности старшего входит: руководство звеном при выполнении лабораторных работ, распределение обязанностей в звене, наблюдение за выполнением мер электробезопасности, поддержание порядка на рабочем месте, получение недостающих и замена неисправных проводников, приборов и аппаратуры, представление преподавателю результатов работы. По окончании работы старший звена обязан организовать наведение порядка на рабочем месте и сдать рабочее место преподавателю. Требование старшего обязательно для всех членов звена.

Практические занятия проводятся без деления учебной группы на подгруппы.

В начале лабораторно-практического занятия преподаватель проверяет подготовленность каждого студента (путем опроса или другого вида контроля и ознакомления с записями в рабочей тетради).

Студенты, не подготовленные к занятию, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

По результатам выполненной лабораторно-практической работы каждый студент самостоятельно должен составить отчет. Отчет по предыдущей работе сдается преподавателю на следующем занятии, при этом производится защита отчетов по выполненным работам. Форма зачета и порядок ее проведения определяются преподавателем. Студенты, проявившие старание при выполнении работ, показавшие при этом твердые теоретические знания и практические навыки, аккуратно, без ошибок оформившие отчет, от защиты могут быть освобождены.

Отчеты по работам хранятся в кабинете преподавателя или на кафедре в течение учебного года.

Уважаемый студент!

Методические указания созданы в помощь Вам для подготовки к лабораторно-практическим занятиям.

Оценку по лабораторно-практическому занятию Вы получаете с учетом срока выполнения работы, если:

- задание выполнено правильно и в полном объеме;
- сделан анализ проделанной работы и вывод по результатам работы;
- Вы можете пояснить выполнение любого этапа работы;
- отчет выполнен в соответствии с требованиями.

Внимание! Если в процессе подготовки к лабораторно-практическим занятиям или при их выполнении у Вас возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения разъяснений.

Желаем Вам успехов!!!

Перечень лабораторно-практических занятий

№ п/п	Название лабораторно-практических занятий
1	Лабораторное занятие 1. Расчет симметричных токов коротких замыканий (КЗ) на ЭВМ.
2	Лабораторная занятие 2. Расчёт несимметричных токов коротких замыканий на ЭВМ.
3	Лабораторная занятие 3. Определение токов несимметричных КЗ при различных схемах соединений обмоток двухобмоточных трёхфазных трансформаторов.
4	Практическое занятие 1. Определение расчётных токов симметричных коротких замыканий методом относительных единиц.
5	Практическое занятие 2. Определение расчётных токов симметричных коротких замыканий методом именованных единиц.
6	Практическое занятие 3. Определение расчётных токов несимметричных коротких замыканий.

Лабораторное занятие 1

Расчёт симметричных токов коротких замыканий (КЗ) на ЭВМ

Цель занятия: изучение методики расчёта симметричных коротких замыканий

Задание:

1. В указанных точках выполнить расчёты симметричных коротких замыканий.
2. Определить ток короткого замыкания на зажимах генератора.
3. Выполнить анализ полученных результатов.
4. Сделать выводы по работе.

Методические указания

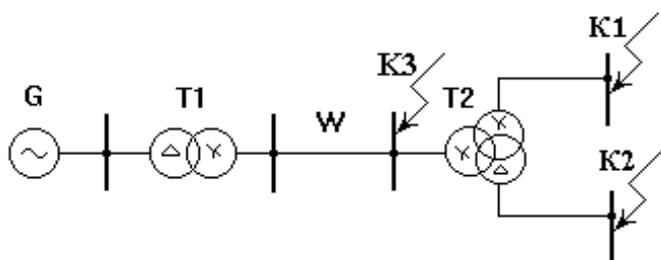


Рисунок 1 – Расчётная схема электроустановки

Выполнить расчёты в точках К1, К2 и К3 (рис.1) и определить, какой ток при этом возникает на зажимах генератора.

Порядок расчёта следующий: при выполнении расчётов последовательно вводить исходные данные согласно таблице 1.

Например, для варианта 1 последовательно ввести:

- номер варианта – 1
- номер генератора G – 1
- номер трансформатора T1 – 1
- номер трансформатора T2 – 6
- протяжённость линии – 100 км.

Для расчётной точки ввести базовую мощность в МВА, среднее напряжение данной ступени короткого замыкания в кВ.

Таблица 1 - Исходные данные к расчёту токов КЗ

№	Трансформаторы		Генераторы	Длина воздушной линии, км
	T1	T2	G	W
1	1	6	1	100
2	2	7	2	75
3	2	6	3	50
4	3	3	4	80
5	5	8	3	85

6	4	8	1	105
7	4	9	2	70
8	2	7	3	60
9	2	7	4	45
10	5	8	5	100

Таблица 2 – Генераторы

№	Тип	$S_{НОМГ}, \text{МВА}$	$U_{НОМГ}, \text{кВ}$	$\text{COS } \varphi$	X''_{d*}
1	ТВФ-60-2	75	6,3	0,8	0,195
2	ТВФ-100-2	117,5	10,5	0,85	0,183
3	ТВФ-120-2	120	10,5	0,8	0,192
4	ТВВ-200-2	235	15,75	0,85	0,191
5	ТВМ-300-2	353	20	0,85	0,200

Таблица 3 – Трансформаторы

Вариант	Тип	$U_{ВН}, \text{кВ}$	$U_{СН}, \text{кВ}$	$U_{НН}, \text{кВ}$	$u_{КВН} \%$,	$u_{КВС} \%$,	$u_{КСН} \%$,
1	ТДЦ – 80000/110	121	-	6,3	11	-	-
2	ТДЦ – 125000/110	121	-	10,5	10,5	-	-
3	ТДЦ – 250000/110	121	-	15,75	10,5	-	-
4	ТД – 80000/220	242	-	10,5	11	-	-
5	ТДЦ – 400000/220	242	-	20	11	-	-
6	ТДТН – 40000/110	115	38,5	11	17,5	10,5	6,5
7	ТДТН – 63000/110	115	38,5	6,6	18	10,5	7
8	ТДТН – 40000/220	230	38,5	11	17	10,5	7
9	ТДЦТН – 63000/220	230	36,5	6,6	18	10,5	8

По указанию преподавателя внести изменения в электрическую схему или параметры элементов электропередачи. Полученные результаты свести в таблицу.

Таблица 4 – Результаты расчётов симметричных коротких замыканий

Точка кз	S_b МВА	U_b кВ	E'' отн.ед.	X_G отн.ед.	X_{T1} отн.ед.	X_W отн.ед.	X_B отн.ед.	X_C отн.ед.	X_H отн.ед.	I_3 кА	I_G кА
К1											
К2											
К3											

Примечание.

S_b – базовая мощность

U_b – базовое напряжение

E'' – сверхпереходная ЭДС генератора

X_G – сопротивление генератора

X_{T1} – сопротивление трансформатора

X_W – сопротивление линии

X_B – сопротивление обмотки высокого напряжения

X_C – сопротивление обмотки среднего напряжения

X_H – сопротивление обмотки низкого напряжения

I_3 – ток симметричного короткого замыкания (действующее значение периодической составляющей в момент времени 0)

I_G – ток на зажимах генератора при коротком замыкании в точках К1, К2 или К3.

Контрольные вопросы

1. Объяснить различие значений токов КЗ в расчётных точках схемы.
2. Почему величина базовой мощности не влияет на конечный результат расчёта тока КЗ
3. Объяснить физический смысл параметра X_d'' *
4. Какой параметр определяет сопротивление трансформатора токам КЗ. Дать пояснения.
5. В чём различие представления в расчётной схеме двух и трёхобмоточных трансформаторов?

Информационное обеспечение: [Л.1, с.95-114], [Л.2, с.121-136], [Л.6, с.42-45]

Лабораторное занятие 2

Расчёт несимметричных токов коротких замыканий на ЭВМ

Цель занятия: изучение методики расчётов несимметричных коротких замыканий

Задание:

1. В указанных точках выполнить расчёты несимметричных КЗ.
2. Выполнить анализ результатов расчётов несимметричных токов в расчётных точках К2 и К3.

Методические указания

Выполнить расчёты несимметричных коротких замыканий в т. К2 и К3. Для этого ввести данные своего варианта из таблицы 1 лабораторного занятия №1. Порядок ввода данных описан в предыдущей работе. Для вычислений токов несимметричных коротких замыканий ввести расчётную точку, например, К2, затем базовую мощность и среднее напряжение данной ступени короткого замыкания. Программа выполняет расчёт, исходя из схем замещения для рассматриваемых точек коротких замыканий.

Для точки К2 определяется результирующее сопротивление токам прямой и обратной последовательности. Для точки К3 определяется результирующее сопротивление токам прямой, обратной и нулевой последовательности.

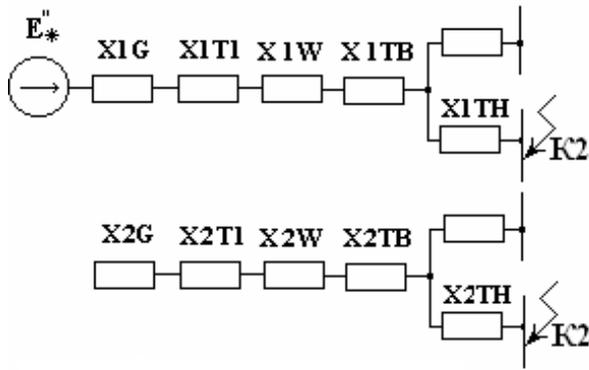


Рисунок 2 - Схемы замещения при КЗ в расчётной точке К2

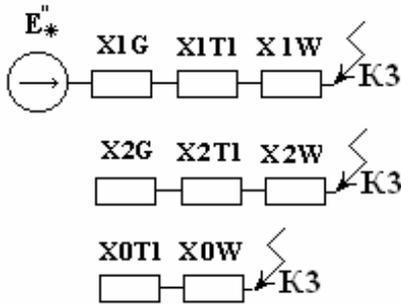


Рисунок 3 - схемы замещения при КЗ в расчётной точке К3

По указанию преподавателя выполнить изменения в электрической схеме или параметров элементов электропередачи. Полученные результаты свести в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты расчётов несимметричных коротких замыканий

Точка КЗ	Sb МВА	Ub кВ	Ib кА	E'' отн.ед.	X ₁ отн.ед.	X ₂ отн.ед.	X ₀ отн.ед.	I ⁽¹⁾ кА	I ⁽²⁾ кА	I ^(1,1) кА	I ⁽³⁾ кА
К2											
К3											

Примечание.

- X_{1G} – сопротивление генератора токам прямой последовательности;
- X_{2G} – сопротивление генератора токам обратной последовательности;
- X_{1T1} – сопротивление трансформатора Т1 токам прямой последовательности;
- X_{2T1} – сопротивление трансформатора Т1 токам обратной последовательности;
- X_{0T1} – сопротивление трансформатора Т1 токам нулевой последовательности;
- X_{1W} – сопротивление линии токам прямой последовательности;
- X_{2W} – сопротивление линии токам обратной последовательности;
- X_{0W} – сопротивление линии токам нулевой последовательности;
- X_{1ТВ} – сопротивление обмотки высокого напряжения токам прямой последовательности трансформатора Т2;
- X_{2ТВ} – сопротивление обмотки высокого напряжения токам обратной последовательности трансформатора Т2;

X_{1TN} – сопротивление обмотки низкого напряжения токам прямой последовательности трансформатора Т2

X_{2TN} – сопротивление обмотки низкого напряжения токам обратной последовательности трансформатора Т2

X_1 – результирующее сопротивление токам прямой последовательности

X_2 – результирующее сопротивление токам обратной последовательности

X_0 – результирующее сопротивление токам нулевой последовательности

I_b – базовый ток

$I^{(1)}$ – ток однофазного короткого замыкания

$I^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания

$I^{(1,1)}$ – ток двухфазного короткого замыкания с замыканием на землю

Контрольные вопросы

1. Объяснить различие схем замещения для определения токов КЗ в расчётных точках К2 и К3.
2. Почему сопротивление токам прямой и обратной последовательности силового трансформатора Т1 совпадают?
3. Что обуславливает различие сопротивления токам нулевой последовательности воздушной линии электропередачи по сравнению с сопротивлениями токам прямой и обратной последовательности?
4. Каковы причины различия значений токов КЗ $I^{(1)}$, $I^{(2)}$, $I^{(1,1)}$?
5. Объяснить отсутствие сопротивления генератора в схеме сопротивлений токам нулевой последовательности.

Информационное обеспечение: [1, с.116-124], [2,с.154-171], [6,с.65-68]

Лабораторное занятие 3

Определение токов несимметричных КЗ при различных схемах соединений обмоток двухобмоточных трёхфазных трансформаторов

Цель занятия: изучение работы трехфазных трансформаторов при несимметричных коротких замыканиях.

Задание:

1. Определить коэффициент трансформации трёхфазного трансформатора.
2. Определить параметры короткого замыкания.
3. Определить полное сопротивление нулевой последовательности и его составляющих для схемы соединений Y/Y_0 .
4. Определить полное сопротивление нулевой последовательности и его составляющих для схемы соединений Δ/Y_0 .
5. Провести опыт однофазного КЗ трансформатора, соединенного по схеме Y/Y_0 .
6. Провести опыт однофазного КЗ трансформатора, соединенного по схеме Δ/Y .
7. Провести опыт двухфазного КЗ трансформатора, соединенного по схеме Y/Y .

8. Провести опыт двухфазного КЗ трансформатора, соединенного по схеме Δ/Y .

Методические указания

Двухфазные и однофазные короткие замыкания (КЗ) являются частными случаями несимметричного режима работы трансформаторов. Однофазные КЗ могут возникнуть только со стороны заземлённой нейтрали трансформатора. Двухфазные КЗ могут возникнуть при любой схеме соединений.

Общим методом анализа несимметричных режимов работы является метод симметричных составляющих (МСС). Согласно МСС любая несимметричная система токов, напряжений, магнитных потоков и т.д. может быть представлена как векторная сумма прямой, обратной и нулевой последовательностей.

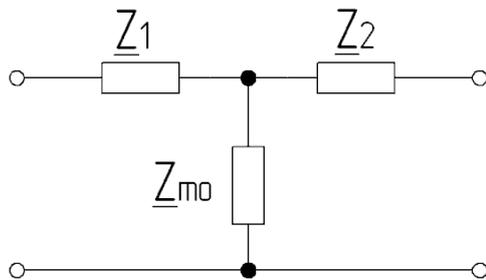


Рисунок 6 – Т-образная схема замещения трансформатора

Схемы замещения и сопротивления трансформатора для токов прямой и обратной последовательности ничем не отличаются от схемы замещения трансформатора при симметричном режиме работы - см. рисунок 6. Схема замещения для токов нулевой последовательности и сопротивление нулевой последовательности зависят от схем соединений обмоток и особенностей магнитной системы трансформатора.

Параметры схемы замещения Z_1 , Z_2 , Z_{m0} зависят только от конструкции магнитопровода и обмоток и не зависят от схемы соединения обмоток. Схема соединений обмотки определяет вид схемы замещения относительно выходных зажимов и сопротивление нулевой последовательности в целом.

Z_1 и Z_2 для токов нулевой последовательности не отличаются от соответствующих параметров симметричного режима.

Z_{m0} практически не отличается от сопротивления намагничивающей цепи Z_m броневых, бронестержневых и групповых трансформаторов.

Для трёхстержневых трансформаторов $Z_{m0} < Z_m$ и составляет примерно (7...15) $Z_K = Z_1 + Z_2$.

В зависимости от схем соединений обмоток, можно построить следующие схемы замещения для токов нулевой последовательности, представленные на рисунках 2, 3 и 4. С учетом того, что сопротивление намагничивающего контура $Z_{m0} \gg Z_K$, в схемах Y_0/Y_0 и Y_0/Δ пренебрегаем намагничивающим контуром.

В схеме Y_0/Y_0 (рис.7) токи нулевой последовательности могут протекать как в первичном, так и во вторичном контуре, при питании как со стороны высокого, так и низкого напряжения.

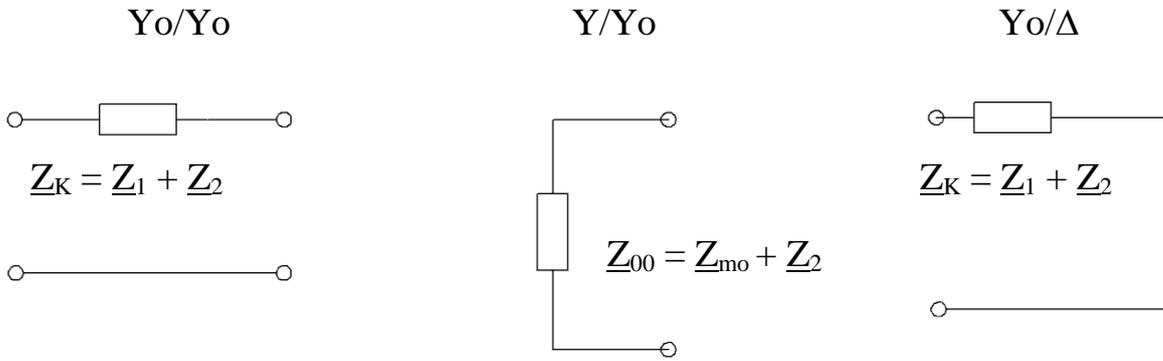


Рисунок 7 – схемы замещения для токов нулевой последовательности при соединении обмоток Y_0/Y_0 , Y/Y_0 , Y_0/Δ

В схеме Y/Y_0 токи нулевой последовательности могут протекать только со стороны Y_0 , когда к первичной сети подключена обмотка, соединённая в Y .

При питании со стороны Δ токи нулевой последовательности могут протекать во вторичной цепи, соединённой в Y_0 . Токи нулевой последовательности вторичной цепи индуцируют токи нулевой последовательности в первичной цепи, соединённой в Δ . В линейных токах первичной цепи токи нулевой последовательности отсутствуют.

Коэффициент трансформации определяют по схеме, изображённой на рисунке 8:

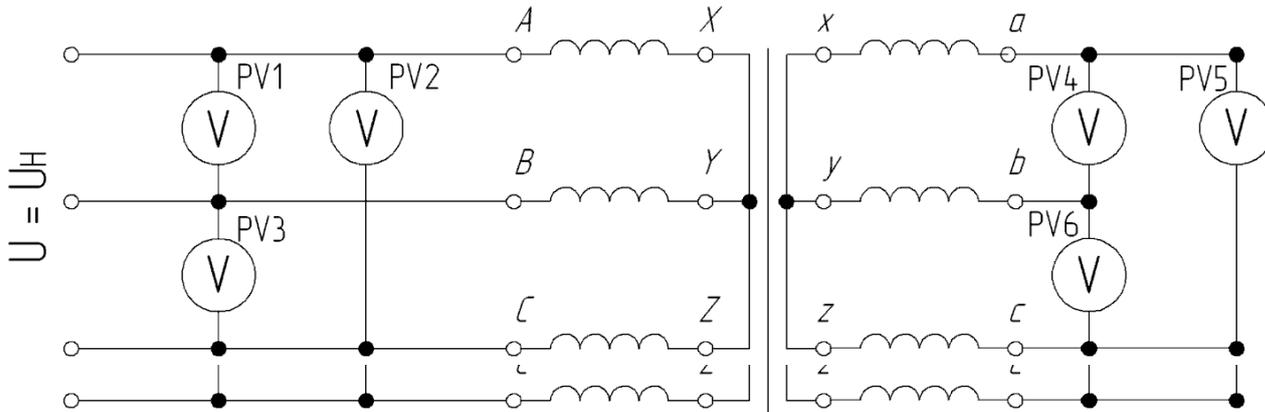


Рисунок 8 – Электрическая схема определение коэффициента трансформации

Коэффициент трансформации:

$$k = U_{Л1СР} / U_{Л2СР}$$

где $U_{Л1СР}$ - среднее значение первичного линейного напряжения,

$U_{Л2СР}$ - среднее значение вторичного линейного напряжения.

Параметры короткого замыкания $Z_K = Z_1 + Z_2$, $Z_1 = r_1 + j x_1$, $Z_2 = r_2 + j x_2$ определяют по схеме, изображенной на рисунке 9:

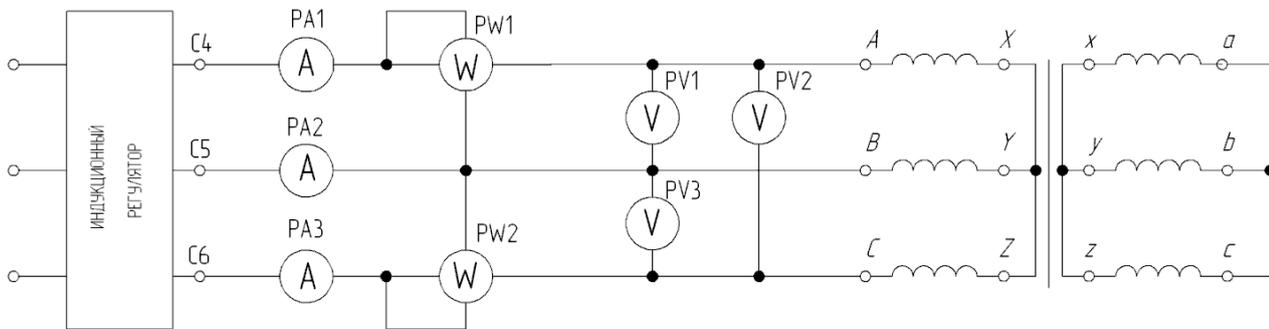


Рисунок 9 – Электрическая схема для определения сопротивлений короткого замыкания

$$Z_K = U_K / \sqrt{3} I_{H1}$$

где Z_K - полное сопротивление КЗ,

U_K - напряжение первичной обмотки, при котором по обмоткам протекают номинальные токи,

I_{H1} - номинальный ток первичной обмотки.

$$r_K = P_K / 3I_{H1}^2$$

где P_K - мощность трехфазного КЗ,

r_K - активное сопротивление КЗ,

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} ,$$

где x_K - реактивное сопротивление КЗ.

Обычно полагают, что $r_1 = r_2 = r_K/2$, $x_1 = x_2 = x_K/2$.

Сопротивление нулевой последовательности для схемы Y/Y₀ определяют по следующей схеме:

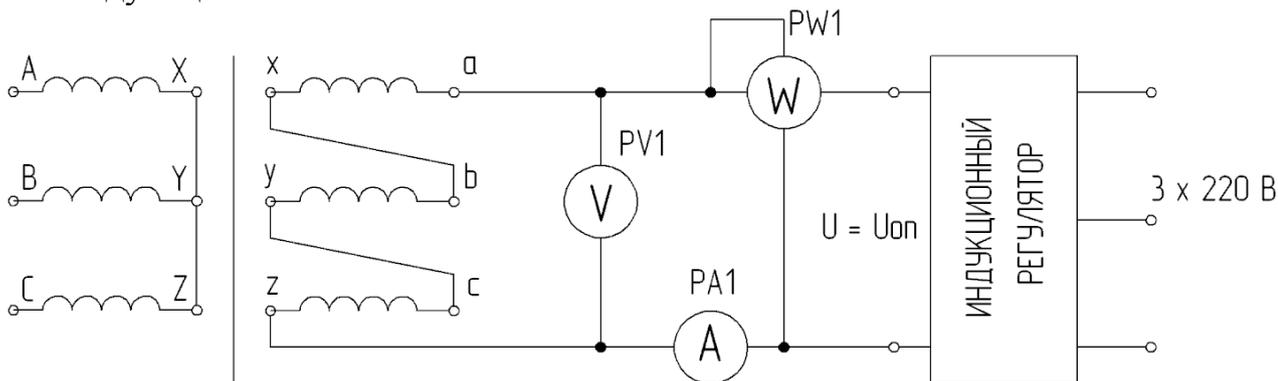


Рисунок 10 – Определения сопротивлений нулевой последовательности при соединении Y/Y₀

Сопротивление нулевой последовательности для схемы Δ/Y₀ определяют по следующей схеме:

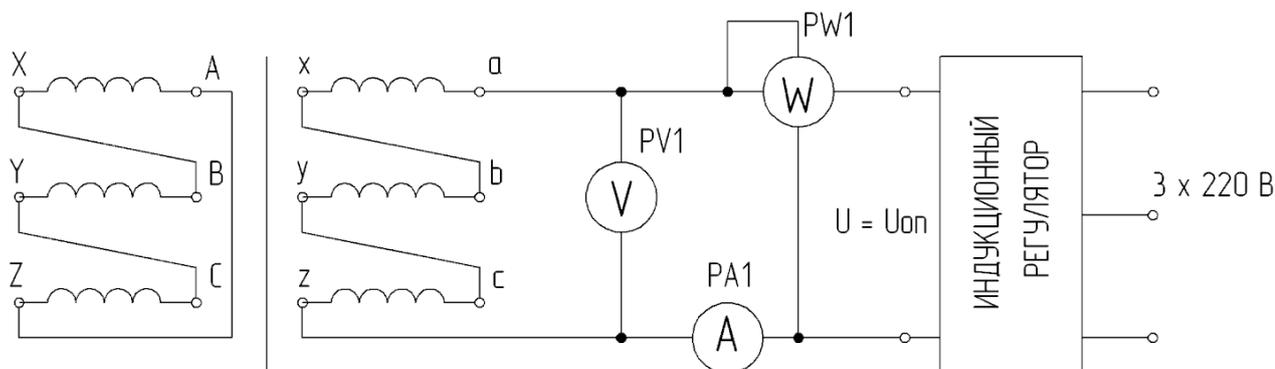


Рисунок 11 - определения сопротивлений нулевой последовательности при соединении оп-
ределение токов однофазного короткого замыкания для соединений Δ/Y_0

Сопротивление токам нулевой последовательности определяют по следующим выражениям:

$$Z_{0П} = U_{0П} / 3I_{0П}$$

$$R_{0П} = P_{0П} / 3I_{0П}^2$$

$$X_{0П} = \sqrt{Z_{0П}^2 - R_{0П}^2}$$

$Z_{0П}$, $R_{0П}$, $X_{0П}$ - соответственно полное, активное и индуктивное сопротивление токам нулевой последовательности, приведённое ко вторичной обмотке.

Сопротивления взаимной индукции схемы Y/Y_0 , приведённые к первичной обмотке:

$$r_{mo} = k^2 r_{оп} - r_k / 2,$$

$$x_{mo} = k^2 x_{оп} - x_k / 2,$$

$$Z_{mo} = \sqrt{r_{mo}^2 + x_{mo}^2},$$

где x_{mo} - индуктивное сопротивление вторичной обмотки, обусловленное магнитным потоком взаимной индукции нулевой последовательности и приведенное к первичной обмотке,

r_{mo} - активное сопротивление, учитывающее магнитные потери от этого магнитного потока.

Сопротивление токам нулевой последовательности, определенные по схеме Δ/Y_0 , приводят к первичной обмотке, умножая полученные параметры $Z_{0П}$, $r_{0П}$ и $x_{0П}$ на k^2 .

3. Опыт однофазного КЗ для Y/Y_0 проводят по схеме:

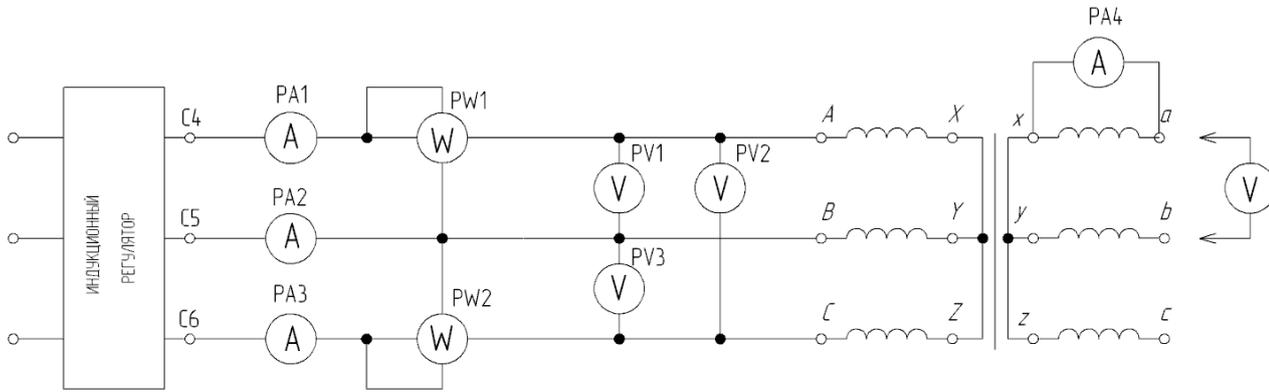


Рисунок 12 – Определение токов однофазного короткого замыкания для соединений Y/Y₀

На первичную обмотку подают пониженное относительно номинального напряжение, устанавливая в цепи КЗ номинальный ток. Измеряют линейные и фазные напряжения вторичной обмотки и токи I_A , I_B и I_C . Симметричные составляющие фазы А:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{a1} &= (\underline{I}_a + a \underline{I}_b + a^2 \underline{I}_c) / 3 \\ \underline{I}_{a2} &= (\underline{I}_a + a^2 \underline{I}_b + a \underline{I}_c) / 3 \\ \underline{I}_{a0} &= (\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) / 3 \end{aligned}$$

где $a = e^{j120^\circ}$

Поскольку $I_a = I_k$, $I_b = I_c = 0$, то $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = I_k / 3$.

Симметричные составляющие фаз В и С:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{b1} &= a^2 \underline{I}_{a1} & \underline{I}_{c1} &= a \underline{I}_{a1} \\ \underline{I}_{b2} &= a \underline{I}_{a2} & \underline{I}_{c2} &= a^2 \underline{I}_{a2} \\ \underline{I}_{b0} &= \underline{I}_{a0} & \underline{I}_{c0} &= \underline{I}_{a0} \end{aligned}$$

Токи нулевой последовательности в первичную обмотку не трансформируются. Составляющие прямой и обратной последовательности складываются в каждой фазе

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} \end{aligned}$$

Подставляя с учётом коэффициента трансформации k в уравнения для токов I_A , I_B и I_C величины токов вторичной цепи:

$$\begin{aligned} I_A &= -2 I_a / 3k \\ I_B &= I_a / 3k \\ I_C &= I_a / 3k \end{aligned}$$

Полученные данные сравнить с экспериментально полученными результатами.

Магнитный поток от токов нулевой последовательности наводит в каждой фазе ЭДС. На такую же величину смещается нулевая точка векторной диаграммы:

$$E_0 = -I_{0П} Z_{m0}$$

4. Опыт однофазного КЗ для Δ/Y_0 проводят по следующей схеме (Рис.13):

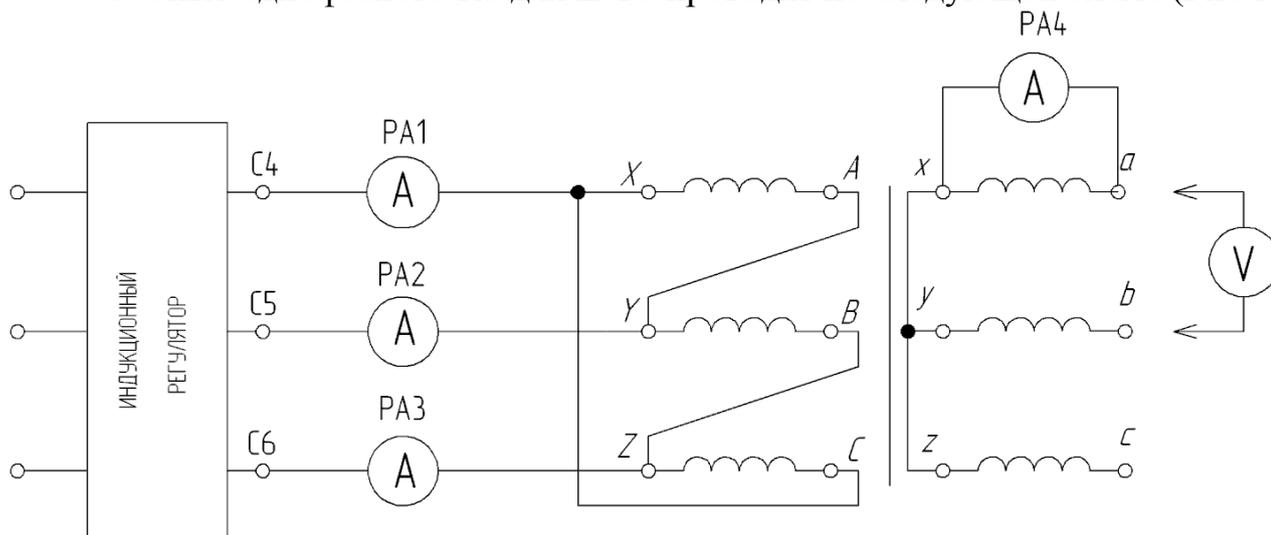


Рисунок 13 - определение токов однофазного короткого замыкания для соединений Δ/Y_0

В линейных токах первичной обмотки токи нулевой последовательности отсутствуют:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}) - (\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}) \\ \underline{I}_B &= (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}) - (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}) \\ \underline{I}_C &= (\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}) - (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}) \\ \underline{I}_A &= -\underline{I}_a / k \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_a / k \\ \underline{I}_C &= 0 \end{aligned}$$

Сравнить величины линейных токов с экспериментальными данными.

1. Двухфазные КЗ для схем соединений Y/Y и Δ/Y_0 отличаются от схем на рисунках 12 и 13 только *вторичными* цепями (см. рис.14):

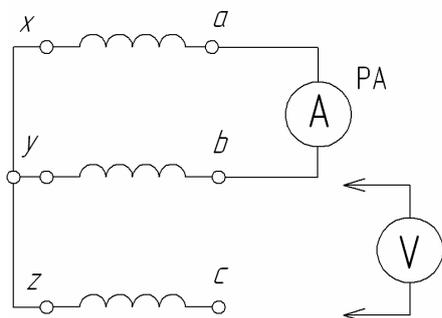


Рисунок 14 – схема вторичной цепи при двухфазных коротких замыканиях

В опыте двухфазного КЗ по схеме Y/Y измеряют ток КЗ, токи первичной обмотки I_A , I_B и I_C , напряжения первичных и вторичных обмоток. Каждую фазу можно рассматривать как независимый трансформатор.

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= -\underline{I}_k / k \\ \underline{I}_B &= -\underline{I}_k / k \\ \underline{I}_C &= 0 \end{aligned}$$

Фазные напряжения первичной обмотки вычисляются по формулам:

$$\underline{U}_A = (\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA})/3 \quad \underline{U}_B = (\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB})/3 \quad \underline{U}_C = (\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC})/3$$

Полученные расчётом величины сравнить с экспериментальными данными.

Для опыта двухфазного КЗ по схеме Δ/Y_0 измеряют линейные токи I_A , I_B и I_C и ток КЗ.

$$I_C = 0, I_a = -I_b = I_k$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A\Phi} - \underline{I}_{C\Phi}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{B\Phi} - \underline{I}_{A\Phi}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{C\Phi} - \underline{I}_{B\Phi}$$

$$I_A = -I_k / k$$

$$I_B = -2I_k / k$$

$$I_C = I_k / k$$

Расчётные данные сравнить с экспериментом.

Контрольные вопросы

1. Для какой схемы соединений обмоток трансформатора сопротивление токам нулевой последовательности больше?
2. Почему при несимметричном КЗ параметры Z_1 , Z_2 не отличаются от симметричных режимов работы, а параметры намагничивающего контура отличаются?
3. Как влияет конструкция магнитной системы трансформатора на его работу в несимметричном режиме?
4. Объяснить, почему отличаются сопротивления токам нулевой последовательности у трансформаторов со схемами обмоток Y/Y_0 и Δ/Y_0 .
5. Какой ток больше: однофазного, двухфазного или трехфазного КЗ?

Информационное обеспечение: [Л.10, с.317-324], [Л.11, с.163-168]

Практическое занятие 1

Определение расчётных токов симметричных коротких замыканий методом относительных единиц

Цель занятия: научиться определять токи КЗ для начального момента времени методом относительных единиц; закрепить теоретические знания, полученные на лекционных занятиях, закрепить навыки пользования справочной литературой.

Краткие теоретические сведения

Коротким замыканием (КЗ) называют всякое, непредусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки между собой или с землей, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима [1].

В трехфазных электроустановках возникают следующие простейшие виды коротких замыканий: трёхфазное – $K^{(3)}$ двухфазное – $K^{(2)}$; двухфазное на землю – $K^{(1,1)}$, однофазное – $K^{(1)}$, токи которых могут в несколько раз превышать номинальные токи электрооборудования.

При трёхфазном КЗ все фазы электрической цепи оказываются в одинаковых условиях, и оно является *симметричным*. Остальные короткие замыкания называют несимметричными.

Расчёт токов КЗ производится для выбора и проверки электрических аппаратов и токоведущих частей, а также для выбора установок релейной защиты.

Расчётными токами КЗ являются:

– $I_{по}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ (определяется для момента времени $t = 0$);

– $I_{пт}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ для момента времени начала расхождения дугогасительных контактов коммутационного аппарата τ ;

– $i_{уд}$ – ударный ток (амплитуда мгновенного значения тока КЗ);

– $i_{ат}$ – апериодическая составляющая тока КЗ в момент времени τ ;

Ток $I_{по}$ необходим для определения теплового воздействия тока КЗ.

Ток $i_{уд}$ необходим для определения электродинамического воздействия тока КЗ.

Токи $I_{пт}$, $i_{ат}$ необходимы для проверки выключателей на отключающую способность.

При выполнении расчетов используются следующие *допущения* [1].

1. При расчёте действующего значения периодической составляющей тока КЗ в установках напряжением свыше 1000 В, как правило, не учитывают активные сопротивления элементов электрической системы, если результирующее эквивалентное активное сопротивление относительно точки КЗ не превышает 30% результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления этой же цепи: $r_{\Sigma} \leq 0,3 x_{\Sigma}$, что выдерживается в подавляющем большинстве случаев для данных сетей.

Активное сопротивление элементов сети необходимо знать при определении постоянной времени апериодической составляющей тока КЗ. Но и в этом случае часто обходятся без точных расчетов.

2. Не учитывают насыщение магнитных систем, что позволяет считать постоянными все индуктивные сопротивления сети.

3. Пренебрегают намагничивающими токами силовых трансформаторов.

4. Не учитывают поперечные ёмкости воздушных линий напряжением до 35 кВ, воздушных линий напряжением 110 – 220 кВ при длине их не более 200 км и напряжением 330 – 500 кВ при длине до 150 км.

5. Не учитывают токи нагрузки.

6. Считают, что трёхфазная система является симметричной.

7. Принимают, что в течение всего процесса короткого замыкания ЭДС всех источников системы совпадают по фазе.

8. Учитывают подпитку места КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами.

Кроме того, короткое замыкание считается металлическим, то есть переходное сопротивление электрической дуги в месте КЗ принято равным нулю.

Порядок расчета тока трёхфазного КЗ.

1. Составляется расчётная схема электрической сети - упрощённая однолинейная схема электрической системы с указанием всех влияющих на ток КЗ элементов.

2. По расчётной схеме составляется схема замещения для заданной точки короткого замыкания и определяются параметры элементов схемы. Источники питания вводятся своими ЭДС (прил. А.1) и сопротивлениями, а остальные элементы – только сопротивлениями.

3. Путём преобразований (прил.А.4) приводят схему замещения к простейшему виду, когда вся схема состоит из одной или нескольких ветвей, каждая из которых включает результирующую эквивалентную ЭДС и результирующее эквивалентное сопротивление. По закону Ома определяют начальные действующие значения периодических составляющих токов КЗ в этих ветвях и находят их сумму.

4. Определяют апериодическую составляющую тока КЗ и ударный ток.

5. При необходимости находят распределение начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ по ветвям исходной схемы замещения и с помощью метода типовых кривых определяют действующие значения периодической составляющей тока КЗ в интересующие моменты времени.

Методические указания

1. Согласно варианту составить расчётную схему электрической сети. Нанести на неё все исходные данные, необходимые для расчёта сопротивлений, используя таблицы А.1 и А.3 приложения А.

Элементы, по которым не протекают токи КЗ, на схему не наносятся.

2. Составить схему замещения (таблица А.3). Нанести на неё значения индуктивных сопротивлений элементов схемы.

Расчёт индуктивных сопротивлений производится в относительных единицах, приведённых к базисной мощности (S_6). За S_6 принимается любое число, удобное для расчётов: 10, 100, 1000 МВА. Формулы приведены в приложении А.3. Указывается порядковый номер и величина сопротивлений на схеме замещения в виде дроби (порядковый номер/величина). При расчёте сопротивлений линии электропередачи значение $X_{уд}$ (Ом/км) берется из таблицы А.2.

3. Произвести преобразование схемы к простейшему виду, чтобы источник или группа источников соединились с точкой КЗ через одно результирующее сопротивление. Формулы для преобразования приведены в таблице А.4.

Все промежуточные преобразования и схемы должны быть отражены в тетради.

Для упрощения расчётов допускается генераторы, а иногда генераторы и энергосистему, объединять в один эквивалентный источник питания. При объединении источников питания их мощности суммируются, а сопротивления ветвей складываются параллельно.

Если КЗ произошло непосредственно на выводах генератора, то объединять его с другими источниками нельзя.

В случае объединения источников питания с различными значениями ЭДС $E''_{*ЭКВ}$ определяется по формуле:

$$E''_{*ЭКВ} = \frac{E''_{*1} \cdot x_{*2} + E''_{*2} \cdot x_{*1}}{x_{*1} + x_{*2}} \quad (1)$$

4. Произвести расчёт токов трёхфазного КЗ по формуле:

$$I_{по} = I_{\sigma} / (\sqrt{3} \cdot x_{*рез}); \quad (2)$$

где $I_{по}$ - периодическая слагающая тока КЗ в начальный момент времени, кА;
 I_{σ} - базисный ток на ступени напряжения точки КЗ;
 $x_{*рез}$ - результирующее сопротивление до точки КЗ.

$$I_{\sigma} = S_{\sigma} / (\sqrt{3} \cdot U_{cp}) \quad (3)$$

где U_{cp} - среднее напряжение в точке КЗ.

Шкала U_{cp} , кВ: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175.

$$i_y = \sqrt{2} k_y \cdot I_{по} \quad (4)$$

где i_y - ударный ток КЗ, кА;
 k_y - ударный коэффициент, таблица А.5.

На величину тока КЗ могут оказать влияние асинхронные электродвигатели мощностью более 100 кВт, если они присоединены вблизи места КЗ. Объясняется это тем, что при КЗ резко снижается напряжение, и электродвигатели, вращаясь по инерции, генерируют ток в место КЗ. Этот ток быстро затухает, поэтому влияние электродвигателей учитывают при определении $I_{по}$ и i_y .

$$I_{под} = (0,9/x''_{*d}) I_{ном д} \quad (5)$$

где 0,9 - расчётная относительная ЭДС;
 x''_{*d} - относительное сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного электродвигателя;
 $I_{ном д}$ - номинальный ток одновременно работающих электродвигателей, кА.

В среднем, можно принять $x''_{*d} = 0,2$, тогда

$$I_{под} = (0,9/0,2) = 4,5 I_{ном д} \quad (6)$$

Апериодическая составляющая тока КЗ от асинхронных двигателей затухает очень быстро, поэтому ее можно не учитывать при определении ударного тока, когда

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{под} = \sqrt{2} \cdot 4,5 \cdot I_{ном д} = 6,5 \cdot I_{ном д} \quad (7)$$

Задание:

В относительных единицах рассчитать токи трёхфазного короткого замыкания $I_{по}$, i_y . Исходные данные приведены на рисунке 15 и в таблице 6.

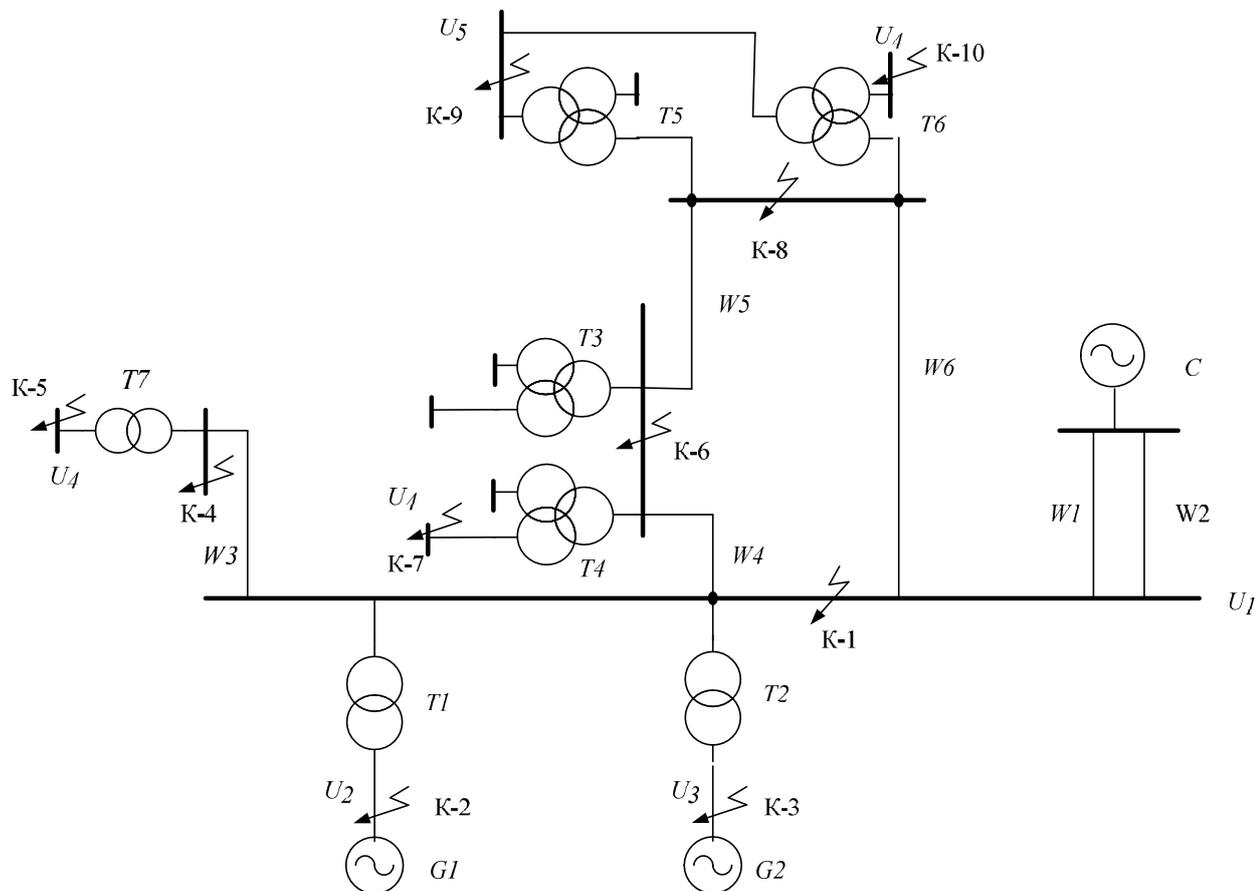


Рисунок 15 – Схема для определения токов КЗ

Таблица 6 - Варианты 1 – 5

Вариант		1	2	3	4	5
Рассчитать точки КЗ в точке		К-1	К-2	К-3	К-4	К-5
Среднее напряжение U_{cp} , кВ	U_1	230	115	230	115	115
	U_2	15,75	20	20	10,5	18
	U_3	20	18	20	10,5	18
	U_4	-	-	-	6,3	10,5
	U_5	-	-	-	-	-
Мощность энерго- системы S_C , МВ·А	C	2400	1600	2600	1400	1200
Номинальное сопротивление $x^*_{номC}$, о.е.	C	1,35	1,15	1,4	1,1	1,2
Номинальная мощность генератора $S_{номG}$, МВ·А / индуктивное сопротивление x''_d , о.е.	$G1$	258	375	353	137,5	188
		0,19	0,173	0,2	0,189	0,22
	$G2$	588	188	588	137,57	188
		0,242	0,22	0,242	0,189	0,22
$S_{ном}$ двухобмоточного трансформатора, МВ·А / напряжение КЗ $u_{к.в.н.}$, %	$T1$	250/10,5	400/10,5	400/11	125/10,5	200/10,5
	$T2$	630/12,5	200/10,5	630/12,5	125/10,5	200/10,5
	$T3, T4$	-	-	-	-	-
	$T7$	-	-	-	10/10,5	16/10,5

$S_{ном}$ трёхобмоточного трансформатора, МВ·А / напряжение КЗ между обмотками $u_{к.В-Н}$, $u_{к.В-С}$, $u_{к.С-Н}$, %	$T5, T6$	-	-	-	-	-
Длина линий электропередачи l , км	$W1/W2$	165/190	75/60	140/180	52/52	68/68
	$W3$	-	-	-	26	32
	$W4$	-	-	-	-	-
	$W5$	-	-	-	-	-
	$W6$	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 6 (варианты 6 – 10)

Вариант		6	7	8	9	10
Рассчитать токи КЗ в точке		К-6	К-7	К-8	К-9	К-10
Среднее напряжение U_{cp} , кВ	U_1	115	230	115	230	230
	U_2	10,5	20	10,5	15,75	20
	U_3	10,5	20	10,5	15,75	20
	U_4	10,5	10,5	6,3	10,5	10,5
	U_5	-	-	37	37	37
Мощность энерго- системы S_C , МВ·А	C	1100	2150	1300	1900	2900
Номинальное сопротивление $x_{*номC}$, о.е.		0,95	1,3	1,25	1,26	1,7
Номинальная мощность генератора $S_{номG}$, МВ·А / индуктивное сопротивление x''_d , о.е.	$G1$	125	375	78,75	258	588
		0,192	0,173	0,139	0,19	0,242
	$G2$	125	375	78,75	258	588
		0,192	0,173	0,139	0,19	0,242
$S_{ном}$ двухобмоточного трансформатора, МВ·А / напряжение КЗ $u_{к.В-Н}$, %	$T1$	125/10,5	400/11	80/11	250/10,5	630/12,5
	$T2$	125/12,5	400/11	80/11	250/10,5	630/12,5
	$T3, T4$	25/10,5	32/11,5	-	-	-
	$T7$	-	-	-	-	-
$S_{ном}$ трёхобмоточного трансформатора, МВ·А	$T5, T6$	-	-	16	16	16
напряжение КЗ между обмотками $u_{к.В-Н}$, $u_{к.В-С}$, $u_{к.С-Н}$, %		-	-	17,5; 10,5; 6,5	20; 12,5; 6,5	22; 12,5; 9,5
Длина линий электропередачи l , км	$W1/W2$	70/70	210/210	62/62	190/190	180/180
	$W3$	-	-	-	-	-
	$W4$	12	60	24	85	90
	$W5$	28	70	16	62	50
	$W6$	35	95	32	110	120

Пример решения задачи:

Определить величины токов КЗ в точках К1, К2, К3 и на зажимах генератора при КЗ в указанных точках.

Исходные данные для выполнения расчёта:

Генератор: $S_{номG} = 75$ МВА,
 $U_{номG} = 10.5$ кВ,

Трансформатор Т1: $S_{номT} = 80$ МВА,
 $U_{номBH} = 115$ кВ,

$$x''_d = 0.195.$$

$$U_{\text{номНН}} = 10,5 \text{ кВ},$$

$$u_{\text{к\%}} = 11\%.$$

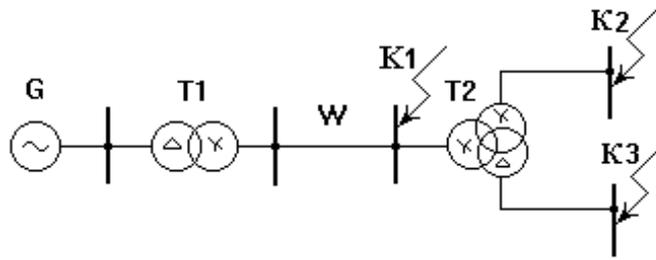


Рисунок 16 - Расчётная схема электроустановки

Линия W: одноцепная линия на ж/б опорах длиной 65 км, $X_{\text{уд}} = 0,4 \text{ Ом/км}$.

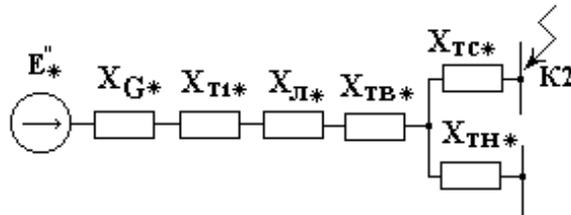
Трансформатор T2: $S_{\text{номТ}} = 63 \text{ МВА}$,

$$U_{\text{номВН}} = 115 \text{ кВ}, \quad u_{\text{кВН\%}} = 18 \text{ \%}.$$

$$U_{\text{номВС}} = 38,5 \text{ кВ}, \quad u_{\text{кВС\%}} = 10,5 \text{ \%}.$$

$$U_{\text{номНН}} = 6,6 \text{ кВ}, \quad u_{\text{кН\%}} = 7\%.$$

Схема замещения для определения тока K3 в расчётной точке K2:



Примем значение базовой мощности $S_{\text{б}} = 100 \text{ МВА}$.

Приведённое значение сверхпереходной ЭДС $E'' = 1,08$ (мощность генератора $< 100 \text{ МВА}$, см. табл.А.1 приложения А).

Сопротивление генератора:

$$X_{G*} = x''_d \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{номГ}}} = 0.195 \cdot \frac{100}{75} = 0.26$$

Сопротивление двухобмоточного трансформатора T1:

$$X_{T1*} = \frac{u_{\text{к\%}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{номТ1}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0.138.$$

Сопротивление линии:

$$X_{L*} = X_{\text{уд}} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2} = 0.4 \cdot 65 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.197$$

Напряжения короткого замыкания обмоток трёхобмоточного трансформатора T2:

$$u_{\text{кВ}}\% = 0,5 (u_{\text{кВН}}\% + u_{\text{кВС}}\% - u_{\text{кН}}\%) = 0,5 (18 + 10,5 - 7) = 10,75 \text{ \%},$$

$$u_{\text{кС}}\% = 0,5 (u_{\text{кВС}}\% + u_{\text{кН}}\% - u_{\text{кВН}}\%) = 0,5 (10,5 + 7 - 18) = -0,25 \text{ \%},$$

$$u_{\text{кН}}\% = 0,5 (u_{\text{кВН}}\% + u_{\text{кН}}\% - u_{\text{кВС}}\%) = 0,5 (18 + 7 - 10,5) = 7,25\%.$$

Сопротивление обмоток трансформатора T2:

$$X_{ТВ*} = \frac{u_{\text{к\%}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{номТ}}} = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0.171.$$

$$X_{TC*} = \frac{u_{kc\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{номТ}} = \frac{-0.25}{100} \cdot \frac{100}{63} = -0.004.$$

$$X_{TH*} = \frac{u_{кн\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{номТ}} = \frac{7.25}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0.115$$

Если пренебречь незначительным сопротивлением обмотки среднего напряжения, то результирующее сопротивление току КЗ в точке К2 будет равно:

$$X_{рез2*} = X_{G*} + X_{T1*} + X_{л*} + X_{TB*} = 0,26 + 0,138 + 0,197 + 0,171 = 0,766$$

Базовый ток на ступени КЗ со средним напряжением 37 кВ, кА:

$$I_{\delta 2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$$

Периодическая составляющая тока КЗ, кА:

$$I_{но2} = \frac{E_*''}{X_{рез2*}} \cdot I_{\delta 2} = \frac{1.08}{0.766} \cdot 1.56 = 2.199 \text{ кА}$$

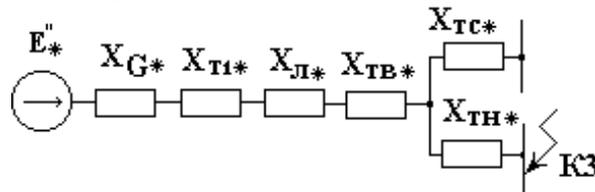
По табл. А.5 приложения А определим $k_{уд} = 1,82$. Ударный ток в расчётной точке, кА:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot I_{но2} \cdot k_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 2.199 \cdot 1.82 = 5.66 \text{ кА}$$

Ток на зажимах генератора при коротком замыкании в расчётной точке К2, кА:

$$I_G = I_{но2} \cdot \left(\frac{U_{\delta 2}}{U_{ном,G}} \right) = 2.199 \cdot \left(\frac{37}{10.5} \right) = 7.75$$

Схема замещения для расчётной точки КЗ:



$$X_{рез3*} = X_{G*} + X_{T1*} + X_{л*} + X_{T\theta*} + X_{TH*} = 0,26 + 0,138 + 0,197 + 0,171 + 0,115 = 0,881$$

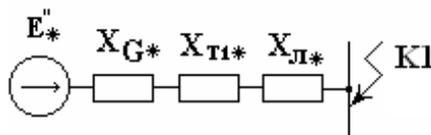
$$I_{\delta 3} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 3}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 9.16 \text{ кА}$$

$$I_{но3} = \frac{E_*''}{X_{рез3*}} \cdot I_{\delta 3} = \frac{1.08}{0.881} \cdot 9.16 = 11.2 \text{ кА}$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot I_{но3} \cdot k_{уд3} = \sqrt{2} \cdot 11.2 \cdot 1.904 = 30.2 \text{ кА}$$

$$I_G = I_{но3} \cdot \left(\frac{U_{\delta 3}}{U_{ном,G}} \right) = 11.2 \cdot \left(\frac{6.3}{10.5} \right) = 6.72 \text{ кА}$$

Схема замещения для точки К1:



$$X_{рез1*} = X_{G*} + X_{T1*} + X_{л*} = 0,26 + 0,138 + 0,197 = 0.595$$

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0.502 \text{ kA}$$

$$I_{no1} = \frac{1.08}{0.595} \cdot 0.502 = 0.911 \text{ kA}$$

$$i_{y\delta 1} = \sqrt{2} \cdot 0.911 \cdot 1.707 = 2.199 \text{ kA}$$

$$I_G = I_{no1} \cdot \left(\frac{U_{\delta 1}}{U_{ном,G}} \right) = 0.911 \cdot \left(\frac{115}{10.5} \right) = 9.97 \text{ kA.}$$

Содержание отчета:

1. Наименование работы и ее номер.
2. Цель работы.
3. Задание в соответствии с вариантом.
4. Выполнение расчетов с приведением расчетных формул, названия величин и их размерности; промежуточные преобразования и схемы.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Дать определение тока короткого замыкания.
2. Виды коротких замыканий.
3. Какие КЗ относятся к симметричным.
4. Для каких целей производят расчёт токов КЗ.
5. Дать определение расчётной схемы и схемы замещения.
6. Алгоритм расчета токов КЗ.

Информационное обеспечение: [Л.2,с.121-136]

Практическое занятие 2

Определение расчётных токов симметричных коротких замыканий методом именованных единиц

Цель занятия: научиться определять токи КЗ для начального момента времени методом именованных единиц; закрепить теоретические знания, полученные на лекционных занятиях, закрепить навыки пользования справочной литературой.

Краткие теоретические сведения

Метод именованных единиц применяют при расчётах токов КЗ сравнительно простых электрических схем с небольшим числом ступеней трансформации.

Сопротивления и ЭДС схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения, принятой за основную. В практических расчётах за основную часто принимают ступень, где расположена точка КЗ.

При расчёте данным методом параметры схемы выражают в именованных единицах (омах, амперах, вольтах и т. д.).

Если напряжение ступени КЗ отличается от напряжения, принятого при расчёте за базисное напряжение - $U_б$, полученный ток КЗ $I_{кб}$ необходимо привести к реальному напряжению ступени КЗ по выражению:

$$I_k = I_{кб} \cdot \frac{U_б}{U_{ср}} \quad (8)$$

Методические указания

Задача решается по исходным данным практического занятия 1.

1. Расчётная схема та же.

2. Схема замещения аналогична предыдущей задаче, отличие - в величине сопротивлений, которая указывается в знаменателе дроби.

Расчёт индуктивных сопротивлений производится в именованных единицах, приведённых к базисному напряжению. За $U_б$ принимается среднее напряжение ступени, где произошло КЗ. Формулы приведены в приложении А3. Указывается порядковый номер и величина сопротивлений на схеме замещения в виде дроби (порядковый номер/величина). При расчёте сопротивлений линии электропередачи значение $X_{уд}$ (Ом/км) берется из таблицы А.2.

Внимание! Складывать сопротивления, приведённые к разным ступеням напряжения нельзя!

3. Преобразование схемы к простейшему виду аналогично предыдущей задаче. Формулы для преобразования приведены в таблице А.4. Определяется результирующее сопротивление до точки КЗ – $x_{рез}$, Ом.

Все промежуточные преобразования и схемы должны быть отражены в тетради.

4. Производится расчёт периодической слагающей тока трёхфазного КЗ по формуле:

$$I_{по} = \frac{E''_{*эКВ} U_б}{\sqrt{3} x_{рез}} \quad (9)$$

Значение ударного тока определяется по формуле 4.

Задание:

В именованных единицах рассчитать токи трёхфазного короткого замыкания $I_{по}$, i_y . Исходные данные приведены на рисунке 15 и в таблице 6.

Содержание отчета:

1. Наименование работы и ее номер.
2. Цель работы.
3. Краткое задание в соответствии с вариантом.
4. Выполнение расчетов с приведением расчетных формул, названия величин и их размерности; промежуточные преобразования и схемы.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Алгоритм расчета токов КЗ в именованных единицах.
2. Какое напряжение принимается за базисное.

Информационное обеспечение: [Л.2,с.121-136]

Практическое занятие 3

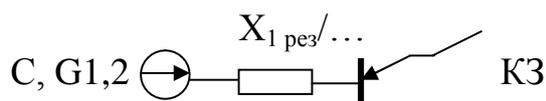
Определение расчётных токов несимметричных коротких замыканий

Цель занятия: научиться определять сопротивления обратной и нулевой последовательности и рассчитывать токи двухфазного и однофазного коротких замыканий; закрепить теоретические знания и навыки пользования справочной литературой.

Краткие теоретические сведения

Для определения несимметричных коротких замыканий используются расчёты и преобразования практического занятия 1.

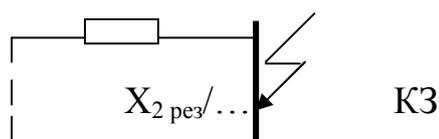
Преобразовать схему замещения прямой последовательности путем объединения всех источников питания в одно сопротивление. Определить $X_{1рез}$ - результирующее сопротивление прямой последовательности относительно точки КЗ;



Определить $X_{2рез}$ - результирующее сопротивление обратной последовательности. Схемы замещения обратной последовательности такие же, как и схемы прямой последовательности, но при ЭДС источников, равных нулю.

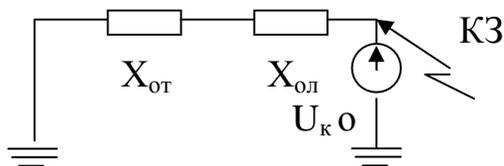
При равенстве сопротивлений всех элементов (в практических расчетах для вращающихся машин $X_2=X_1$) на схемах прямой и обратной последовательностей можно принять:

$$X_{2рез} = X_{1рез}$$



Определить $X_{0рез}$ - результирующее сопротивление нулевой последовательности. В схеме замещения учитываются сопротивления, связанные с землёй. Приступая к составлению схемы замещения нулевой последовательности, прежде всего, необходимо установить возможные контуры протекания тока нулевой последовательности. Для образования таких контуров необходимо, чтобы в цепи, электрически связанной с местом КЗ, имелись заземлённые нейтрали. При нескольких заземлённых нейтралях, электрически связанных между собой, токи нулевой последовательности разветвляются между ними.

Схему нулевой последовательности начинают составлять от точки КЗ. Концы элементов схемы нулевой последовательности, через которые возвращаются токи нулевой последовательности, имеют потенциал земли. В схеме нулевой последовательности учитывается одна фаза, а через сопротивление нулевой последовательности протекает ток нулевой последовательности всех трёх фаз. Чтобы учесть действительное падение напряжения в этом сопротивлении, его надо увеличить в 3 раза.



Сопротивление нулевой последовательности определяется:

- для линий электропередачи – $x_0 = k \cdot x_1$. Значения коэффициента k приведены в таблице 7:

Характеристика линии	Отношение x_0 / x_1
1. Одноцепная линия без тросов	3,5
2. То же со стальными тросами	3,0
3. То же с хорошо проводящими тросами	2,0
4. Двухцепная линия без тросов	5,5
5. То же со стальными тросами	4,7
6. То же с хорошо проводящими тросами	3,0

Для трансформаторов - $x_* = \frac{x_{тр}\%}{100} \frac{S_б}{S_{ном}}$

двухобмоточных - $x_0 = x_B + x_H = x_{B-H} = x_1$;

трёхобмоточных - $x_0 = x_B + x_H = x_{B-H} = x_1$ (не учитывается обмотка СН) ;

автотрансформатор - учитываются все обмотки.

Расчёт токов, несимметричных КЗ:

$$\text{- двухфазного КЗ: } I_{по}^2 = \frac{\sqrt{3}E_*''}{x_{*1рез} + x_{*2рез}} I_б = \frac{\sqrt{3}E_*''}{2 x_{*1рез}} I_б = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{по}^3$$

$$\text{- однофазного КЗ: } I_{по}^1 = \frac{3E_*''}{x_{*1рез} + x_{*2рез} + x_{*0рез}} I_б$$

Задание:

Рассчитать токи двухфазного и однофазного КЗ. (Продолжение практического занятия 1)

Содержание отчета:

1. Наименование работы и ее номер.
2. Цель работы.
3. Краткое задание в соответствии с вариантом.
4. Выполнение расчетов с приведением расчетных формул, названия величин и их размерности; промежуточные преобразования и схемы.
4. Выводы.

Информационное обеспечение: [Л.2,с.154-176]

Информационное обеспечение

1. Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для сред. проф. образования – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 448 с.
2. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов.– 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
3. Карнеева Л.К., Рожкова Л.Д. Электрооборудование электростанций и подстанций (примеры расчётов, задачи, справочные данные): Практикум для студентов образовательных учреждений сред. проф. образования – Иваново: МЗЭТ ГОУ СПО ИЭК, 2006. – 224с.
4. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов/А.А.Васильев, И.П.Крючков, Е.Ф. Наяшкова и др.; Под ред. А.А.Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.: ил.
5. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций (справочные материалы) – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 608 с.
6. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД.153-34.0-20.527-98/ Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 152 с.
7. Электрооборудование электрических станций, сетей и систем. Рабочая программа и методические указания (для студентов заочников) – Иваново: МЗЭТ ГОУ СПО ИЭК, 2004. – 68 с.
8. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 59735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007 – 36 с.

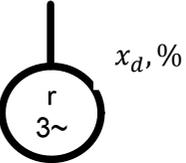
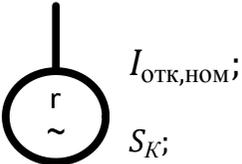
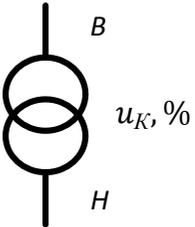
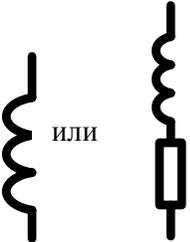
Таблица А.1 - Средние значения сверхпереходной ЭДС E'' и сверхпереходного сопротивления x'' , отнесенные к номинальной мощности источников питания

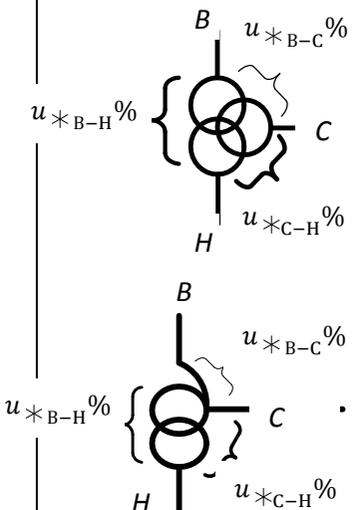
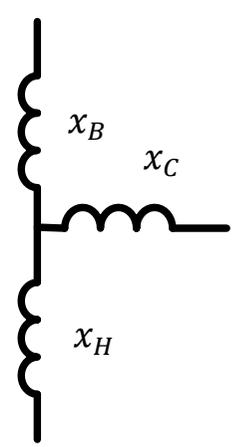
Источники питания	E'' , отн. ед.	x'' , отн. ед.
Турбогенератор до 100 МВт	1,08	0,125
Турбогенератор 100–500МВт	1,13	0,2
Гидрогенератор с успокоительной обмоткой	1,13	0,2
Гидрогенератор без успокоительной обмотки	1,18	0,27
Синхронный компенсатор	1,2	0,2
Синхронный двигатель	1,1	0,2
Асинхронный двигатель	0,9	0,2

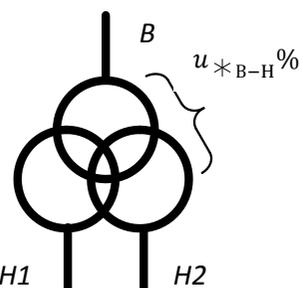
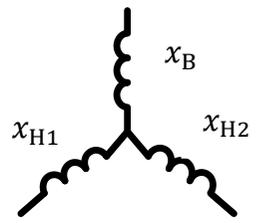
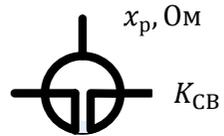
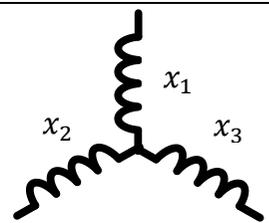
Таблица А.2 - Средние значения удельных индуктивных сопротивлений линий электропередачи

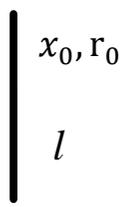
Линия электропередачи	$x_{уд}$, Ом/км
Одноцепная воздушная линия, кВ:	
6–220	0,4
220–330 (при расщеплении на два провода в фазе)	0,325
400–500 (при расщеплении на три провода в фазе)	0,307
750 (при расщеплении на четыре провода в фазе)	0,28
Трехжильный кабель, кВ:	
6–10	0,08
35	0,12
Одножильный маслонаполненный кабель 110–220 кВ	0,16

Таблица А.3 - Расчетные формулы для определения сопротивлений

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
<p>Генератор</p> 		$x = \frac{x_d \%}{100} \frac{U_6^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_* = \frac{x_d \%}{100} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
<p>Энергосистема</p> 		$x = \frac{U_6^2}{\sqrt{3} I_{\text{отк,ном}} U_{\text{ср}}}$ <p>или</p> $x = \frac{U_6^2}{S_K}$ <p>или</p> $x = x_{*c, \text{НОМ}} \frac{U_6^2}{S_K}$	$x_* = \frac{S_6}{\sqrt{3} I_{\text{отк,ном}} U_{\text{ср}}}$ <p>или</p> $x_* = \frac{S_6}{S_K}$ <p>или</p> $x_* = x_{*c, \text{НОМ}} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
<p>Двухобмоточный трансформатор</p> 		$x = \frac{u_K \%}{100} \frac{U_6^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_* = \frac{u_K \%}{100} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
С учетом активного сопротивления			

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
		$r = \frac{P_K U_0^2 10^{-3}}{S_{НОМ}^2}$ $x = \sqrt{u_{*K}^2 - \left(\frac{P_K}{S_{НОМ}}\right)^2} \frac{U_0^2}{S_{НОМ}}$	$r_* = \frac{P_K S_б 10^{-3}}{S_{НОМ}^2}$ $x_* = \sqrt{u_{*K}^2 - \left(\frac{P_K}{S_{НОМ}}\right)^2} \frac{S_б}{S_{НОМ}}$
<p>Трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор</p> 		$x_B = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KB-C}\% - u_{KC-H}\%) U_0^2}{100 S_{НОМ}}$ $x_C = \frac{0,5 (u_{KB-C}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-H}\%) U_0^2}{100 S_{НОМ}}$ $x_H = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-C}\%) U_0^2}{100 S_{НОМ}}$	$x_{*B} = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KB-C}\% - u_{KC-H}\%) S_б}{100 S_{НОМ}}$ $x_{*C} = \frac{0,5 (u_{KB-C}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-H}\%) S_б}{100 S_{НОМ}}$ $x_{*H} = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-C}\%) S_б}{100 S_{НОМ}}$

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
<p>Трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой НН</p> 		$x_B = \frac{0,125 u_{KB-H}\%}{100} \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}$ $x_{H1} = x_{H2} = \frac{0,75 u_{KB-H}\%}{100} \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}$	$x_{*B} = \frac{0,125 u_{KB-H}\%}{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}}$ $x_{*H1} = x_{*H2} = \frac{0,75 u_{KB-H}\%}{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}}$
<p>Реактор</p>  <p>$x_p, \text{ Ом}$</p>		$x = x_p \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$	$x_* = x_p \frac{S_6}{U_{cp}^2}$
<p>Сдвоенный реактор</p>  <p>$x_p, \text{ Ом}$ K_{CB}</p>		$x_1 = -x_p k_{cp} \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$ $x_2 = x_3 = x_p (1 + k_{CB}) \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$	$x_{*1} = -x_p k_{CB} \frac{S_6}{U_{cp}^2}$ $x_{*1} = x_{*2} = x_p (1 + k_{CB}) \frac{S_6}{U_{cp}^2}$

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
Линия 		$x = x_0 l \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$ $r = r_0 l \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$	$x_* = x_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2}$ $r_* = r_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2}$

Примечание:

$S_{ном}$ - номинальные мощности элементов (генератора, трансформатора, энергосистемы), МВ·А;

S_6 - базовая мощность, МВ·А;

S_K - мощность КЗ энергосистемы, МВ·А;

$I_{отк.ном}$ - номинальный ток отключения выключателя, кА;

$x_{*C,ном}$ - относительное номинальное сопротивление энергосистемы;

u_K - напряжение КЗ трансформатора, %;

x_p - сопротивление реактора, Ом;

P_K - потери КЗ трансформатора, кВт;

r_0, x_0 - активное и индуктивное сопротивления линии на 1 км длины, Ом/км;

l - длина линии, км;

U_6 - базовое напряжение, кВ;

U_{cp} - среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ;

x_d - сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора, %.

Таблица А.4 - Основные формулы преобразования схем

Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Сопротивление элементов преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}}$ <p>где</p> $\underline{Y}_{эк} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n$ $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2};$ $\underline{Y}_n = \frac{1}{\underline{Z}_n}$ $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена нескольких источников эквивалентным			$\dot{E}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} \sum_{K=1}^n \underline{Y}_K \dot{E}_K$ <p>При двух ветвях</p> $\dot{E}_{эк} = \frac{\dot{E}_1 \underline{Z}_2 + \dot{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование треугольника в звезду			$\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$
Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_F + \frac{\underline{Z}_H \underline{Z}_F}{\underline{Z}_G}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$ <p>.....,</p> <p>где $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$</p> <p>Аналогично и при большем числе ветвей</p>

Таблица А.5 – Значения постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ и ударного коэффициента

Место КЗ	T_a	k_y
Выводы явнополюсного гидрогенератора:		
без успокоительной обмотки	0,2	1,95
с успокоительной обмоткой	0,13	1,93
Выводы турбогенератора, МВт:		
12 - 60	0,16 – 0,25	1,94-1,955
100 – 1000	0,4 – 0,54	1,975-1,98
За блоком генератор-трансформатор при мощности генератора, МВт:		
60	0,15	1,935
100 – 200	0,26	1,965
300	0,32	1,977
За воздушными линиями напряжением, кВ:		
35 – 110	0,22	1,608
220	0,03	1,717
За понижающим трансформатором мощностью, МВ·А		
80	0,06	1,85
32 – 63	0,05	1,82
менее 32	0,045	1,8
Распределительные сети 6 – 10кВ	0,01	1,369

Таблица А.6 – Значения коэффициентов k_y и q зависимости от места КЗ

Место короткого замыкания	Коэффициенты	
	k_y	q
Выводы явнополюсного гидрогенератора:		
без успокоительной обмотки	1,95	1,68
с успокоительной обмоткой	1,93	1,65
Выводы турбогенератора	1,91	1,63
В цепи без учета активного сопротивления	1,8	1,52
На стороне НН трансформатора, кВ·А		
630 – 1000	1,3	-
100 – 400	1,2	1,09

Содержание

Введение	3
Перечень лабораторно-практических занятий	4
Лабораторное занятие 1. Расчёт симметричных токов коротких замыканий на ЭВМ	5
Лабораторная занятие 2. Расчёт несимметричных токов коротких замыканий на ЭВМ	7
Лабораторная занятие 3. Определение токов несимметричных КЗ при различных схемах соединений обмоток двухобмоточных трёхфазных трансформаторов	9
Практическое занятие 1. Определение расчётных токов симметричных коротких замыканий методом относительных единиц	16
Практическое занятие 2. Определение расчётных токов симметричных коротких замыканий методом именованных единиц	24
Практическое занятие 3. Определение расчётных токов несимметричных коротких замыканий	26
Приложение А	29