Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Фурсов Владимир Александрович
Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского федерального университета
Дата подписания: 05.06.2026 09:41:16
Уникальный программный ключ:
1c378726a41fd0143ae5bccc8ba81860800daa82

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению практических работ
по дисциплине «**Переходные процессы в электроэнергетических системах**»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

1. Общие сведения по выполнению практических работ

Практическое занятие №1. Переходные электромагнитные процессы. Структура электроэнергетики. Основные термины и понятия.
Практическое занятие №2. Выбор электрооборудования по условиям токов коротких замыканий. Баланс электрической энергии
Практическое занятие №3. Расчеты токов КЗ для проверки оборудования по условиям коротких замыканий. Математическое описание электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах для исследования устойчивости
Практическое занятие №4. Симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Основные положения и формулы. Устойчивость режимов систем при малых возмущениях
Практическое занятие №5. Анализ условий и средств стабилизации режимов; асинхронные режимы; переходные процессы в узлах нагрузки. Расчетные сопротивления реакторов
Практическое занятие №6. Виды переходных процессов в электроэнергетических системах. Нагрев проводов током КЗ
Практическое занятие №7. Основные сведения об переходных электромагнитных процессах. Расчет тока КЗ
Практическое занятие №8. Практический расчет начального и ударного токов КЗ. Расчет тока ударного КЗ
Практическое занятие №9. Основные положения и формулы Симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.
Расчет трехфазного тока КЗ

1. Цель и задачи освоения дисциплины

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

Задачи при изучении дисциплины:

Знать физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах;

Уметь анализировать результаты расчета переходных процессов для применения в реальных электроэнергетических системах и системах электроснабжения.

Владеть навыками расчета типовые переходные процессы

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование практических работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическая работа №7. Двухфазное КЗ. Однофазное КЗ. Двухфазное КЗ на землю. Правило эквивалентности прямой последовательности. – 2 часа, Практическая работа №14. Практический расчет начального и ударного токов КЗ. – 2 часа.

№ темы	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Обьем часов	Из них практическая подготовка, часов
1	**Практическое занятие №1. Переходные электромагнитные процессы.** Структура электроэнергетики. Основные термины и понятия.	2	
2	**Практическое занятие №2. Выбор электрооборудования по условиям токов коротких замыканий.** Баланс электрической энергии	2	
3	**Практическое занятие №3. Расчеты токов КЗ для проверки оборудования по условиям коротких замыканий.** Математическое описание электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах для исследования устойчивости	2	
4	**Практическое занятие №4. Симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Основные положения и формулы.** Устойчивость режимов систем при малых возмущениях	2	
5	**Практическое занятие №5. Анализ условий и средств стабилизации режимов; асинхронные режимы; переходные процессы в узлах нагрузки.** Расчетные сопротивления реакторов	2	

6	**Практическое занятие №6. Виды переходных процессов в электроэнергетических системах.** Нагрев проводов током КЗ	2	
7	**Практическое занятие №7. Основные сведения об переходных электромагнитных процессах.** Расчет тока КЗ	2	
8	**Практическое занятие №8. Практический расчет начального и ударного токов КЗ.** Расчет тока ударного КЗ	2	
9	**Практическое занятие №9. Основные положения и формулы Симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.** Расчет трехфазного тока КЗ	2	
	Итого за 6 семестр:	**18**	
	Итого:	**18**	

Практическая работа №1

Переходные электромагнитные процессы. Математическое описание электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах для исследования устойчивости.

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету переходных процессов

Привести к генераторному напряжению сопротивление Z в схеме на рис. 1а. Коэффициенты трансформации трансформаторов:

$$U_1/U_2 = 10{,}5/38{,}5;\ U_3/U_4 = 35/6{,}6;\ U_5/U_4 = 6/0{,}4.$$

Решение

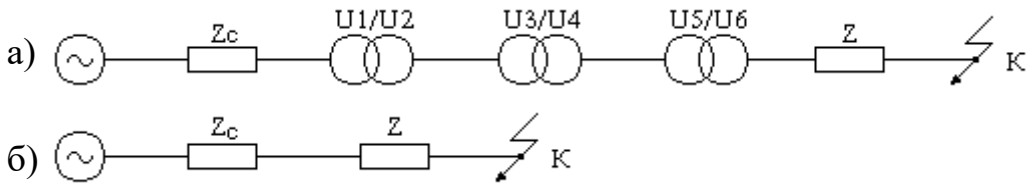
1. Приближенное приведение по уравнению (12):

$$Z_1 = Z\,(U_1/U_6)^2 = Z\,(10{,}5/0{,}4)^2 = 689\ Z.$$

2. Точное приведение по уравнению (1):

$$Z_1 = Z\,((U_5\,U_3\,U_1)/(U_6\,U_4\,U_2))^2 = ((6 \cdot 35 \cdot 10{,}5)/(0{,}4 \cdot 6{,}6 \cdot 38{,}5))^2 = 470{,}6\ Z.$$

Ошибка при расчете тока КЗ за сопротивлением Z, определенным по уравнению (1), будет очень велика.



Схемы приведения к расчетному напряжению при нескольких трансформаторах: а – исходная; б – расчетная

В схеме на рис. 1 ток КЗ за сопротивлением Z определен при расчетном напряжении $U_1 = 11$ кВ. Определить действительные токи при напряжении $U_2 = U_3$; $U_4 = U_5$, U_6. Коэффициенты трансформации указаны в примере 1; сопротивления генератора и линий не учитывать (Zc = 0). Величина Z = 470,6 Ом.

Решение

Ток КЗ $I_k^{(3)} = U/(\sqrt{3} \cdot Z) = 11000/(\sqrt{3} \cdot 470,6) = 13,51$ А при генераторном напряжении 11кВ. Приведенный ток КЗ равен:

– на стороне $U_2 = U_3$ $I_2 = 13,51 \cdot 10,5/38,5 = 3,685$ А;

– на стороне $U_4 = U_5$ $I_4 = 3,685 \cdot 35/6,6 = 19,54$ А;

– на стороне U_6 $I_6 = 19,54 \cdot 6/0,4 = 293,1$ А.

Если пользоваться средними номинальными напряжениями, то ток КЗ будет равен:

– на генераторном напряжении $10500/\sqrt{3} \cdot 689 = 8,81$ А;

– на стороне 0,4 кВ $8,81 \cdot 10,5/0,4 = 231,23$ А.

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическая работа №2

Устойчивость режимов систем при малых возмущениях.

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету устойчивости

От шин подстанции с вторичным напряжением 11 кВ питаются три линии. Первая линия выполнена алюминиевым кабелем 3×50 мм^2, вторая – алюминиевым проводом А50, третья – стальным проводом ПС-50. Длина каждой линии 5 км. Ток КЗ на шинах 11кВ 3000 А. Определить ток КЗ в конце каждой линии.

Решение

Сопротивление ЭЭС, приведенное к шинам 11 кВ, равно:

$$Xc = 11000/\sqrt{3} \cdot 3000 = 2,12 \text{ Ом}.$$

Сопротивление кабеля 10 кВ по Приложению 7 равно: $R = 0,62 \cdot 5 = 3,1$ Ом; $Xк = 0,09 \cdot 5 = 0,45$ Ом. Ток КЗ в конце кабельной линии равен:

$$I_k^{(3)} = \frac{110000}{\sqrt{3}\sqrt{(2,12 + 0,45)^2 + 3,1^2}} = 1579 \text{ А}.$$

На рис. а дан чертеж опоры линии 11 кВ, а на рис. б – вспомогательное построение для определения Dcp. Из рисунка видно, что

DB = 250 + 170 + 250 = 670 мм; AD = DC = AC/2 = 750 мм.

Из треугольника ADB

$$AB = \sqrt{AD^2 + DB^2} = \sqrt{750^2 + 670^2} = 1000 \text{ мм},$$

$$Dcp = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA} = \sqrt[3]{1000 \cdot 1000 \cdot 1500} = 1150 \text{ мм}$$

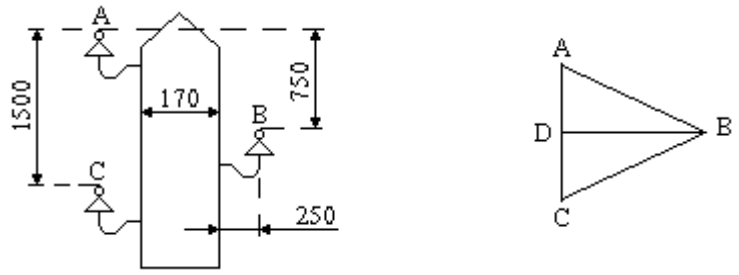
По Приложению 2 Dp = 9 мм для провода А-50:

$$X = 0{,}144 \cdot \lg 2 \cdot 1150/9 + 0{,}016 = 0{,}364 \text{ Ом/км},$$

а сопротивление фазы всей линии

$$Xл = 0{,}364 \cdot 5 = 1{,}82 \text{ Ом}.$$

Такой же результат можно получить по Приложению 27.



а) б)

К расчету индуктивного сопротивления линии

Активное сопротивление провода А50 по Приложению 2 равно r = 0,576 Ом/км, сопротивление одной фазы линии rл = 0,576·5 = 2,88 Ом. Ток трехфазного КЗ в конце линии

$$I_k^{(3)} = \frac{110000}{\sqrt{3}\sqrt{(2{,}12 + 1{,}82)^2 + 2{,}88^2}} = 1302{,}9 \text{ А}.$$

Если КЗ сопровождается дугой длиной 1200 мм (примерно среднее расстояние между проводами, что справедливо для первого момента КЗ), то

$$rд = \frac{1000 \cdot 1{,}2}{1310} = 0{,}92 \text{ Ом},$$

и ток $I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3}\sqrt{(2{,}12 + 1{,}82)^2 + (2{,}88 + 0{,}92)^2}} = 1160$ А

или 0,891 тока, определенного без учета дуги.

Такое незначительное уменьшение тока объясняется тем, что сопротивление дуги мало по сравнению с активным сопротивлением линии. Для стального провода Dp = 9,2 мм и внешнее индуктивное сопротивление по уравнению (15):

$$Хвнеш = 0{,}144 \cdot \lg 2 \cdot 1150/9{,}2 = 0{,}347 \text{ Ом/км}.$$

Значение внутреннего индуктивного сопротивления не рассчитывается, так как зависит от тока и определяется по Приложению 25.

Задаемся предполагаемым током трехфазного КЗ 400 А; Хвнут = 0,3 Ом/км. Активное сопротивление по Приложению 24 равно 2,75 Ом/км. Ток КЗ в конце линии будет:

$$I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3}\sqrt{[2{,}12 + (0{,}347 + 0{,}3) \cdot 5]^2 + (2{,}75 \cdot 5 + 2 \cdot 8)^2}} = 364 \text{ А}.$$

Полученный ток 364 А незначительно отличается от принятого предварительно тока 400 А. Пересчет в данном случае не требуется, так как ход кривых в Приложении 24 показывает, что при токе 364 А сопротивления Хвнут и R практически такие же, как и при токе 400 А.

Сопротивление дуги при токе 364 А:

$$Rд = 1000 \cdot 1{,}2/364 = 3{,}296 \text{ Ом}.$$

Ток КЗ с учетом сопротивления дуги:

$$I^{(3)}_k = \frac{11000}{\sqrt{3}\sqrt{[2{,}12 + (0{,}347 + 0{,}3) \cdot 5]^2 + (2{,}75 \cdot 5 + 3{,}296)^2}} = 355{,}87 \text{ А},$$

или 0,97 тока, определенного без учета дуги в месте повреждения.

Если дуга возникает на первой опоре от подстанции, то ее сопротивление будет:

$$rд = 1000 \cdot 1{,}2/3000 = 0{,}4 \text{ Ом},$$

и ток КЗ с учетом дуги равен $I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3}\sqrt{(2{,}12^2 + 0{,}4^2)}} = 2947$ А,

или 0,982 тока, определенного без учета дуги.

Если дуга возникает на шинах КРУ, то при ее длине около 0,3 м сопротивление дуги будет:

$$rд = 1000 \cdot 0{,}3/3000 = 0{,}1 \text{ Ом},$$

и ток КЗ практически не изменится:

$$I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3}\sqrt{(2{,}12^2 + 0{,}1^2)}} = 2966{,}4 \text{ А}.$$

Для сравнения результатов выполним вычисления по уравнению (2) вместо (7).

Кабельная линия:

$$Zp.c = \sqrt{3{,}1^2 + 0{,}45^2} = 3{,}132 \text{ Ом};$$

$$I_k^{(3)} = 11000/\sqrt{3}(2{,}12 + 3{,}132) = 1210 \text{ А}.$$

Линия с стальными проводами:

$$Zp.c = \sqrt{[(0{,}347 + 0{,}3) \cdot 5]^2 + (2{,}75 \cdot 5)^2} = 14{,}125 \text{ Ом};$$

$$I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3 \cdot (2{,}12^2 + 14{,}125^2)}} = 391{,}4 \text{ А}.$$

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическая работа №3
Расчетные сопротивления реакторов

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету реактора

Определить ток КЗ за реактором и напряжение на шинах в системах Линейный реактор 6 кВ, 8 %, 600 А; сдвоенный реактор 6 кВ, 12 %, 2000 А, m = 0,5. Вторичное напряжение питающего трансформатора 6,6 кВ; ток КЗ до реактора 16 кА.

Решение

1. Сопротивление линейного реактора:

$$Xp = 10 \cdot X \cdot U/\sqrt{3} \cdot I = 10 \cdot 8 \cdot 6/\sqrt{3} \cdot 600 = 0{,}462 \text{ Ом}.$$

Сопротивление системы до выводов 6,6 кВ питающего трансформатора:

$$Xc = 6600/\sqrt{3} \cdot 16000 = 0{,}238 \text{ Ом}.$$

Ток КЗ за линейным реактором:

$$I_k^{(3)} = 6600/\sqrt{3} \cdot (0{,}238 + 0{,}462) = 5450 \text{ А}.$$

2. Сопротивление одной ветви сдвоенного реактора:

$$Xp = 10 \cdot 12 \cdot 6/2000 = 0{,}36 \text{ Ом}.$$

Ток КЗ за реактором:

$$I_k^{(3)} = 6600/\sqrt{3} \cdot (0{,}36 + 0{,}238) = 6379{,}65 \text{ А}.$$

Необходимо обратить внимание на то, что хотя реакторы имеют номинальное напряжение 6,0 кВ, включены они на вторичное напряжение питающего трансформатора 6,6 кВ и приведения к одному расчетному напряжению в этом случае не требуется.

3. Напряжение на шинах при КЗ за линейным реактором Uш = $\sqrt{3}\cdot I_k^{(3)}$ Xр = $\sqrt{3}\cdot 5450\cdot 0{,}442 = 4356$ В, или 4356/6600 = 0,66 номинального.
Напряжение на неповрежденной секции шин по рис. 6б равно:

$$\sqrt{3}\cdot 0{,}36\cdot 6379{,}65 = 3971{,}4 \text{ В, или } 0{,}602 \text{ номинального.}$$

Следует отметить, что такое напряжение не обеспечивает надежной работы магнитных пускателей: обычно их напряжение отпадания колеблется в пределах 0,65…0,75 номинального и в данном случае могут иметь место неправильные отключения электродвигателей.
Те же напряжения можно определить и по выражениям (23) и (24):

$$Uш = 0{,}462\cdot U/(0{,}462 + 0{,}238) = 0{,}66\ Uн;$$
$$Uш = 0{,}36\cdot U/(0{,}36 + 0{,}238) = 0{,}602\ Uн.$$

На подстанции выведен из работы трансформатор 2Т и секция шин IV питается от трансформатора через реактор трансформатора 2Т. Требуется определить ток КЗ на секции шин IV.

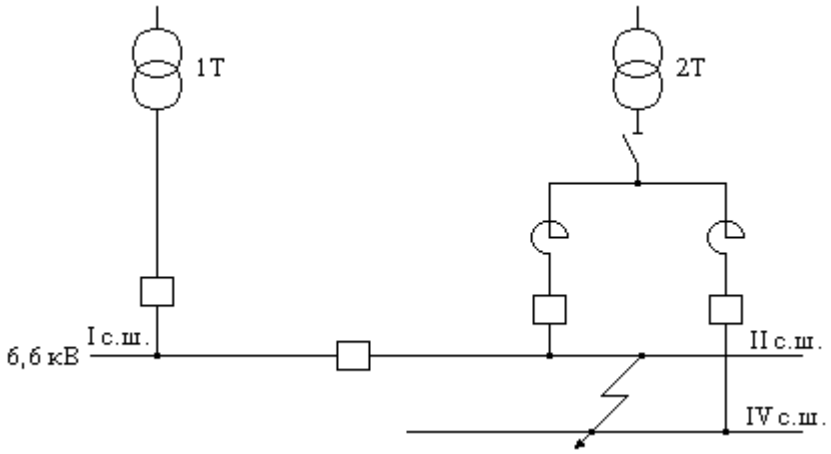


Схема подстанции

Решение

Сопротивление двух последовательно включенных ветвей реактора по выражению (22) равно:

$$Xbc = 2\cdot 0{,}36\cdot(1 + 0{,}5) = 1{,}08 \text{ Ом (рис. 6),}$$

ток КЗ

$$I_k^{(3)} = 6600/\sqrt{3}\cdot(1{,}08 + 0{,}238) = 2894{,}56 \text{ А,}$$
$$I_k^{(3)} = \sqrt{3}\cdot 2894{,}56/2 = 2503{,}8 \text{ А;}$$

напряжение на секции шин I равно:

$$1{,}08\cdot U/(1{,}08 + 0{,}238) = 0{,}819U.$$

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?

2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическая работа №4
Нагрев проводов током КЗ

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету токов КЗ

Ток КЗ на шинах питающей подстанции равен 10 кА при напряжении 6,6 кВ. Выполнить расчет спадания тока через 1, 2, 3 с для медного кабеля сечением 50 мм^2, длиной 5 км.

Решение

Определим активное сопротивление кабеля при температуре 65 ºС. По Приложению 7 активное сопротивление медного кабеля 50 мм^2 при температуре +20 ºС равно 0,37 Ом/км. При температуре 65 ºС сопротивление будет 0,37· [1 + 0,004· (65 – 20)] = 0,4366 Ом/км.

Полное активное сопротивление rx = 0,4366·5 = 2,185 Ом.

Сопротивление системы xc = 6600/$\sqrt{3}$·10000 = 0,3815 Ом.

Сопротивление кабеля xк = 0,083·5 = 0,415 Ом.

Ток трехфазного КЗ в конце кабеля в первый момент

$$I_o^{(3)} = 6600/\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0{,}3815 + 0{,}415)^2 + 2{,}18} = 6600/\sqrt{3} \cdot 2{,}32 = 1644{,}41 \text{ А}$$

Расчет для времени t = 1 с:

$$\Delta = (I^{(3)}/q)^2 \cdot t = (1644{,}41/50)^2 \cdot 1 = 1081{,}6 \text{ А}^2 \text{ с/мм}^4,$$

$$a = (2{,}13/2{,}32)^2 = 0{,}884.$$

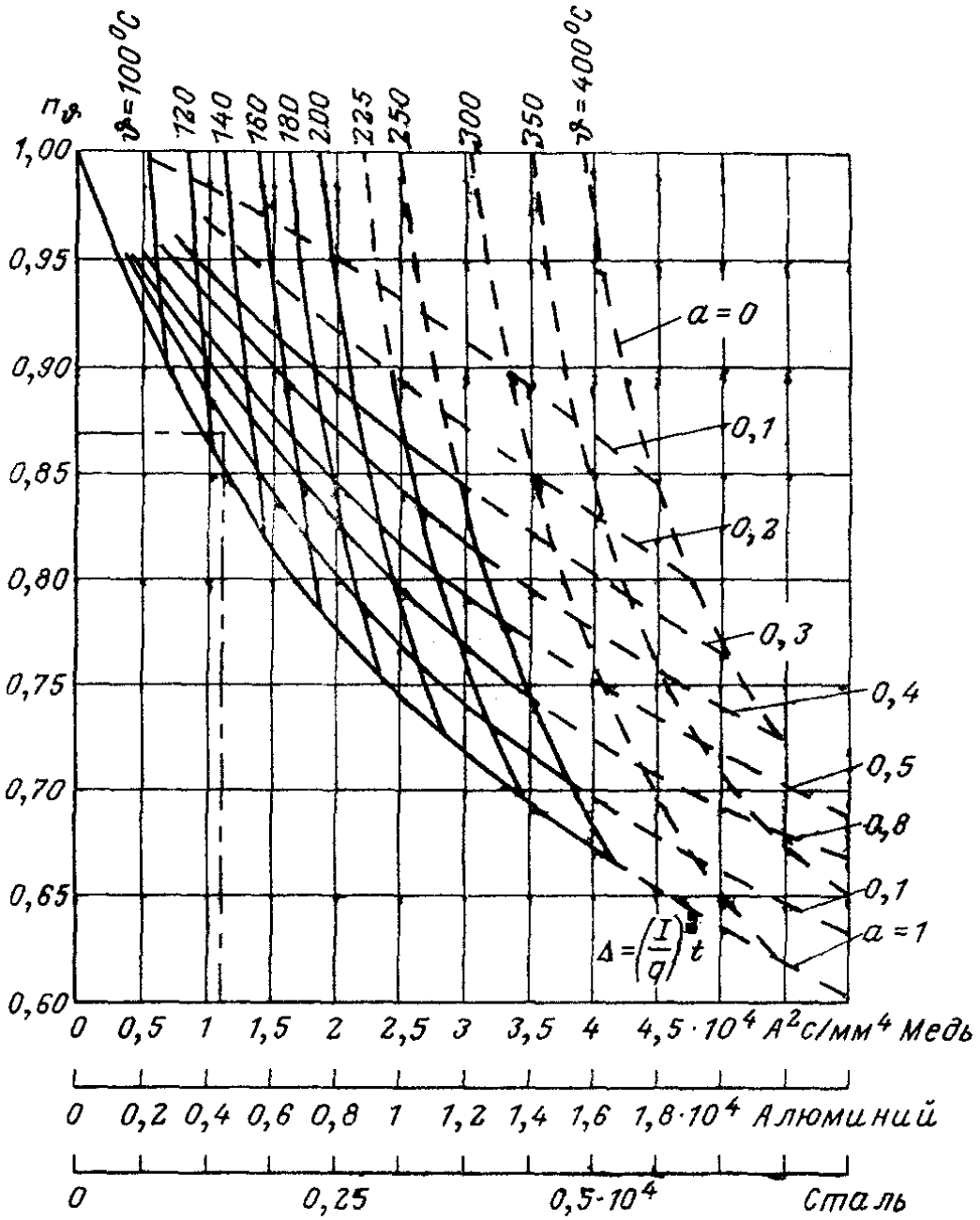


Диаграмма для определения снижения
тока КЗ от нагрева проводов

Определить уменьшение тока КЗ из-за нагрева обмоток трансформатора.

Решение

Данные трансформаторов по примеру 5:

S_{T1} = 25 кВ·А, Z = 96 Ом; X = 152,3 Ом; Z = 180 Ом;

S_{T2} = 400 кВ·А, Z = 3,44 Ом; X = 10,71 Ом; Z = 11,25 Ом.

Активное сопротивление при 250 °С через 1,82 с после начала КЗ будет в 1,7 раза больше, чем при 75 °С. Полные сопротивления будут: для трансформатора 25 кВ·А $Z = \sqrt{152{,}3^2 + (1{,}7 \cdot 96)^2} = 223{,}2$ Ом вместо 180 Ом; для трансформатора 400 кВ·А $Z = \sqrt{10{,}71^2 + (1{,}7 \cdot 3{,}44)^2} = 12{,}2$ Ом вместо 11,25 Ом.

Максимальное уменьшение тока КЗ при Zc = 0 через 1,82 с составит 180/223,2 = 0,816 для трансформатора 25 кВ·А и 11,25/12,2 = 0,93 для трансформатора 400 кВ·А.

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическое занятие №5.

Определение параметров элементов эквивалентных схем замещения

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету эквивалентных схем замещения

Параметры эквивалентных схем замещения могут быть определены:

1. В именованных и относительных единицах приведением значений параметров расчетных схем к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

2. В относительных и именованных единицах значений параметров расчетных схем к выбранным базисным условиям с учетом средних коэффициентов трансформации, равных отношению средних номинальных напряжений сетей соответствующих ступеней напряжений. Рекомендуется использовать шкалу средних номинальных между фазных напряжений сетей в [кВ]: 3,15; 6,3;10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 750.

В первом случае рассчитывают токи КЗ при наличии данных с фактических коэффициентов трансформация. Наиболее предпочтителен для практических расчетов (рекомендуется в КР) второй способ приведения. Расчетные выражения для этого способа приведены в табл. 1. При выборе данных условий следует руководствоваться тем, чтобы порядок числовых значений был удобен для оперирования с ними. За базисную мощность ($S_б$) целесообразно принимать число, кратное десяти. Например, 10, 100, 1000 и т. п. [МВА]. За базисные напряжения ($U_б$) рекомендуется принимать среднее значение той степени трансформации, где находится точка КЗ.

Базисный ток и сопротивление определяются по выражениям:

$$Iб = \frac{Sб}{\sqrt{3} \cdot Uб} \qquad Zб = \frac{Uб}{\sqrt{3} \cdot Iб} = \frac{Uб}{Sб} \quad (1)$$

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическое занятие №6.

Баланс электрической энергии

Актуальность темы:

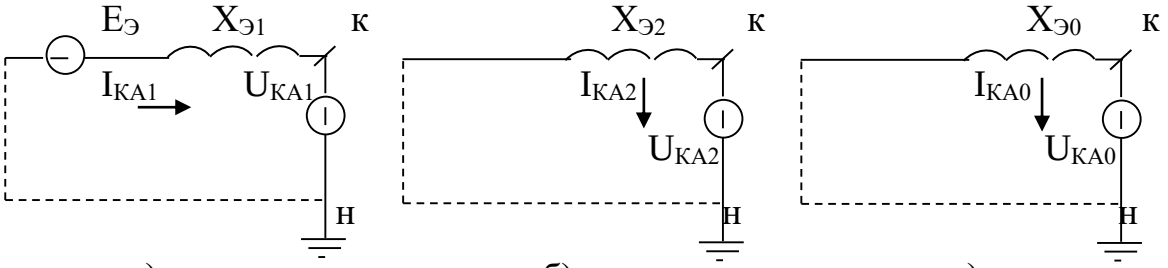
Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету баланса электрической энергии

Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

Определение параметров их элементов. (В дальнейшем приняты широко распространенные обозначения индексов для параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей: 1, 2, 0).

1. Схема замещения прямой последовательности аналогична схеме, которая составляется для расчетов симметричного КЗ. В зависимости от момента времени и метода расчета все элементы, в состав которых входят вращающие машины (генераторы, нагрузки двигатели, системы и т.п.), вводятся в схему замещения прямой последовательности соответствующими реактивными ЭДС. Все остальные элементы вводятся в схему неизменными сопротивлениями.

Началом схемы (н) прямой последовательности считается точка, в которой объедены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. В месте несимметрии (конец схемы - к) действует ЭДС, равная напряжению прямой последовательности. Любую схему прямой последовательности можно привести к простейшей схеме, из которой определяется результирующая ЭДС $E_Э$ и результирующее сопротивление прямой последовательности $X_Э$12. Схема замещения обратной последовательности по конфигурации не отличается от схемы прямой последовательности. Началом схемы обратной последовательности является точка, объединяющая начало всех генерирующих и нагрузочных ветвей (ЭДС обратной последовательности равны нулю). В конце схемы (в точке КЗ) приложено напряжение $U_{КА2}$. Параметры элементов схем замещения обратной последовательности для трансформаторов, воздушных линий, кабелей и реакторов те же, что и в схеме прямой последовательности. По сравнению со схемой замещения прямой последовательности изменяются сопротивления обратной последовательности элементов, в состав которых входят вращающиеся машины.



а). б). в).

Если для нагрузки сопротивление обратной последовательности не задано, то его можно принимать равным $X_{H(2)}$=0,35 о. е.

Сопротивление обратной последовательности генераторов дается в каталогах в относительных единицах с приведением к номинальным параметрам генератора.

Схема замещения обратной последовательности приводится к виду, изображенному на рис. 1, б. Здесь $X_{Э2}$ является результирующим сопротивлением обратной последовательности.

3. Вид схемы замещения нулевой последовательности зависит от заземления нейтралей сети высшего напряжения (110 кВ и выше), количества трансформаторов и автотрансформаторов, схем соединения их обмоток. Если нейтраль трансформатора будет незаземлена, то не будет контура для протекания тока нулевой последовательности. При соединении обмотки трансформатора в треугольник ток нулевой последовательности в этой обмотке протекает, но далее пути для него нет.

В схеме замещения нулевой последовательности по сравнению с прямой изменяются сопротивления линий электропередачи. Это обусловлено особенностями циркуляция токов нулевой последовательности.

Составление схемы замещения нулевой последовательности следует начинать от точки КЗ, где приложено напряжение U_{KA0} и являющейся концом схемы замещения. Далее в схему вводятся те элементы, но которым протекают токи нулевой последовательности. Концы этих элементов, имеющих потенциалы земли, т. е. заземленные нейтрали трансформаторов (автотрансформаторов) и обмотки, соединенные треугольником, объединяются в общую точку, получая начало схемы замещения нулевой последовательности. Затем схему свертывают относительно точки КЗ для определения результирующей величины сопротивления нулевой последовательности Хэо (рис. 1, в).

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическое занятие №7.

Расчет тока КЗ

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету тока короткого замыкания

Общий порядок аналитического расчета электрических сетей при КЗ.

После составления схем замещения электрической схемы и определения параметров их элементов возникает необходимость определения токов и напряжений как в месте повреждения, так я в любом заданном месте.

Для этого используются обычные методы, которые изучались в курсах "Теоретические основы электротехники" и "Электрические сети и системы".

1. Приведение схемы замещения к простейшему виду.

Для этого используются методы параллельного и последовательного сложения сопротивлений, преобразования треугольника в звезду и обратно, метод эквивалентных ЭДС.

Иногда в более сложных случаях при преобразовании схемы замещения возникает необходимость применения способа разреза схемы. Преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразований или участвовала них только на последних этапах.

2. При ручном расчете иногда бывает удобней использовать принцип наложения. Для этого необходимо определять собственные и взаимные сопротивления схемы замещения.

В КР производятся расчеты начальной стадии переходного процесса при трехфазном и несимметричных (при однократной поперечной несимметрии) КЗ. В задачи этих расчетов входит определение действующего значения периодической слагающей тока КЗ в начальный момент времени ($I_{П0}$) - начального сверхпереходного тока (I"), а также ударного тока (i_y, I_y).

При выполнении расчетов используются все те допущения, которых были изложены ранее. Кроме них, в практических расчетах по определению начального сверхпереходного тока допускается равенство продольных и поперечных сверхпереходных реактивностей синхронных машин ($x"_d = x"_q$), вне зависимости от их типов, что значительно упрощает расчеты.

При расчетах несимметричных КЗ предполагается, что периодическая слагающая тока состоит только из основной гармоники, т.е. пренебрегают высшими гармониками.

При расчете $I_{П0}$ должны быть учтены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные асинхронные двигатели мощностью 100 кВт и более если они не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами. В автономных системах следует учитывать и электродвигатели мощностью менее 100 кВт, если их доля в суммарном КЗ составляет не менее 5 %.

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?

2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическое занятие №8.

Расчет тока ударного КЗ

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету тока короткого замыкания прямой последовательности

Синхронные и асинхронные машины в схему замещения прямой последовательности должны быть введены сверхпереходными сопротивлениями (x''_d) и сверхпереходными ЭДС численно равными, значениям этих ЭДС в момент, предшествующий КЗ (E"). При отсутствии данных по E" значение ЭДС для различных элементов сети могут быть определены соответствии с табл. 1.

Нагрузка в схеме замещения учитывается приближенно, как источник со сверхпереходным сопротивлением $x''_н$=0,35 и ЭДС $E''_н$=0.85 (если не заданы другие величины).

Все остальные элементы сети входят с заданными параметрами, приведенными к одной базисной мощности, $S_Б$ (в о. е.), либо к одной ступени напряжения (в именованных единицах).

Для расчетов и анализа несимметричных КЗ важным выводом является правило эквивалентности прямой последовательности. Суть этого правила состоит в том, что ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ можно определить как ток некоторого эквивалентного трехфазного КЗ, удаленного от действительной точки повреждения на дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$ (шунт КЗ), величина которого определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, ($x_{Э2}$ и $x_{Э0}$) относительно, места КЗ и зависит от вида КЗ. В соответствие с этим правилом эквивалентная схема прямой последовательности имеет вид, изображенный на рис. 2.

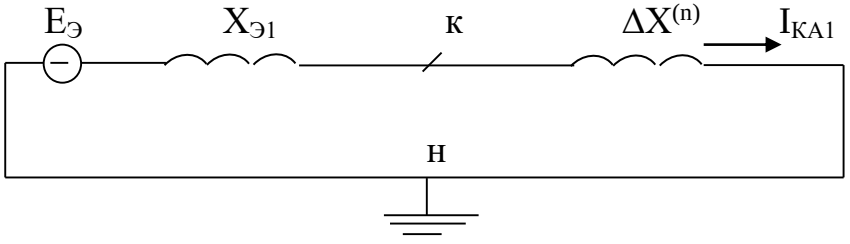


Рис.2

Ток прямой последовательности особой фазы (А) в месте КЗ при любом несимметричном КЗ (n) следует определять до формуле

$$I_{KA1}^{(n)} = \frac{E_Э}{j(x_{Э1} + \Delta x^{(n)})} \quad (2)$$

где $\Delta x^{(n)}$ - дополнительное сопротивление (определяется в соответствии с табл. 2).

Схемы замещения всех трех последовательностей методом преобразований приводятся к простейшему виду. При этом определяются суммарные сопротивления схемы каждой последовательности относительно места КЗ $x_{Э1}$, $x_{Э2}$, $x_{Э0}$, а в схеме прямой последовательности Еэ. При выполнении преобразований схем следует выбирать такую последовательность, чтобы число преобразований, особенно сложных, было наименьшим. Это обеспечивает меньшее количество ошибок в вычислениях и экономит расчетное время. В тоже время последовательность преобразований должна быть такова, чтобы в последнюю очередь преобразовались те части схемы, в ветвях которых необходимо определить токи и остаточные напряжения. Таким образом, сокращается объем вычислений при обратном развертывании схемы. Полный ток поврежденной фазы в месте КЗ равен

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{KA1}^{(n)} \quad (3)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз ток поврежденной фазы в месте КЗ больше тока прямой последовательности

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Практическое занятие №9.

Расчет трехфазного тока КЗ

Формируемые компетенции

ПК-2	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов
Индикаторы достижения компетенций	ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта

Знать: физику переходных процессов при трехфазном токе КЗ;
Уметь: анализировать результаты расчетов трехфазного тока КЗ

Владеть: навыками расчета трехфазного тока КЗ

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету трехфазного тока КЗ

Токи и напряжения обратной и нулевой последовательности в месте повреждения связаны определенными соотношениями с токами и напряжениями прямой последовательности для расчетной фазы, которые определяются видом повреждения. Если принять для всех несимметричных повреждений за расчетную фазу А, соотношения будут:

- для двухфазного КЗ

$$I_{KA2} = -I_{KA1}; U_{KA1} = U_{KA2} \quad (4)$$

- для однофазного КЗ

$$I_{KA1} = I_{KA2} - I_{KA0}; U_{KA1} + U_{KA2} + U_{KA0} = 0 \quad (5)$$

- для двухфазного на землю

$$I_{KA1} + I_{KA2} + I_{KA0} = 0; U_{KA!} = U_{KA2} - U_{KA0}$$
$$I_{KA2} = -I_{KA1} \frac{\Delta x^{(1.1)}}{x_{Э2}}; I_{KA0} = -I_{KA1} \frac{\Delta x^{(1.1)}}{x_{Э0}} \quad (6)$$

Полные токи в фазах соответственно:

$$I_{KA} = I_{KA1} + I_{KA2} + I_{KA0}$$
$$I_{KB} = a^2 I_{KA1} + aI_{KA2} + I_{KA0} \quad (7)$$
$$I_{KC} = aI_{KA1} + a^2 I_{KA2} + I_{KA0}$$

где $a = e^{j120} = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$; $a^2 = e^{j240} = -0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Напряжения различных последовательностей в месте повреждения находятся как (рис 1)

$$U_{KA1} = jI_{KA1} \cdot \Delta x^{(n)}$$

$$U_{KA2} = -jI_{KA2} \cdot x_{Э2} \quad (8)$$

$$U_{KA0} = -jI_{KA0} \cdot x_{Э0}$$

Полные напряжения отдельных фаз в месте повреждения определяются через соответствующие (U_{KA1}, U_{KA2}, U_{KA0}) по соотношениям, аналогичным для токов

$$U_{KA} = U_{KA1} + U_{KA2} + U_{KA0}$$

$$U_{KB} = a^2 U_{KA1} + aU_{KA2} + U_{KA0} \quad (9)$$

$$U_{KC} = aU_{KA1} + a^2 U_{KA2} + U_{KA0}$$

Для нахождения фазных токов и напряжений в заданном сечении необходимо произвести расчет токораспределений в схемах всех последовательностей, последовательно развертывая каждую из них. Исходным для этих расчетов является получение значения токов и напряжений различных последовательностей в месте повреждений (рис 3).

При развертывании схем пользуются известными правилами и законами распределения токов в линейных электрических цепях, для схем прямой последовательности напряжение в какой - либо удаленной от места повреждения точке (m) будет определяться как

$$U_{ma1} = U_{ka1} + \sum_{i-1,n} I_{mi1} jx_{mi1} \quad (10)$$

где $\sum_{i-1,n} I_{mi1} jx_{mi1}$ - сумма падений напряжения в ветвях по пути от точки повреждения до заданной m;

I_{mi1}-ток ветвей с сопротивлением x_{mi1};

n-число ветвей на пути преобразования от точки n до m.

Напряжения обратной и нулевой последовательности в сечении ″m″ определяются

$$U_{ma2} = U_{ka2} + \sum_{i-1,n} I_{mi2} jx_{mi2}$$

$$U_{ma0} = U_{ka0} + \sum_{i-1,n} I_{mi0} jx_{mi0} \quad (11)$$

Для этих схем по мере удаления расчетного сечения от места повреждения абсолютная величина напряжения уменьшается. Все преобразования выполнятся по схеме замещений. При наличии на пути преобразования трансформаторов необходимо учесть, что взаимная ориентация векторов токов и напряжения различных последовательностей может изменяться, группой соединения обмоток этих трансформаторов.

Векторы напряжений и токов различных последовательностей при переходе через трансформаторы получают определенное угловое смещение. Поэтому полученные значения токов и напряжений в сечении (m) должны быть умножены па оператор поворота e^{pj30}, в котором $p=(-1)^N$, в котором N - номер группы соединений обмоток трансформатора. При переходе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y или Δ/Δ (группа 12) углового смешения нет. При переходе через трансформаторы с наиболее часто встречающейся группой Y/Δ-11составляющие прямой последовательности

поворачиваются на угол 30 градусов по направлению вращения векторов (e^{j30}), обратной последовательности на 30 градусов против направления вращения векторов (e^{j30}). Поэтому выражения для напряжений U_{ma1} и U_{ma2} при одной трансформации будут иметь вид:

$$U_{ma1} = (U_{ka1} + \sum_{i-1,n} I_{mi1} jx_{mi1}) e^{j30}$$

$$U_{ma2} = (U_{ka2} + \sum_{i-1,n} I_{mi2} jx_{mi2}) e^{-j30} \qquad (12)$$

При переходе с треугольника на звезду - наоборот, прямая на (e^{-j130}), обратная на (e^{j30}). В общей случае, когда на пути развертывания схемы встречается не одна трансформация, поворот должен быть учтен соответствующее число раз. Токи нулевой последовательности трансформируются лишь при переходе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y.

Вопросы для собеседования:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

8.1.1. Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

8.1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

8.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям.
2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям.
3. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.

8.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. http://www.biblioclub.ru -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. http://www.iprbookshop.ru/ - Электронно- библиотечная система IPRbooks

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «**Переходные процессы в электроэнергетических системах**»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания являются заготовкой к лабораторным работам по дисциплине «**Переходные процессы в электроэнергетических системах**» и предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника дневной и заочной форм обучения.

При подготовке к лабораторным занятиям необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который будет соответствовать требованиям к содержанию отчета с использованием рекомендуемой литературы и источников Internet.

Применение методических указаний позволяет интенсифицировать процесс изучения материала, помогает студентам приобретать навыки работы с оборудованием и технической литературой.

Содержание

Основные правила техники безопасности в лаборатории электротехники и электроники……... 4

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ……. 5

Лабораторная работа № 1 Расчеты и анализ токов коротких замыканий.
Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора…….. 6

Лабораторная работа № 2 Расчет для выбора выключателей по отключающей способности
Простые замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью…… 12

Лабораторная работа № 3 Двухфазное КЗ. Однофазное КЗ. Двухфазное КЗ на землю. Правило эквивалентности прямой последовательности.
Двухфазное короткое замыкание…… 17

Лабораторная работа № 4 Комплексные схемы замещения.
Однофазное короткое замыкание……... 24

Лабораторная работа № 5 Переходной процесс в простейших трехфазных цепях. Постановка задачи.
Расчет несимметричных КЗ на модели постоянного тока…….. 29

Лабораторная работа № 6 Трехфазное КЗ в простейшей трехфазной неразветвленной цепи.
Однократная продольная несимметрия……. 43

Лабораторная работа № 7 Учет асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки.
Двухфазное короткое замыкание на землю……... 53

Лабораторная работа № 8 Расчет для выбора выключателей по отключающей способности.
Учет взаимоиндукции линий электропередач в схемах нулевой последовательности……. 58

Лабораторная работа № 9 Однофазное КЗ.
Короткие замыкания на стороне выпрямленного тока……. 65

1. Цель и задачи освоения дисциплины

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

Задачи при изучении дисциплины:

Знать физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах;

Уметь анализировать результаты расчета переходных процессов для применения в реальных электроэнергетических системах и системах электроснабжения.

Владеть навыками расчета типовые переходные процессы

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование лабораторных работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие лабораторные работы: Лабораторная работа №5. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности. – 2 часа, Лабораторная работа №16. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности. – 2 часа.

№	Наименование лабораторных работ, их краткое содержание	Объем часов (часы)	Из них практическая подготовка, часов
1	**Лабораторная работа № 1 Расчеты и анализ токов коротких замыканий.** Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора	2	
2	**Лабораторная работа № 2 Расчет для выбора выключателей по отключающей способности** Простые замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью	2	
3	**Лабораторная работа № 3 Двухфазное КЗ. Однофазное КЗ. Двухфазное КЗ на землю. Правило эквивалентности прямой последовательности.** Двухфазное короткое замыкание	2	
4	**Лабораторная работа № 4 Комплексные схемы замещения.** Однофазное короткое замыкание	2	

5	**Лабораторная работа № 5 Переходной процесс в простейших трехфазных цепях. Постановка задачи.** Расчет несимметричных КЗ на модели постоянного тока.	2	
6	**Лабораторная работа № 6 Трехфазное КЗ в простейшей трехфазной неразветвленной цепи.** Однократная продольная несимметрия	2	
7	**Лабораторная работа № 7 Учет асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки.** Двухфазное короткое замыкание на землю	2	
8	**Лабораторная работа № 8 Расчет для выбора выключателей по отключающей способности.** Учет взаимоиндукции линий электропередач в схемах нулевой последовательности	2	
9	**Лабораторная работа № 9 Однофазное КЗ.** Короткие замыкания на стороне выпрямленного тока	2	
	Итого за 6 семестр	**18**	
	Итого	**18**	

Лабораторная работа № 1

РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КЗ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОНИЖАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

1. Цель работы: построение векторных диаграмм токов и напряжений при переходе через трехфазный трансформатор при различных видах КЗ.

2. Краткая теория

2.1. Общие положения

Изучение вопроса об изменении векторных диаграмм имеет большое значение на практике при определении токов КЗ в отдельных ветвях схемы и при проектировании и анализе работы устройств релейной защиты систем электроснабжения. Токи и напряжения при различных видах КЗ изменяются при переходе через трансформатор не только по абсолютной величине, но и по фазе в зависимости от группы соединения его обмоток.

Группа соединения трансформатора определяется схемой соединения его обмоток и обозначается целым числом m в зависимости от сдвига по фазе между линейными первичным и вторичным напряжениями на одноименных зажимах трансформатора. Угол сдвига m · 30° соответствует m группе соединений.
В системах электроснабжения наибольшее распространение получили следующие схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:
а) схема соединения обмоток трансформатора Y/Y-12;
б) схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ-11.

2.2. Схема соединения Y/Y-12 (рис. 1.1)

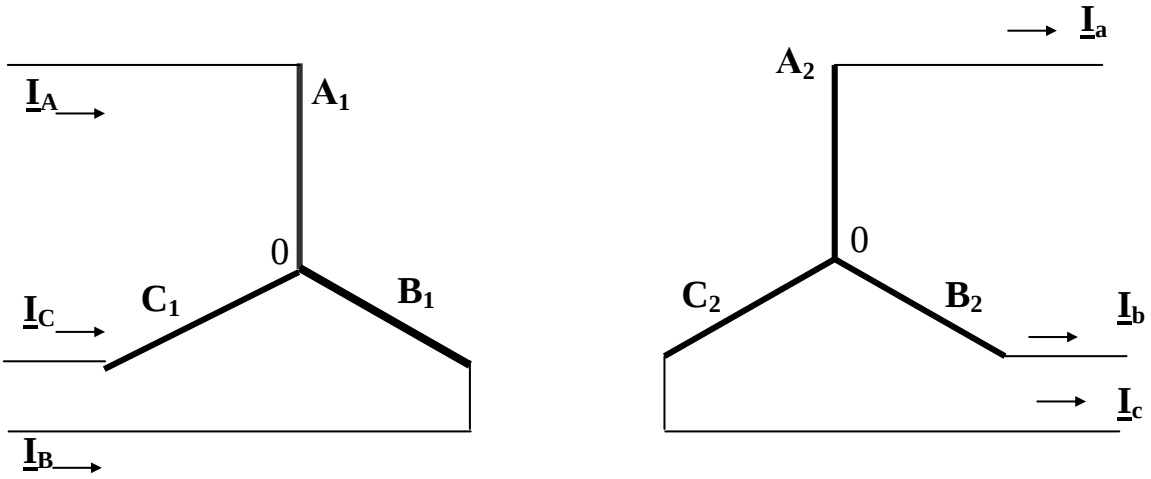


Рис. 1.1. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y-12

Коэффициент трансформации схемы Y/Y-12 K = W1/W2. Угловые смещения токов и напряжений по фазам на стороне I обмотки и II обмотки отсутствуют.
Векторные диаграммы напряжений при K = 1 приведены на рис. 1.2*а* при симметричном режиме (симметричная нагрузка по фазам или трехфазное КЗ) и токов (рис. 1.2*б*) при переходе через трансформатор с группой соединения обмоток Y/Y-12.

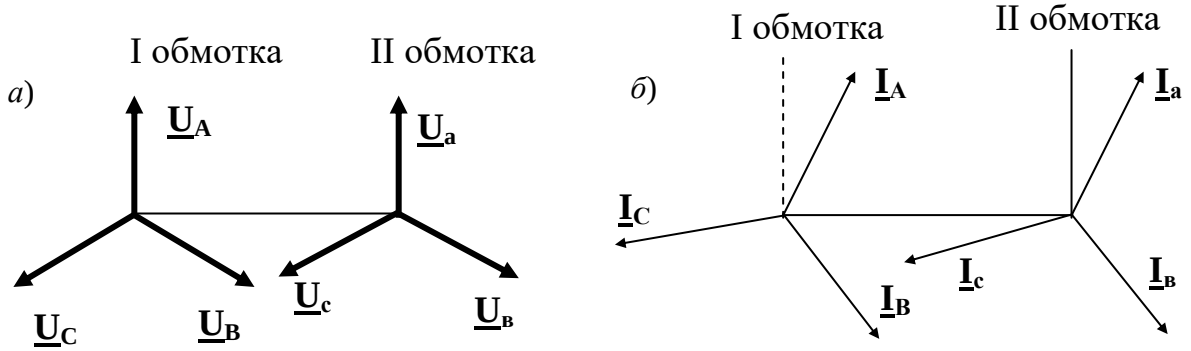


Рис. 1.2. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при переходе через
трансформатор Y/Y-12 при симметричном режиме его работы

Анализируя векторные диаграммы напряжений и токов (рис. 1.2), можно сделать вывод, что напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательности, протекающие по первичной обмотке, трансформируются без сдвигов по фазе во вторичную обмотку, изменяясь по значению
в K раз.

2.3. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ-11

На рис. 1.3 приведена принципиальная схема трансформатора с соединением обмоток Y/Δ-11. Если число витков фазных обмоток соответственно равны W_Y и W_Δ, то линейный коэффициент трансформации $K=\sqrt{3}\ W_Y / W_\Delta$. При известных фазных токах $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$ и $\underline{I}_c$ ток в линейных проводах за треугольником имеем:

$\underline{I}_a = \underline{I}_{ac} - \underline{I}_{ba} = (\underline{I}_A - \underline{I}_B)\ W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_A - \underline{I}_B)K/\sqrt{3}$;

$\underline{I}_в = \underline{I}_{ba} - \underline{I}_{cb} = (\underline{I}_B - \underline{I}_C)\ W_\lambda / W_\Delta = (\underline{I}_B - \underline{I}_C)K/\sqrt{3}$; (1.1)

$\underline{I}_c = \underline{I}_{ac} - \underline{I}_{cb2} = (\underline{I}_C - \underline{I}_A)\ W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_C - \underline{I}_A)K/\sqrt{3}$.

Выражения (1.1) можно видоизменить, выразив токи через их симметричные составляющие. Так, например, для тока $\underline{I}_a$ получим:

$$\begin{aligned}\underline{I}_a &= (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_0 - a^2\underline{I}_{A1} - a\underline{I}_{A2} - \underline{I}_0)K/\sqrt{3} = \\ &= \left[(1-a^2)I_{A1} + (1-a)I_{A2}\right] K/\sqrt{3} = (I_{A1}e^{j30^\circ} + I_{A2}e^{-j30^\circ})K,\end{aligned} \quad (1.2)$$

откуда следует, что линейные токи за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

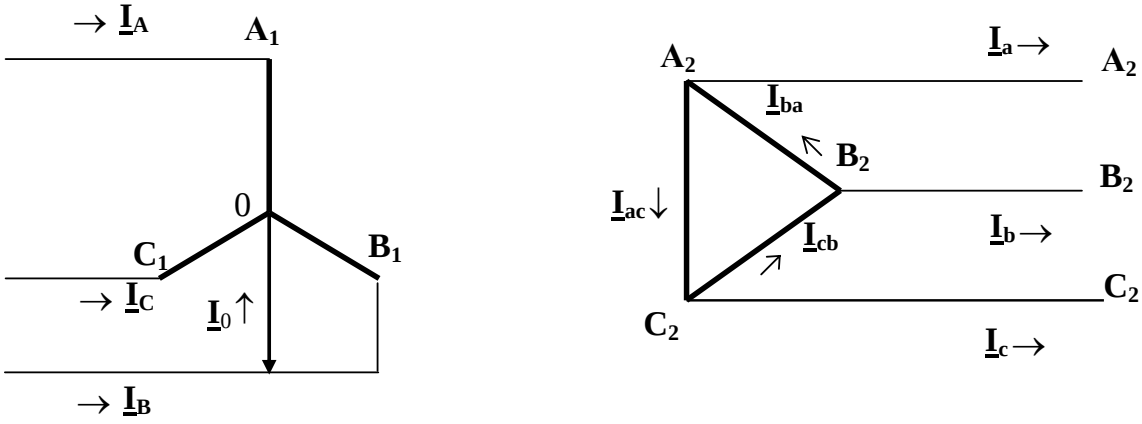


Рис. 1.3. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ-11

Аналогично могут быть найдены напряжения за рассматриваемым трансформатором. Если $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ – фазные напряжения, со стороны звезды, включающие в себя падения напряжения в самом трансформаторе, то искомые фазы со стороны треугольника будут:

$$\underline{U}_a = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{K};\ \underline{U}_b = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_C}{K};\ \underline{U}_c = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_A}{K}; \quad (1.3)$$

или при выражении напряжений через симметричные составляющие, например, для напряжения $\underline{U}_{a2}$, будем иметь:

$$\underline{U}_{a2} = (\underline{U}_{A1}e^{j30^\circ} + \underline{U}_{A2}e^{-j30^\circ})\frac{1}{K}. \quad (1.4)$$

Из выражения (1.4) следует, что напряжения на стороне треугольника не зависят от напряжения нулевой последовательности на стороне звезды.

Структура выражений (1.2) и (1.4) показывает, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе Y/Δ-11, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30º в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности на 30º в противоположном направлении (рис. 1.4). Отсюда вытекает простое и удобное для практики правило: **при переходе через трансформатор с соединением Y/Δ достаточно только у вектора обратной последовательности изменить знак на противоположный**.

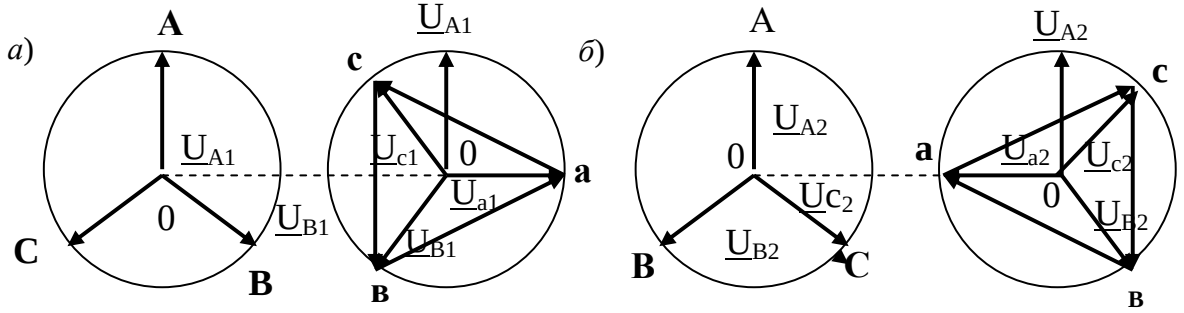
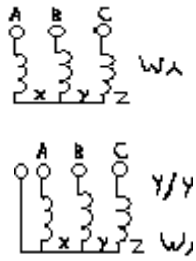
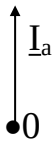
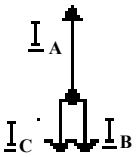
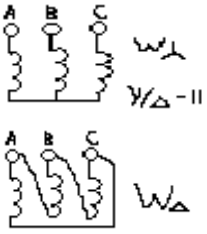
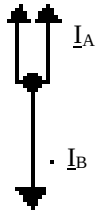


Рис. 1.4. Сдвиг векторов напряжений прямой (а) и обратной (б) последовательности для трансформатора с соединением обмоток Y/Δ-11

Таблица 1.1

Схема соединений обмоток	Вид КЗ	Ток КЗ на вторичной стороне при $U_1/U_2=1$			
		В месте КЗ		На первичной стороне	
	a-0		$I_a = \frac{3U\phi}{Z_T^{(1)}}$		$I_A = 2/3I_a$ $I_B = I_C = 1/3I_a$
	b-c		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2}I^{(3)}$		$I_B = I_C = \frac{\sqrt{3}}{2}I^{(3)} = 0{,}8661^{(3)}$
	b-c		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2}I^{(3)}$		$I_A = I_C = \frac{I_B}{2}$ $I_B = \frac{2}{\sqrt{3}}I_b = I^{(3)}$

Основные соотношения между токами при различных видах КЗ и группах соединения обмоток сведены в табл. 1.1.

Следует подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

3. Рабочее задание

1. Исследовать группу соединений Yo/Yo-12:

1.1. Соединить обмотки трансформатора в группу Yo/Yo-12, предусмотрев в ней необходимые измерительные приборы для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.

1.2. При КЗ трех фаз на вторичной стороне трансформатора записать показания приборов в табл. 1.2 и построить по показаниям приборов векторные диаграммы фазных токов и напряжений на вторичной стороне. Вычислить симметричные составляющие токов и напряжений и, пользуясь методом симметричных составляющих, построить аналогичные диаграммы для первичной стороны трансформатора. (Варианты закорачиваемых фаз заданы в табл. 1.3).

Сравнить полученные результаты с величинами фазных токов и междуфазных напряжений на первичной стороне трансформатора, определенные по табл. 1.1.

1.3. Повторить пункт 1.2 при двухфазном КЗ.

1.4. Повторить пункт 1.2 при однофазном КЗ.

1.5. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

2. Исследовать группу соединений Yo/Δ-11:

2.1. Соединить обмотки трансформатора в группу Yo/Δ-11, предусмотрев в ней необходимые измерительные приборы для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.

2.2. Повторить опыты по пунктам 1.2, 1.3.

Результаты измерений записать в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Измеряемая величина	**Схемы соединения обмоток трансформатора и виды КЗ**				
	Yo / Yo-12			**Yo/Δ-11**	
	$К^{(3)}$	**$К^{(2)}$**	**$К^{(1)}$**	**$К^{(3)}$**	**$К^{(2)}$**
Первичная сторона					
I_A, А					
I_B, А					
I_C, А					
I_0, А					
U_A, В					
U_B, В					
U_C, В					
U_{AB}, В					
U_{BC}, В					
U_{CA}, В					

Продолжение табл. 1.2

Измеряемая величина	**Схемы соединения обмоток трансформатора и виды КЗ**				
	Yo / Yo-12			**Yo/Δ-11**	
	$К^{(3)}$	**$К^{(2)}$**	**$К^{(1)}$**	**$К^{(3)}$**	**$К^{(2)}$**
Вторичная сторона					
I_a, А					
I_b, А					
I_c, А					
U_a, В					
U_b, В					
U_c, В					
U_{ab}, В					
U_{bc}, В					
U_{ca}, В					
I_0, А					

Примечание. Фазы, между которыми осуществляются соответствующие виды КЗ, для каждой бригады студентов задаются табл. 1.3.

4. Контрольные вопросы

1. От чего зависит угол сдвига между первичными и вторичными линейными напряжениями трехфазных трансформаторов?
2. Область применения соединения обмоток Yo/Δ-11 и Yo / Yo-12?
3. Чему равны токи на стороне треугольника трансформатора с соединением Yo/Δ-11, если фазные токи на стороне звезды в относительных единицах равны $I_a = I_b = I_c =$ (соответствует номеру бригады в Амперах)?

Таблица 1.3

Варианты заданий

№ бригады	Yo / Yo-12		Yo/Δ-11	
	$К^{(2)}$	$К^{(1)}$	$К^{(2)}$	$К^{(1)}$
1	AB	C-O	BC	A-O
2	BC	A-O	CA	A-O
3	CA	A-O	AB	B-O
4	AB	B-O	BC	B-O
5	BC	B-O	CA	B-O
6	CA	B-O	AB	A-O
7	AB	A-O	BC	C-O
8	BC	C-O	CA	C-O
9	CA	C-O	AB	C-O

5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Результаты исследований по пунктам рабочего задания в виде таблиц, векторных диаграмм.
3. Письменный ответ на вопрос 3.

Лабораторная работа № 2

Простые замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

1. Цель работы: изучение простых замыканий на землю, построение векторных диаграмм токов и напряжений при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью.

2. Краткая теория

При замыкании на землю одной из фаз в системе с изолированной нейтралью, т. е. при простом замыкании на землю, путь для тока, протекающего в землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли (рис. 2.1).

Пусть в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока, произошло замыкание на землю фазы А. Распределенные по линии емкости каждой фазы относительно земли условно на рис. 2.1 представлены сосредоточенными емкостями в конце линии. Частичные емкости между фазами для простоты не показаны; при этом отметим, что их влияние на ток замыкания незначительно и им можно пренебречь.

Проследим путь циркуляции тока замыкания на землю. На рис. 2.1 он указан стрелками. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли. При замыкании на землю емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует. Характер векторных диаграмм токов слева и справа от места замыкания показан на рис. 2.1*а*.

В действительности емкостная проводимость линии распределена равномерно по ее длине, поэтому эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности, которая составляет одну треть тока, замыкая на землю, вдоль линии выражается наклонной прямой (рис. 2.1*б*)

Емкостные проводимости элементов электрической системы значительно превышают их активные проводимости, что позволяет при определении тока простого замыкания на землю пренебречь активными проводимостями.

Следовательно, можно считать, что величина тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой сети. Кроме того, т. к. ток замыкания на землю мал, то при его определении можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным. При этих допущениях, ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением Rд будет:

$$\underline{I}к = 3\frac{\underline{U}ф.ср.}{3\,Rд - jXc}, \qquad (2.1)$$

где Хсас – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания; $\underline{U}ф.ср$ – среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю.

а)

б)

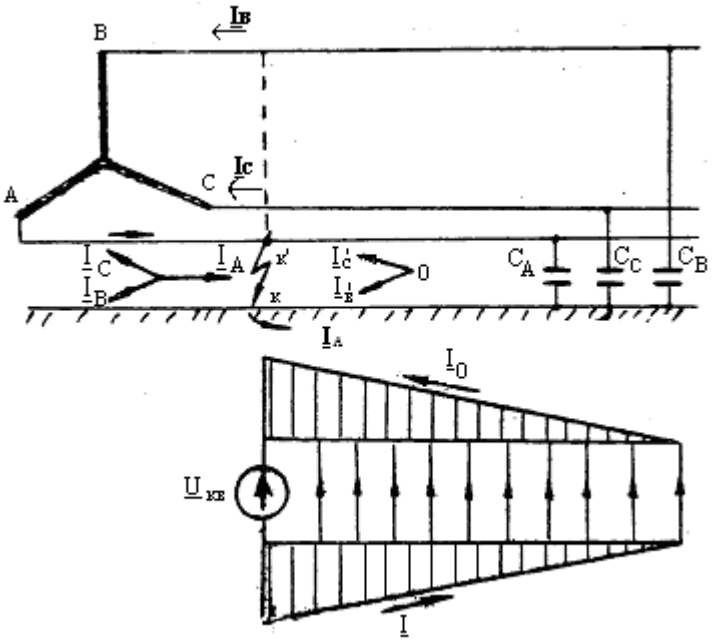


Рис. 2.1. Простое замыкание на землю: а – принципиальная схема; б – эпюра
пространственного распределения тока нулевой последовательности

Наибольшая величина тока замыкания на землю имеет место при металлическом замыкании (Rд = 0) и составляет:

$$\underline{I}к = 3\frac{\underline{U}ф.ср.}{jXcac}, \qquad (2.2)$$

т. е. ток в три раза превышает емкостной ток одной фазы в нормальных условиях.
Для грубой оценки тока замыкания на землю служит импирическая формула:

$$Iк = \frac{\sqrt{3}\cdot\underline{U}ср.}{N}\cdot L,\ A, \qquad (2.3)$$

где $\underline{U}ср.$ – среднее номинальное напряжение ступени, где рассматривается замыкание на землю, кВ; N – коэффициент, принимаемый для воздушных линий 350, для кабельных – 10; L – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км.

Для симметричных составляющих напряжений имеем:
– для прямой последовательности

$$\underline{U}к'a1 = \underline{U}ф.ср.; \qquad (2.4)$$

– для обратной последовательности

$$\underline{U}к'a2 = 0; \qquad (2.5)$$

– для нулевой последовательности

$$\underline{U}\alpha'0 = \frac{jXcac}{3R_d - jXcac}Uф.ср. \qquad (2.6)$$

На рис. 2.2 приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю фазы А. Они построены при указанных допущениях. С изменением сопротивления дуги Rд концы векторов

токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей. Значения линейных напряжений остаются без изменений и лишь перемещаются параллельно самим себе. Неизменность линейных напряжений обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при простом замыкании на землю. С уменьшением сопротивления дуги напряжение поврежденной фазы стремится к нулю, а напряжение "здоровых" фаз – к линейным напряжениям.

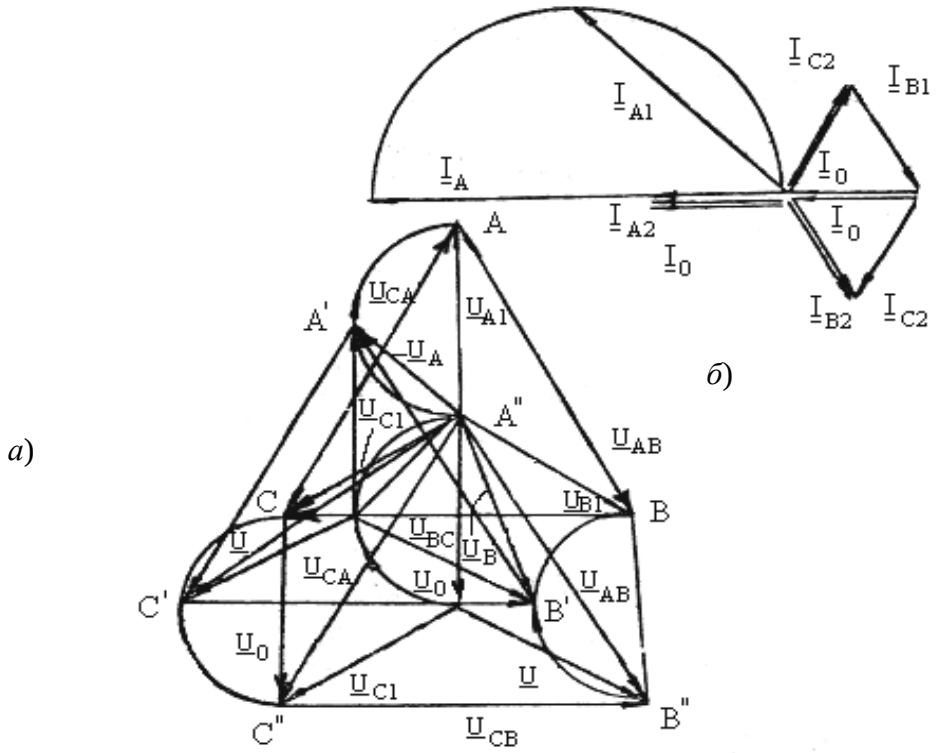


Рис. 2.2. Векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю

Для ограничения тока простого замыкания целесообразно нейтраль трансформатора замкнуть через индуктивную катушку. Индуктивность такой катушки выбирается так, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью. Это приведет к $Xoc = \infty$, т. е. к полной компенсации тока простого замыкания на землю.

3. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему нормального режима в соответствии с вариантом задания (табл. 2.1).Таблица 2.1

Варианты заданий

№ бригады	Количество секций ЛЭП	Фаза, замкнутая на землю	ЛЭП	Положение реостата КЗ
1	1	A	Воздушная	1
2	2	B	Кабельная	2
3	1	C	Воздушная	3
4	2	A	Кабельная	4
5	1	B	Воздушная	5
6	2	C	Кабельная	6
7	1	A	Воздушная	4
8	2	B	Кабельная	2
9	1	C	Воздушная	5

2. Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали U_N нормального режима холостого хода ЛЭП. Результаты измерений занести в табл. 2.2.
3. По данным измерений в масштабе построить векторную диаграмму напряжений нормального режима.

4. Собрать схему рис. 2.3*а* с замыканием на землю фазы в соответствии с вариантом задания (табл. 2.1).

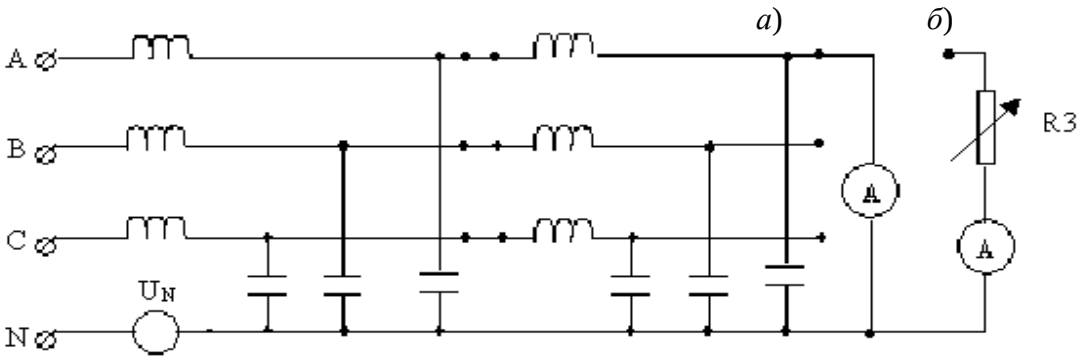


Рис. 2.3. Схема замыкания фазы на землю: а – металлическое замыкание
на землю; б – замыкание через сопротивление R3

5. Измерить линейные и фазные напряжения, напряжение смещения нейтрали U_N, ток замыкания на землю Iз. Результаты измерений внести в табл. 2.2.
6. По данным измерений в том же масштабе на векторной диаграмме, полученной в п. 3, построить векторную диаграмму напряжений режима замыкания на землю фазы из табл. 2.1.
7. По измеренному значению тока $I_З$, используя метод симметричных составляющих, построить в масштабе векторную диаграмму токов.
8. По измеренной величине тока $I_З$ определить длину воздушной (кабельной) линии по выражению (2.3) в соответствии с вариантом задания.

Таблица 2.2

Результаты измерений

Режим	**Нормальный режим**	**Режим металлического замыкания фазы на землю**	**Режим замыкания фазы на землю через сопротивление R3**
U_{AB}, В			
U_{BC}, В			
U_{CA}, В			
U_A, В			
U_B, В			
U_C, В			
U_N, В			
IЗ, А			

9. Для заданной фазы произвести замыкание на землю через сопротивление R3 (рис. 2.3*б*). Величина сопротивления R3 должна соответствовать варианту задания (табл. 2.1). Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали. Результаты измерений занести в табл. 2.2.
10. Построить векторную диаграмму напряжений при замыкании на землю через сопротивление R3 на чертеже п. 3.

4. Контрольные вопросы

1. Сети какого напряжения работают с изолированной нейтралью?
2. Как изменяются линейные и фазные напряжения при замыкании фазы на землю в сети с изолированной нейтралью?
3. От каких факторов зависит величина тока замыкания на землю?
4. Каковы пути циркуляции тока простого замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью справа и слева от точки повреждения, если замыкание произошло в середине линии?
5. Чему равно напряжение смещения нейтрали, если на землю замкнута фаза С?

6. Чему равно напряжение нейтрали системы при простом замыкании на землю через активное сопротивление дуги, равное результирующему емкостному сопротивлению нулевой последовательности, при условии, что всеми остальными сопротивлениями системы можно пренебречь?

5.Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Результаты измерений токов, напряжений для построения векторных диаграмм (табл. 2.2).
3. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные на миллиметровой бумаге в масштабе.
4. Письменный ответ на вопрос 6.

Лабораторная работа № 3

Двухфазное короткое замыкание

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

1. Цель работы: изучение теории симметричных составляющих и применение ее к анализу двухфазного КЗ.

2. Краткая теория

2.1. Общие замечания

Расчеты КЗ трехфазных симметричных схем производятся на одну фазу вследствие подобия явлений, происходящих в каждой из фаз и равенства значений одноименных величин.

При несимметрии в произвольной точке сопротивления в фазах неодинаковы и по этим причинам явления по фазам различны. Неодинаковы в этом случае величины токов, напряжений и углы сдвига между ними в различных фазах. Для определения токов и напряжений в любой фазе несимметричной системы необходимо составить трехфазную схему замещения и написать необходимое число уравнений, что усложняет решение задачи.

Сравнительно просто расчеты несимметричных режимов в трехфазных симметричных сетях осуществляются с помощью метода симметричных составляющих. Вычисление токов и напряжений в этом случае сводится к вычислению этих величин при некотором фиктивном трехфазном КЗ (табл. 5.1), что представляет возможность вновь воспользоваться однолинейной схемой замещения и вести расчет на одну фазу. В этом состоит одно из основных достоинств метода симметричных составляющих.

2.2. Основные соотношения метода симметричных составляющих

Произвольную несимметричную систему трех векторов $\underline{A}$; $\underline{B}$; $\underline{C}$ можно разложить однозначно на три симметричные системы:

– систему векторов прямой последовательности $\underline{A}_1$; $\underline{B}_1$; $\underline{C}_1$;

– систему векторов обратной последовательности $\underline{A}_2$; $\underline{B}_2$; $\underline{C}_2$;

– систему векторов нулевой последовательности $\underline{A}_0$; $\underline{B}_0$; $\underline{C}_0$.

Согласно условию разложения имеем:

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0 ; \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0 ; \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0 . \end{aligned} \qquad (3.1)$$

Введение специального оператора “а” позволяет любой вектор каждой симметричной трехфазной системы выразить через один вектор той же системы.

Если принять в качестве основной фазу А, то систему (3.1) при помощи оператора а можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= a^2 \cdot \underline{A}_1 + a \cdot \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{C} &= a \cdot \underline{A}_1 + a^2 \cdot \underline{A}_2 + \underline{A}_0. \end{aligned} \qquad (3.2)$$

Совместное решение уравнений (3.2) дает:

$$\begin{cases} \underline{A}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}). \end{cases} \qquad (3.3)$$

На рис. 3.1 показан пример разложения несимметричной системы на симметричные составляющие. Системы прямой и обратной последовательности являются симметричными и уравновешенными, а система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной. Система нулевой последовательности может существовать только в неуравновешенных системах, которые характеризуются следующими условиями:

$$\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} \neq 0. \qquad (3.4)$$

Геометрическая сумма неуравновешенной системы фазных токов равна утроенному току нулевой последовательности, который протекает в земле или в нулевом проводе.

На основании принципа независимости действия симметричных составляющих, который состоит в том, что в симметричной трехфазной системе напряжение любой последовательности может вызвать только токи одноименной последовательности.

В соответствии с вышеизложенным, для произвольного несимметричного КЗ основные уравнения второго закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности будут иметь вид:

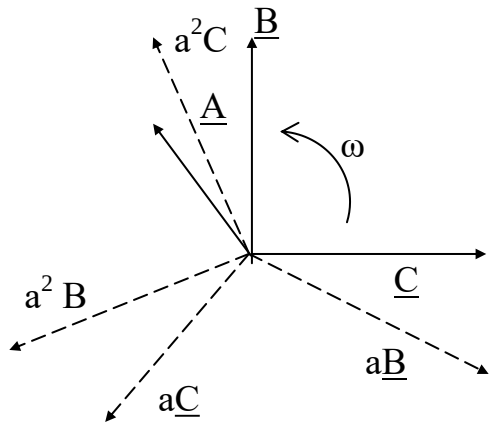
$$\begin{aligned} \underline{U}_{K1} &= \underline{E}_C - Z_1 c \underline{I}_{K1}; \\ \underline{U}_{K2} &= 0 - Z_2 c \underline{I}_{K2}; \qquad (3.5) \\ \underline{U}_{K0} &= 0 - Z_{0c} \underline{I}_{K0}, \end{aligned}$$

где $\underline{U}_{к1}$, $\underline{U}_{к2}$,.$\underline{U}_{к0}$, $\underline{I}_{к1}$, $\underline{I}_{к2}$, $\underline{I}_{к0}$ – симметричные составляющие напряжений и токов; $\underline{E}_c$ – результирующая ЭДС; Z_{1c}, Z_{2c}, Z_{0c} – результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

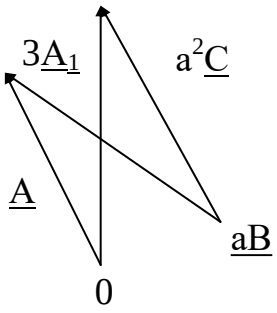
Уравнения (3.5) содержат шесть неизвестных величин: три составляющих напряжения и три составляющих тока. Недостающие уравнения для определения этих величин получают из граничных условий, которыми характеризуются тот или иной вид несимметричного КЗ.

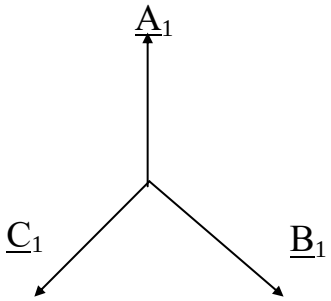
Протекающие по обмоткам статора генератора токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, создают магнитные потоки тех же последовательностей, а последние наводят в статоре соответствующие ЭДС. Вводить эти ЭДС нецелесообразно, т. к. они пропорциональны токам отдельных последовательностей, значения которых еще подлежат определению. Поэтому в расчет вводим в дальнейшем только те ЭДС, которые известны или не зависят от внешних условий цепи статора, причем в силу симметричного выполнения статорной обмотки эти ЭДС являются только ЭДС прямой последовательности. Что касается ЭДС, обусловленных реакцией токов отдельных последовательностей, то их учитываем в виде падений напряжений с обратным знаком в соответствующих реактивных сопротивлениях машины.

Исходная система

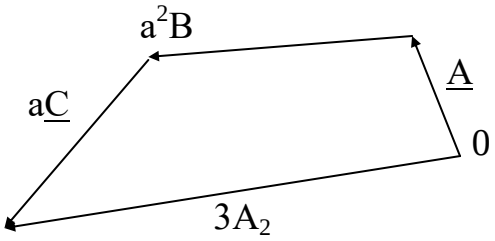


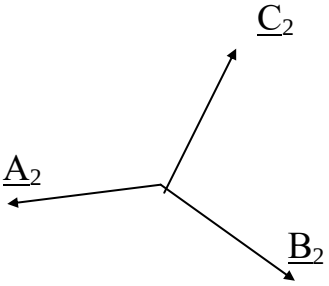
Прямая последовательность $3\underline{A}_1 = \underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}$.



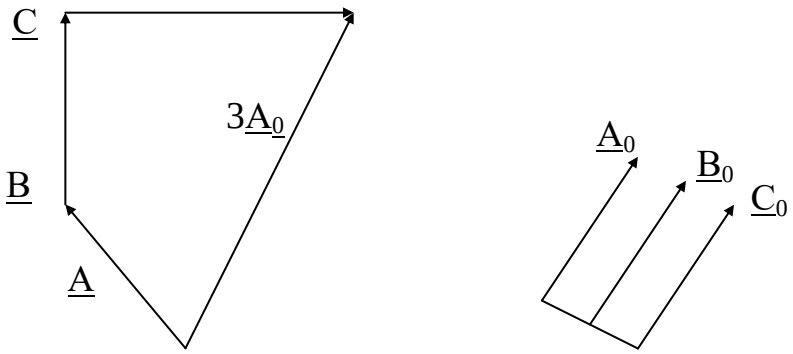


Обратная последовательность $3\underline{A}_2 = \underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C}$.





Нулевая последовательность $3\underline{A}_2 = \underline{A} + \underline{B} + \underline{C}$.



Проверка: $\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0$.

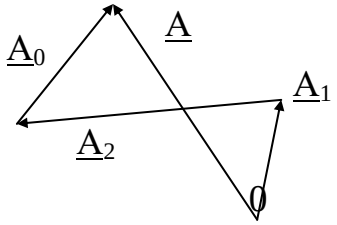


Рис. 3.1. Разложение несимметричной системы трех векторов на симметричные составляющие

2.3. Двухфазное короткое замыкание

При КЗ фаз В и С граничные условия будут для точки К (рис. 3.2*а*):

$$\underline{I}_{KA} = 0; \qquad (3.6)$$

$$\underline{I}_{KC} + \underline{I}_{KB} = 0; \qquad (3.7)$$

$$\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC}. \qquad (3.8)$$

Поскольку ток через землю отсутствует, то $\underline{I}_{KO} = 0.$ Следовательно (3.6) можно переписать

$$\underline{I}_{KA} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} = 0.$$

Откуда

$$\underline{I}_{KA1} = -\underline{I}_{KA2}. \qquad (3.9)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ выразим через ток прямой последовательности:

$$\underline{I}_{KB} = a^2\underline{I}_{KA1} + a\ \underline{I}_{KA2} = (a^2 + a\ )\underline{I}_{KA1} = -j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}; \qquad (3.10)$$

и согласно (3.7): $\underline{I}_{KC} = j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}$.

Выразим $\underline{U}_{KB}$ и $\underline{U}_{KC}$ через симметричные составляющие напряжения фазы А с учетом (3.8):

$$a^2\underline{U}_{KA1} + a\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} - a\underline{U}_{KA1} - a^2\underline{U}_{KA2} - \underline{U}_{K0} = 0;$$

$$(\underline{U}_{KA1} - \underline{U}_{KA2})(a^2 - a\ ) = 0, \text{ откуда}$$

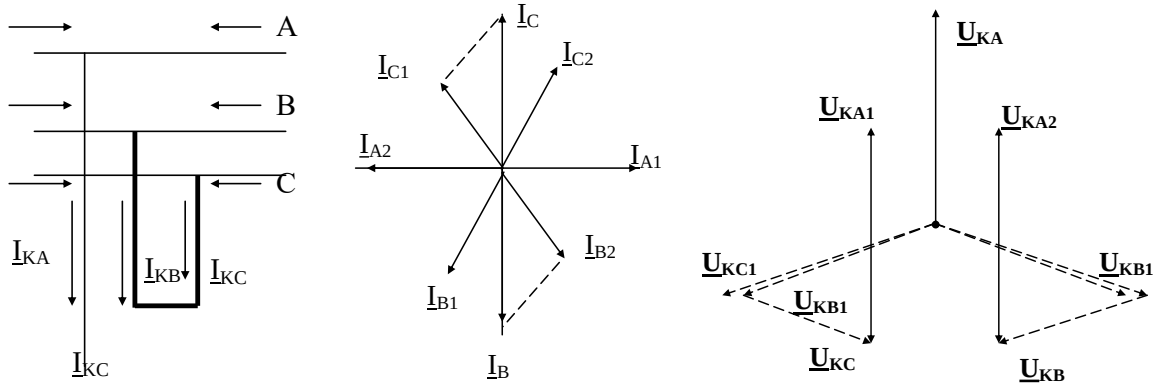
$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2}. \qquad (3.11)$$

Фазные напряжения в месте КЗ:

$$\underline{U}_{KA} = \underline{U}_{KA1} + \underline{U}_{KA2} = 2\underline{U}_{KA1}; \qquad (3.12)$$

$$\underline{U}_{KAB} = \underline{U}_{KC} = a^2\underline{U}_{KA1} + a\ \underline{U}_{KA2} = -\underline{U}_{KA1} = -\frac{\underline{U}_{KA}}{2}. \qquad (3.13)$$

Построим векторные диаграммы токов (рис. 3.2*б*) и напряжений (рис. 3.2*в*), используя полученные выражения (3.9) и (3.11).



а*)* б*)* в*)*

Рис. 3.2. Принципиальная схема (а), векторная диаграмма токов (б) и напряжений (в) двухфазного КЗ

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными положениями теории симметричных составляющих и ее применением для анализа двухфазного КЗ.
2. Собрать схему, показанную на рис. 3.3.
3. При двухфазном КЗ ($А_к$–$В_к$ – для нечетных номеров бригад или $А_к$– $С_к$ – для четных номеров бригад) измерить ток в фазах А, В, С. Результаты измерений занести в табл. 3.1.
4. При двухфазном КЗ измерить линейные и фазные напряжения в точках К и Г. Результаты измерений занести в табл. 3.1.
5. По результатам измерений токов вычислить токи прямой и обратной последовательностей. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 3.1.

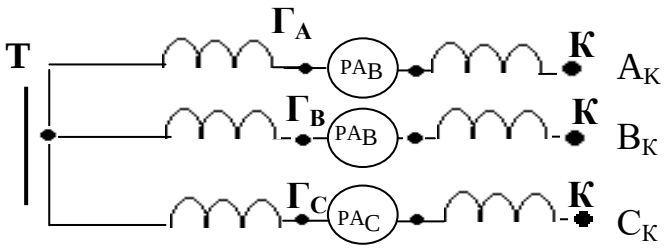


Рис. 3.3. Схема для измерения параметров двухфазного КЗ

6. По результатам измерений напряжений вычислить фазные напряжения прямой и обратной последовательностей в точке К. Результаты вычислений занести в табл. 3.1.
7. В масштабе построить векторную диаграмму токов, используя вычисленные данные п. 5.
8. В масштабе построить векторные диаграммы напряжений по данным вычислений п. 6 для точки К и для точки Г по данным измерений п. 4.
9. Из построенной векторной диаграммы найти линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и занести их значения в табл. 3.1.

4. Контрольные вопросы

1. В каких сетях по режиму работы нейтрали происходят двухфазные КЗ?
2. Какие измерения в сети необходимо произвести для построения векторной диаграммы токов?
3. Какие измерения в сети необходимо произвести для построения векторных диаграмм напряжений?
4. Каковы граничные условия двухфазного КЗ?
5. Поясните физический смысл оператора фазы а.
6. Как разложить графически несимметричную трехфазную систему векторов на симметричные составляющие?
7. Когда в системе электроснабжения появляется нулевая последовательность токов?
8. Когда в системе электроснабжения появляется обратная последовательность токов и напряжений?
9. Может ли работать система электроснабжения при двухфазном КЗ?

5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходная схема с указанием граничных условий двухфазного КЗ.
3. Таблица измеренных и вычисленных величин.
4. Векторные диаграммы тока и напряжений, построенные в масштабе.
5. Выводы из анализа двухфазного КЗ.

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений

	Измеренные величины											
	Фазные токи			**Линейные напряжения**						**Фазные напряжения**		
				Точка К			**Точка Г**					
	Ia, А	**Ib, А**	**Ic, А**	**U ab, В**	**U bc, В**	**U ca, В**	**U AB, В**	**U BC, В**	**U CA, В**	**Ua, В**	**Ub, В**	**Uc, В**
Ak – Bk (нечетн. бриг.)												
Ак – Ск (четн. бриг.)												

Продолжение табл. 3.1

Вычисленные величины					
Токи		**Напряжения**		**Линейные напряжения**	
I_1, А	I_2, А	U_1, В	U_2, В	U_{AB}, В	U_{CA}, В

Лабораторная работа № 4

Однофазное короткое замыкание

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

Задачи при изучении дисциплины:

1. Цель работы: анализ основных соотношений и построение векторных диаграмм при однофазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью с помощью теории симметричных составляющих.

2. Краткие теоретические сведения

Основные уравнения между ЭДС и падениями напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей при однофазном КЗ будут:

$$\underline{U}_{KA1} = E_C - j\underline{I}_{KA1} \cdot X_{1C};$$
$$\underline{U}_{KA2} = 0 - j\underline{I}_{KA2} \cdot X_{2C};$$
$$\underline{U}_{KA0} = 0 - j\underline{I}_{KA0} \cdot X_{0C},$$

где $\underline{U}_{KA1}$, $\underline{U}_{KA2}$, $\underline{U}_{KA0}$, $\underline{I}_{KA1}$, $\underline{I}_{KA2}$, $\underline{I}_{KA0}$ – напряжения и токи отдельных последовательностей; X_{1c}, X_{2c}, X_{0c} – результирующие сопротивления схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.
При КЗ на землю фазы А (рис. 4.1*а*) в сети с глухозаземлённой нейтралью граничными условиями будут:

$$\underline{I}_{KB} = 0; \quad \underline{I}_{KC} = 0; \quad \underline{U}_{KA} = 0. \qquad (4.1)$$

Симметричные составляющие токов в фазе А будут:
а) прямой последовательности:

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{KA} + a^2\underline{I}_{KB} + a\underline{I}_{KC}\right),$$

с учетом граничных условий (4.1):

$$\underline{I}_{KA} = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA};$$

б) обратной последовательности:

$$\underline{I}_{KA2} = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{KA} + a\underline{I}_{KB} + a^2\underline{I}_{KC}\right) = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA};$$

в) нулевой последовательности:

$$\underline{I}_{KA0} = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{KA} + \underline{I}_{KB} + \underline{I}_{KC}\right) = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA}.$$

Таким образом: $\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA0} = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA}.$

Ток в поврежденной фазе (через землю):

$$\underline{I}_{KA} = 3\underline{I}_{KA1}. \qquad (4.2)$$

Напряжение поврежденной фазы А:

$$\underline{U}_{KA} = \underline{U}_{KA1} + \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = 0. \qquad (4.3)$$

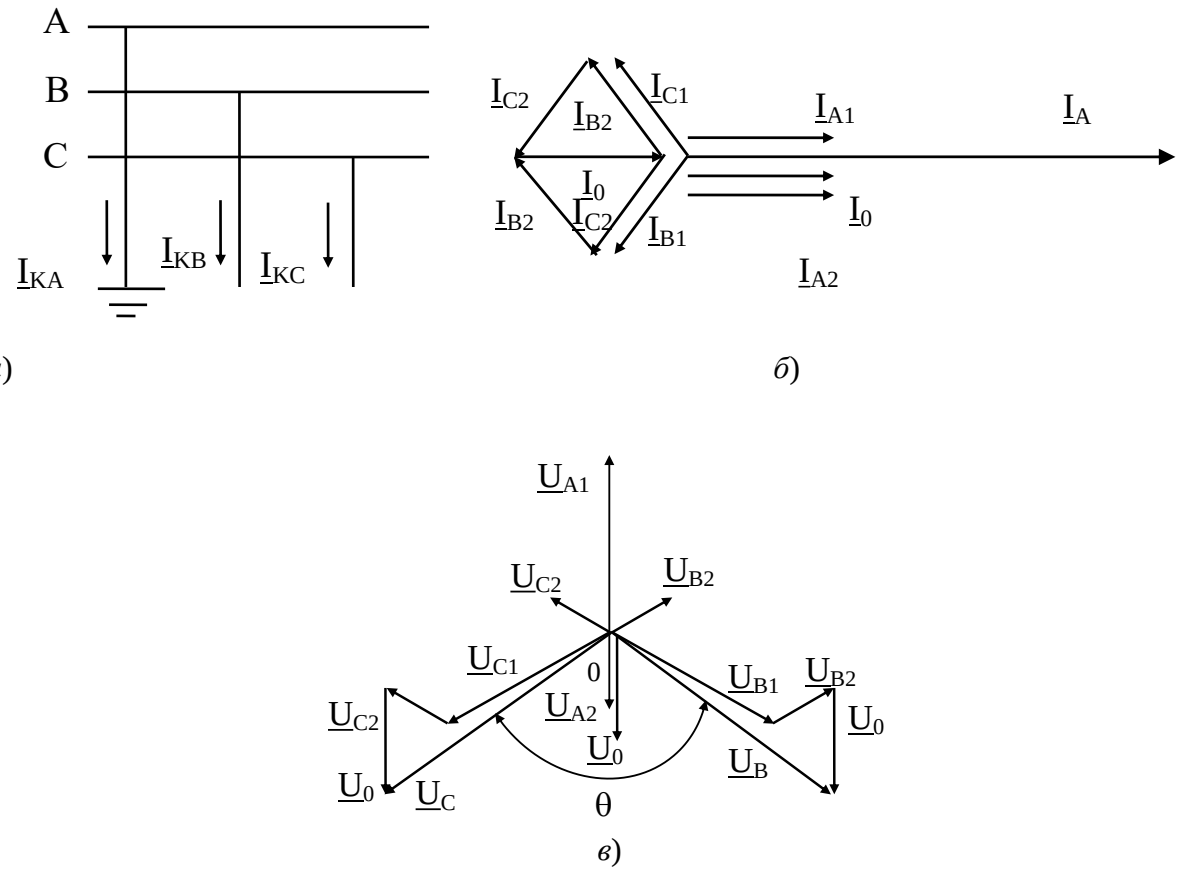


Рис. 4.1. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б), напряжений (в) однофазного КЗ

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания:

$$\underline{U}_{K1} = -(\underline{U}_{KA2} - \underline{U}_{K0}) = -j(X_{0C} + X_{2C})\underline{I}_{KA1};$$
$$\underline{U}_{KA2} = -jX_{2C}\underline{I}_{KA2} = -jX_{2C}\underline{I}_{KA1}; \quad (4.4)$$
$$\underline{U}_{K0} = -jX_{0C}\underline{I}_{K0} = -jX_{0C}\underline{I}_{KA1}.$$

Фазные напряжения в месте короткого замыкания:

$$\underline{U}_{KB} = a^2\underline{U}_{KA1} + a\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = j\left[(a - a^2)X_{2C} + (a^2 - 1)X_{0C}\right]\underline{I}_{KA1} \quad (4.5)$$
$$\underline{U}_{KC} = j\left[(a - a^2)X_{2C} + (a - 1)X_{0C}\right]\underline{I}_{KA1}.$$

На векторной диаграмме напряжений (рис. 4.1) угол Θ между напряжениями неповрежденных фаз зависит от соотношения между X_{2C} и X_{0C} и изменяется в пределах $60^\circ \le \Theta \le 180^\circ$. Нижний предел соответствует $X_{0C} = \infty$, верхний при $X_{0C} = 0$. При $X_{0C} = X_{2C}$ угол Θ равен 120°.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить получение с помощью теории симметричных составляющих основных соотношений между токами и напряжениями и их симметричными составляющими при однофазном КЗ в сети с глухозаземленной нейтралью.
2. Собрать схему испытаний на стенде, приведенную на рис. 4.2. В табл. 4.1 указаны положение ключа П1 режима работы питающей системы для производства измерений и фаза, на которой производится КЗ. (Номер варианта задания соответствует номеру бригады)
3. Включить стенд и произвести измерения токов в фазах. Результаты измерений занести в табл. 4.2.

4. Вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, протекающие в точке КЗ на основании теории симметричных составляющих. Результаты вычислений занести в табл. 4.2.
5. Построить в масштабе векторную диаграмму токов, аналогичную приведенной на рис. 4.1*б*.
6. В схему (рис. 4.2) подключить фильтры напряжений обратной ФНОП и нулевой (ФННП) последовательности. Подключение фильтров показано на рис. 4.2 пунктиром.
7. Включить стенд и измерить в точке КЗ величины фазных и линейных напряжений, а также напряжения U_2 и U_0 на выходе фильтров. Результаты измерений занести в табл. 4.3.
8. В масштабе построить векторную диаграмму напряжений, аналогичную изображенной на рис. 4.1*в*.

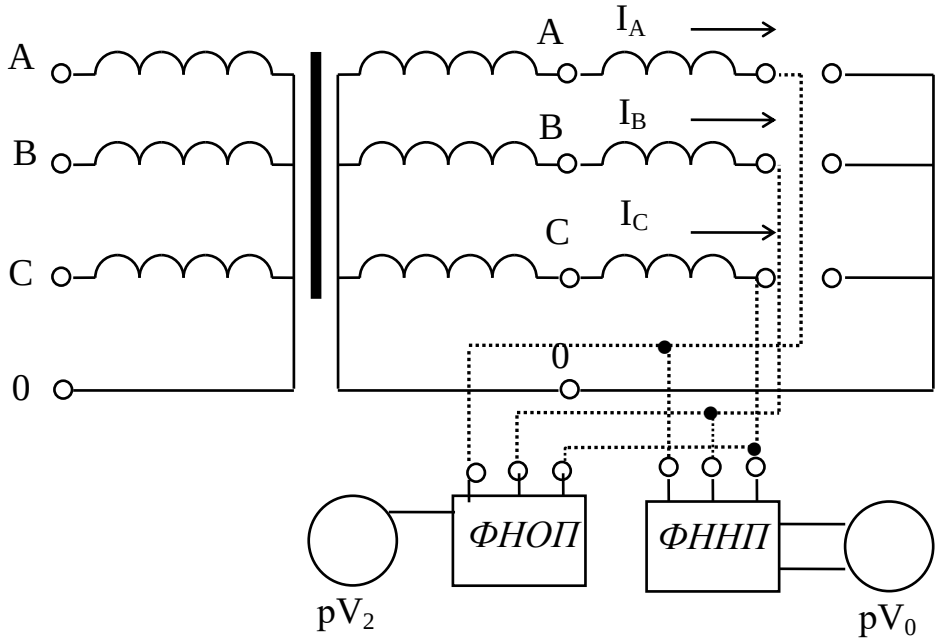


Рис. 4.2. Схема для определения параметров однофазного КЗ

Таблица 4.1

Варианты заданий

№ бригады	Режим системы	КЗ фазы
1	max	A
2	max	B
3	max	C
4	min	A
5	min	B
6	min	C

Таблица 4.2

Результаты измерений и вычислений

КЗ фазы	Измерено			Вычислено		
	I_A, А	I_B, А	I_C, А	I_1, А	I_2, А	I_0, А
				Формула Результат	Формула Результат	Формула Результат

Таблица 4.3

Результаты измерений и вычислений

КЗ фазы	Измеренные величины								Вычислено
	U_A, В	U_B, В	U_C, В	U_{AB}, В	U_{BC}, В	U_{CA}, В	U_2, В	U_0 , В	U_1 , В

4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема и граничные условия однофазного КЗ.
3. Схема для определения параметров однофазного КЗ.
4. Результаты измерений и вычислений в табличной форме.
5. Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные на основе измерений.
6. Выводы из анализа однофазного КЗ.

5. Контрольные вопросы

1. Каковы граничные условия однофазного КЗ?
2. Как вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей?
3. Как вычислить напряжение при однофазном КЗ прямой, обратной и нулевой последовательностей?
4. Как построить векторную диаграмму токов однофазного КЗ?
5. Как построить векторную диаграмму напряжений при однофазном КЗ?

Лабораторная работа № 5

Расчет несимметричных КЗ на модели постоянного тока

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

Задачи при изучении дисциплины:

1. Цель работы: составление комплексных схем замещения для различных видов несимметричных КЗ и сравнение полученных результатов с практическими методами расчетов.

2. Теоретическая часть

2.1. Правило эквивалентности прямой последовательности

Обращаясь к приведенным в табл. 5.1 выражениям для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ, замечаем, что токи обратной и нулевой последовательности и напряжения всех последовательностей в месте КЗ зависят от тока прямой последовательности. Следовательно, задача расчета несимметричного КЗ состоит в определении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

Таблица 5.1

Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметричных КЗ

Определяемые величины и их обозначение	При видах КЗ		
	двухфазном	однофазном	двухфазном на землю

Ток прямой последовательности $\underline{I}_{A1}$	$\frac{\underline{E}_{Ac}}{j\cdot(x_{1c} \quad x_{2c})}$	$\frac{\underline{E}_{Ac}}{j\cdot(x_{1c}+x_{2c}+x_{0c})}$	$\frac{\underline{E}_{Ac}}{j\cdot(x_{1c}+x_{2c}+x_{0c})}$
Ток обратной последовательности $\underline{I}_{A2}$	$-\underline{I}_{A1}$	$\underline{I}_{A1}$	$-\frac{x_{0c}}{j\cdot(x_{2c}+x_{0c})}\cdot\underline{I}_{A1}$
Ток нулевой последовательности $\underline{I}_{0}$	0	$\underline{I}_{A1}$	$-\frac{x_{2c}}{j\cdot(x_{2c}+x_{0c})}\cdot\underline{I}_{A1}$
Напряжение прямой последовательности $\underline{U}_{A1}$	$jx_{2c}\underline{I}_{A1}$	$j(x_{2c}+x_{0c})\cdot\underline{I}_{A1}$	$j\frac{x_{2c}\cdot x_{0c}}{x_{2c}+x_{0c}}\cdot\underline{I}_{A1}$
Напряжение обратной последовательности $\underline{U}_{A2}$	$jx_{2c}\underline{I}_{A1}$	$-jx_{2c}\underline{I}_{A1}$	$j\frac{x_{2c}\cdot x_{0c}}{x_{2c}+x_{0c}}\cdot\underline{I}_{A1}$
Напряжение нулевой последовательности $\underline{U}_{0}$	-	$jx_{0c}\underline{I}_{A1}$	$j\frac{x_{2c}\cdot x_{0c}}{x_{2c}+x_{0c}}\cdot\underline{I}_{A1}$

Структура выражений для тока прямой последовательности при различных видах КЗ позволяет ток прямой последовательности особой фазы А (при любом n) несимметричного КЗ выразить в общем виде:

$$\underline{I}_{ка1}^{(n)}\frac{\underline{E}_{Ac}}{j\cdot(x_{1c}+x_{\Delta}^{(n)})}, \qquad (5.1)$$

где $\underline{E}_{Ac}$ – эквивалентная ЭДС фазы А относительно точки КЗ; x_{1c} – результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки КЗ; $x_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, величина которого для каждого вида КЗ определяется соответствующим выражением, приведенным в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Формулы для определения X(n)Δ и коэффициента m(n)

Вид КЗ	**Обозначение типа КЗ**	**Дополнительное сопротивление $X^{(n)}_{\Delta}$**	**Коэффициент $m^{(n)}$**
Трехфазное	(3)	0	1
Двухфазное	(2)	jx_{2c}	$\sqrt{3}$
Однофазное	(1)	$j(x_{2c}+x_{0c})$	3
Двухфазное на землю	(1.1)	$j\frac{x_{2c}\cdot x_{0c}}{x_{2c}+x_{0c}}$	$\sqrt{3}\sqrt{1-\frac{x_{2c}\cdot x_{0c}}{(x_{2c}+x_{0c})^2}}$

Поскольку фазные токи в месте КЗ также пропорциональны току прямой последовательности, модуль фазного тока в месте любого (n) несимметричного КЗ в общем виде можно представить как:

$$I_{к}^{(n)}=m^{(n)}\cdot I_{к}^{n}, \qquad (5.2)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, определяемый из табл. 5.2.

Обобщенная запись выражения (5.2) позволила Н.Н. Щедрину впервые сформулировать следующее положение, которое называется правилом эквивалентности прямой последовательности.

Ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $X_{\Delta}^{(n)}$, которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ определяется результирующими сопротивлениями обратной последовательности X_{2c} и нулевой последовательности X_{0c} относительно рассматриваемой точки схемы.

Правило эквивалентности прямой последовательности используем в данной работе для расчета аналитическим способом величин токов и напряжений в месте повреждения при несимметричных КЗ и при исследовании несимметричных КЗ на модели постоянного тока. При этом необходимо помнить, что при выполнении данной работы схемы отдельных последовательностей состоят из чисто реактивных сопротивлений.

2.2. Аналитический метод расчета переходного процесса при однократной поперечной несимметрии

Приведем алгоритм расчета токов КЗ при однократной поперечной несимметрии, используя правило эквивалентности прямой последовательности. Расчет ведем в относительных единицах.

1. Составляем расчетную схему, выписывая из паспортов и каталогов данные об элементах СЭС, входящих в нее. Предварительно задаемся видом КЗ, который необходим для определения $X_{\Delta}^{(n)}$.
2. Выбираем базисные условия. За базисную мощность S при одном источнике питания принимаем мощность, равную 1000 МВ·А. За базисное напряжение $U_б$ принимаем среднее номинальное напряжения $U_{срн}$ той ступени напряжения, на которой возникла та или иная несимметрия. Значения среднего номинального напряжения для данной работы используются 115 или 230 кВ.
3. Составляем схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от применяемого метода и момента времени в нее входят генераторы и нагрузки с соответствующими реактивными сопротивлениями и ЭДС. Все остальные элементы входят в схему неизменными сопротивлениями.

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей принимают равными нулю, а реактивности обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от вида возникшей несимметрии, а также от продолжительности переходного процесса.

Началом схемы прямой или обратной последовательностей считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Это – точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности. Концом схем прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла несимметрия.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. При поперечной несимметрии это напряжение прикладывается относительно земли (рис. 5.1). Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом – точку, где возникла несимметрия.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора и т. д. должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через это сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трех фаз.

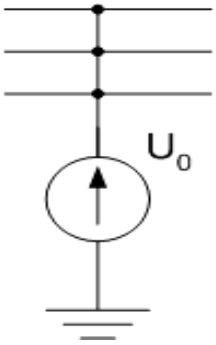


Рис. 5.1. Включение источника напряжения нулевой последовательности

4. Определяем результирующие сопротивления схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла та или иная несимметрия. На этом же этапе для схемы прямой последовательности находим результирующую ЭДС относительно той же точки.

При поперечной несимметрии на расчетной схеме (рис. 5.2*а*) проследим, как составляется схема замещения каждой последовательности. Все элементы этой схемы пронумерованы и их номера сохранены для обозначения соответствующих элементов в схемах замещения отдельных последовательностей.

При несимметрии в точке М схема замещения прямой последовательности имеет вид, представленный на рис. 5.2*б*.

Последовательно соединенные в ней элементы 1 и 2, а также 5 и 6, обозначены, соответственно, 8 и 9. Для упрощения схемы достаточно заменить ветвь 9 с ЭДС $E_н \neq 0$ и ветвь, получаемую сложением элемента 8 с параллельно соединенными элементами 3 и 4 и имеющую ЭДС Е одной эквивалентной (рис. 5.2*в*). Схема обратной последовательности и ее преобразования аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников. Схему нулевой последовательности (рис. 5.2*г*) также преобразовываем путем последовательного и параллельного сложения ветвей.

5. По сопротивлению обратной и нулевой последовательностей определяем дополнительное сопротивление $X_Δ^{(n)}$ и удаляем действительную точку КЗ за сопротивление $X_Δ^{(n)}$, что позволяет по выражению (5.1) определить ток прямой последовательности $X^{(n)}_{ka1}$.

6. Фазный ток в месте любого (n) несимметричного КЗ определяем по выражению (5.2), умножив на базисный ток, определенный по выражению:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_б}. \qquad (5.3)$$

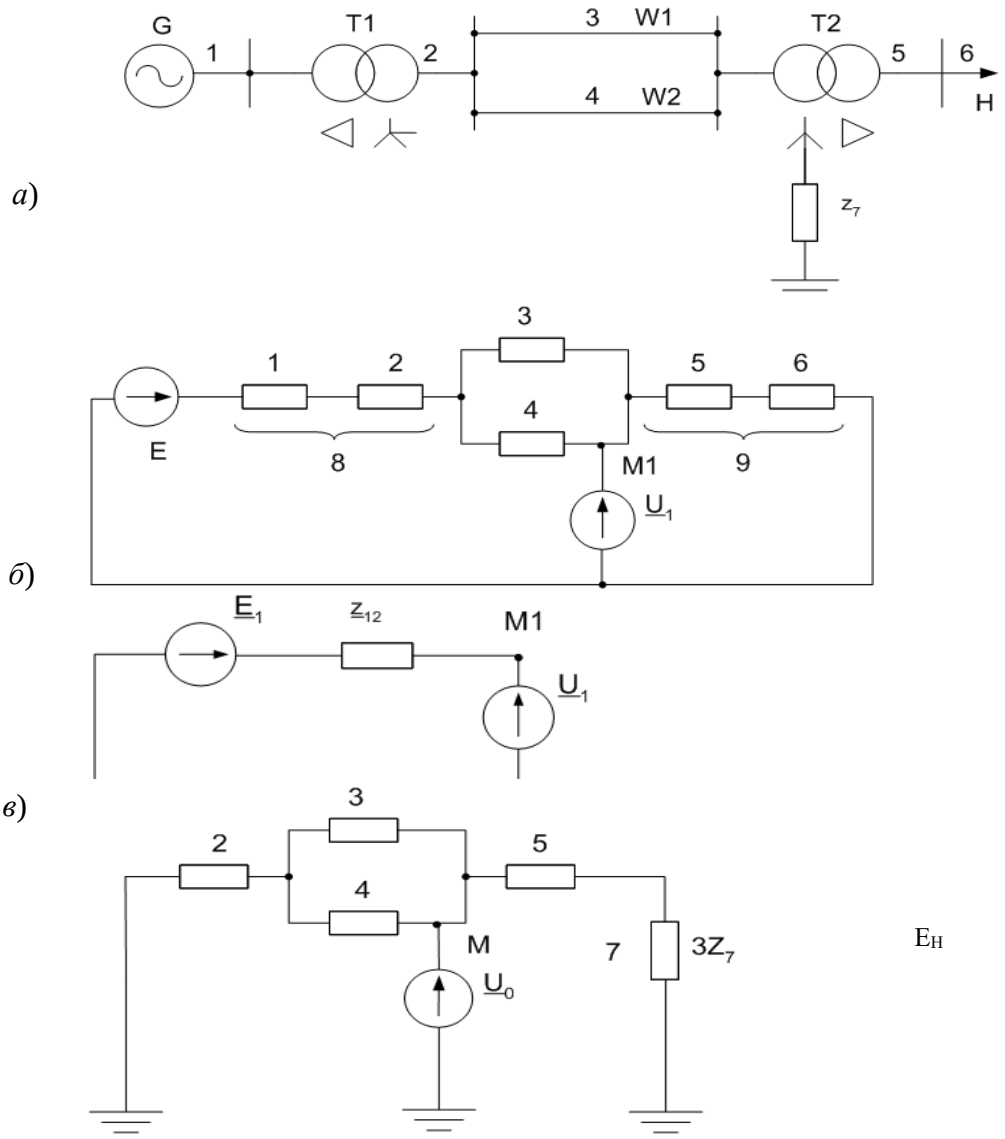


Рис. 5.2. Расчетная схема (а), схема замещения прямой последовательности (б), преобразованная схема замещения прямой последовательности (в), схема замещения нулевой последовательности (г)

2.3. Исследование несимметричных КЗ на модели постоянного тока

Установленные соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте КЗ (табл. 5.1) позволяют для каждого вида несимметричного КЗ соединить вместе схемы отдельных последовательностей и образовать тем самым комплексную схему замещения для соответствующего вида КЗ.

Такие схемы приведены на рис. 5.3. Схемы каждой последовательности характеризуются в общем случае соответствующими полными сопротивлениями (Z_1, Z_2, Z_0). Они соответствуют фазе А. Нетрудно убедиться, что в них соблюдаются не только соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте КЗ, но также соотношения между симметричными составляющими токов в месте КЗ.

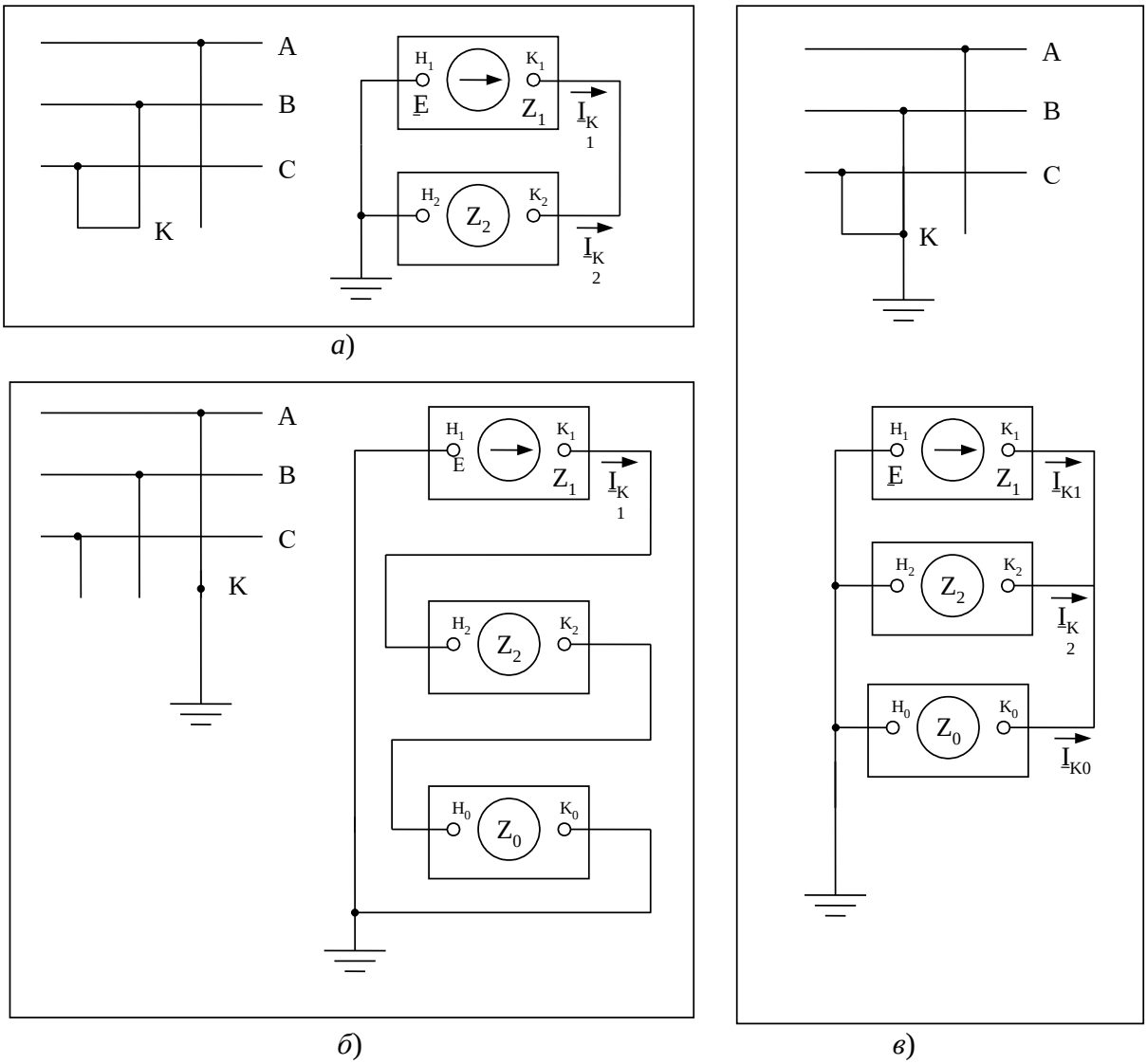


Рис. 5.3. Комплексные схемы замещения: а – для двухфазного КЗ;
б – для однофазного КЗ; в – для двухфазного КЗ на землю

Нужно иметь в виду, что в комплексной схеме для однофазного КЗ (рис. 5.3*б*) обеспечиваются значения прямой последовательности в различных точках. Что касается напряжений обратной и нулевой последовательностей, то они должны определяться относительно точек нулевого потенциала схем одноименных последовательностей, т. е. соответственно по отношению к точкам H_2 и H_0, которые являются началами схем этих последовательностей.

Комплексная схема для двухфазного КЗ на землю при $Zo = \infty$ переходит в комплексную для обычного двухфазного замыкания.

Схема прямой последовательности обычно содержит много источников, в то время как в схемах рис. 5.3 условно показана лишь одна результирующая ЭДС.

Комплексные схемы особенно удобны при использовании расчетных моделей и установок, поскольку в этом случае можно измерить приборами токи и напряжения отдельных последовательностей в любой точке и любого участка рассчитываемой системы.

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд, мнемоническая схема которого представлена на рис. 5.4, представляет собой однолинейную модель электрической системы, выполненную на постоянном токе и состоящую из генератора, двух параллельных линий электропередачи, автотрансформатора, системы бесконечной мощности, нагрузки. Элементы электрической системы, представленные на мнемонической схеме, характеризуются данными, приведенными в табл. 5.3. Реактор служит для заземления нейтрали трансформатора.

Сопротивления схем замещения отдельных последовательностей выражены в именованных единицах и приведены к среднему номинальному напряжению линии электропередачи (варианты заданий приведены в табл. 1.3). Все эти сопротивления представлены с помощью резисторов, смонтированных на обратной стороне

стенда. Концы резисторов соединены с соответствующими зажимами схем замещения. Схемы отдельных последовательностей (для условий, определяемых заданием) могут быть собраны с помощью соединительных проводов. Комплексные схемы замещения для определенного вида КЗ собирают путем соединения схем отдельных последовательностей.

В схеме нулевой последовательности предусмотрен реактор, с помощью которого можно представить требуемый режим заземления нейтрали трансформатора. Нейтраль трансформатора может быть, согласно заданию, как заземлена наглухо или через некоторое сопротивление, так и разземлена.

Для контроля ЭДС генератора, нагрузки и напряжения системы служит два вольтметра, расположенные в верхней части лабораторного стенда.

Таблица 5.3

Вариант				
№ бригады	Длина ЛЭП, км	Точка КЗ, Напряжение, кВ	Генератор	Трансформатор
			Тип	X_*
1	2	3	4	5
1 2 3	100 100 100	$К_{1,\ 115}$ $К_{2,\ 230}$ $К_{3,\ 115}$	ТВ $S_Н$ = 125 МВА Cosφ = 0,8 $U_н$ = 10,5кВ	$X''d_k$ = 0,19 X_{2*}= 0,22
4 5 6 7 8 9	25 100 25 100 25 100	$К_{1,\ 115}$ $К_{1,\ 230}$ $К_{2,\ 115}$ $К_{2,\ 230}$ $К_{3,\ 115}$ $К_{3,\ 230}$	-	-

Продолжение таблицы 5.3

Параметры элементав электрической системы									
		ЛЭП	Автотрансформатор				Нагрузка	Система	Реактор
Тип	U_k, %	X, Ом/км	Тип	U_k, %			$S_н$', мВА	$X_с$, Ом	$X_р$ %
				В-С	В-Н	С-Н			
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ТДЦ-125 $U_{вн}$ = 115кВ	10,5	0,4							$I_{НР}$ = 1 кА 4,5
-	-		АТДЦТН-125-220/110 $U_{ЗН}$ = 230 кВ $U_{СН}$ = 121 кВ $U_{ИН}$ = 11 кВ	11	31	19	$X_{*н}$ = 0,35; 60	10	

Примечание. После вычисления сопротивлений элементов, входящих в схему замещения и приведения их к ступени КЗ, проверить по рис. 5.4 полученные значения сопротивлений, приняв масштаб сопротивлений равным 0,1.

Поскольку в работе исследование проводится для начального момента переходного процесса КЗ, т. е. для t = 0, то генератор вводится в схему своими сверхпереходными сопротивлениями, а его ЭДС входит только в схему прямой последовательности. Начальная сверхпереходная ЭДС генератора (согласно заданию) определяется в относительных единицах по уравнениям, приведенным в табл. П.5.1, выражается в именованных единицах и приводится к точке КЗ (табл. П.5.2, графа 3).
Нагрузка учитывается только тогда, когда КЗ рассматривается в точке $К_3$. Ввиду того, что у нас имеется два независимых источника питания, а имитировать надо три источника: генератор, нагрузку, систему, то в этом случае составляются комплексные схемы последовательностей для двух частей: левая часть – это генератор и элементы системы, расположенные слева от точки $К_3$; правая часть – система, нагрузка и автотрансформатор, расположенный справа от точки $К_3$.

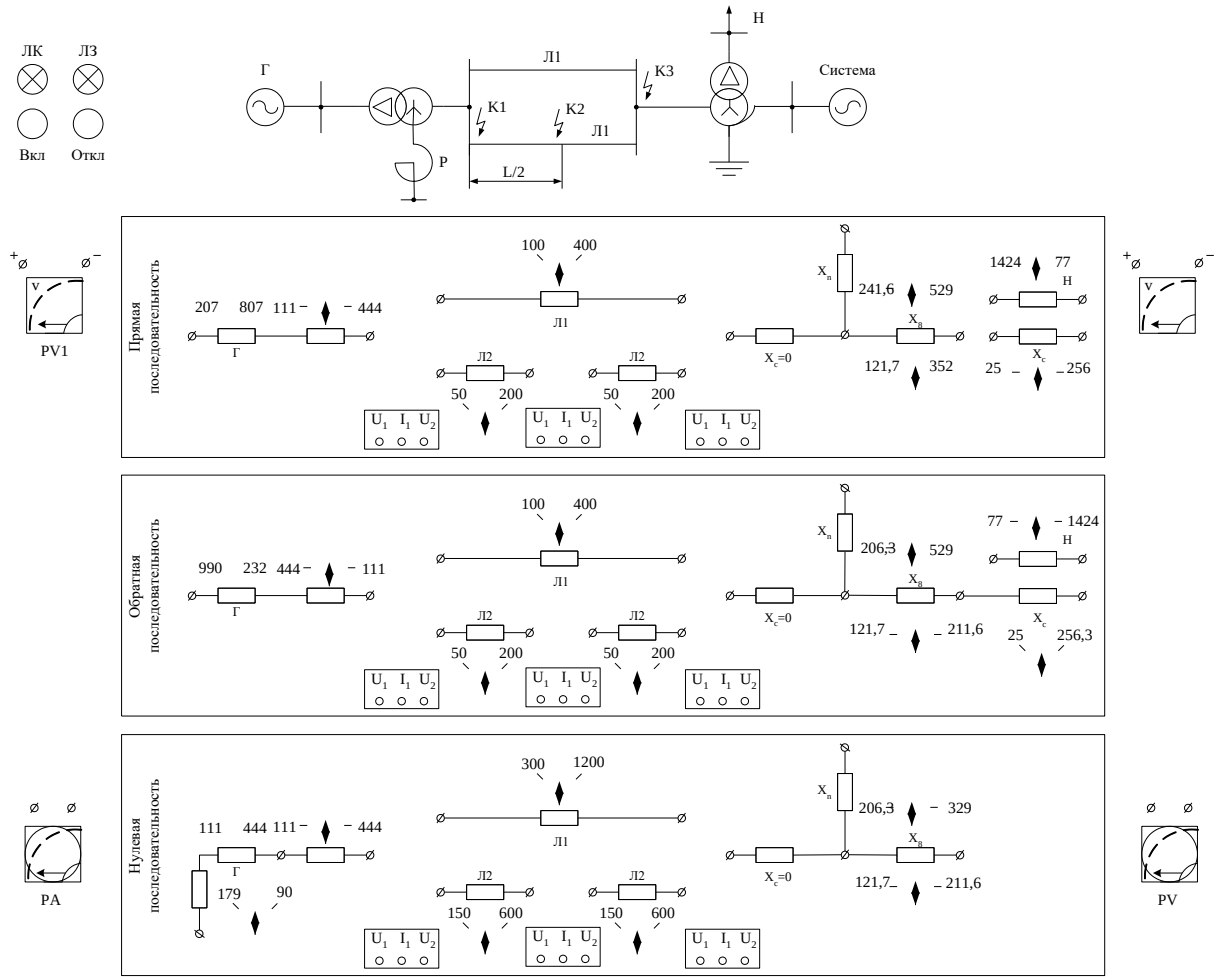


Рис. 5.4. Мнемоническая схема лабораторного стенда

Искомые величины симметричных составляющих токов и напряжений определяются при собранной комплексной схеме, которые выставляются согласно варианта задания с помощью тумблеров, расположенных у каждого элемента схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Измерение тока и напряжения осуществляется с помощью электронных амперметра и вольтметра, подключенных к лабораторному стенду.
Сверхпереходная ЭДС нагрузки и напряжения системы определяется по формулам, приведенным в табл. П.5.1 и П.5.2 и устанавливаются в определенном масштабе, как и сверхпереходная ЭДС генератора.
При сборе комплексных схем надо помнить, что знак (-) источника неизменного тока присоединяется к началу схемы прямой последовательности; (+) – к нулевому потенциалу соответствующей точки комплексной схемы исследуемого вида несимметрии.
Питание стенда осуществляется от сети 220 В через разъем. Включение и отключение стенда осуществляется кнопками «Вкл» и «Откл», расположенными на лицевой стороне стенда.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с целью работы, детально изучить схему, представленную на лабораторном стенде (рис. 5.4), и оборудование для выполнения работы.

2. Ознакомиться с методом симметричных составляющих, правилом эквивалентности прямой последовательности, принципом составления схем замещения при рассмотрении различных видов несимметричных видов КЗ и с характером изменения напряжения всех трех последовательностей вдоль цепи в направлении от места несимметричного КЗ к источникам питания.
3. Согласно варианта задания (табл. 5.3) и алгоритма расчета, изложенного выше, аналитическим путем определить токи и напряжения в месте повреждения при следующих видах несимметрии: $К^{(1)}$; $К^{(2)}$; $К^{(1.1)}$, используя для определения параметров элементов схем замещения формулы, приведенные в табл. П.5.1, и соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений, приведенных в табл. 5.1.
4. Согласно варианта, принятого для расчета в п. 3, выполнить следующее: определить, пользуясь формулами, приведенными в табл. П.5.1 и П.5.2, параметры элементов схем замещения в общем случае для всех последовательностей в именованных единицах, привести их к одной ступени напряжения, т. е. к среднему номинальному напряжению той ступени трансформатора, на которой рассматривается КЗ. Сверить результаты расчетов сопротивлений с величинами сопротивлений элементов, указанных на стенде.
5. Набрать на лабораторном стенде комплексную схему для определенного вида КЗ с сопротивлениями элементов согласно заданию, например, для однофазного на землю. Для этого перед составлением комплексной схемы все сопротивления расчетной схемы замещения должны быть изменены в соответствии с принятым масштабом сопротивлений

$$M_x = \frac{Хссистем}{Хммодел}, \qquad (5.4)$$

который для данной работы принят равным 0,1.
Сверхпереходную ЭДС генератора для установки на модели примем равной величине, лежащей в диапазоне 30…40 В. Тогда масштаб напряжения модели выразится формулой:

$$M_U = \frac{E''_г \cdot 10^3}{\sqrt{3}U_{мод}}, \qquad (5.5)$$

$U_{мод}$ – напряжение модели, которое может быть принято равным любой величине, лежащей в диапазоне 30÷40 В.
Используя масштаб напряжения, полученный по выражению (5.5), определяем напряжение источника, имитирующего сверхпереходную ЭДС нагрузки (при рассмотрении КЗ в точке $К_3$) и напряжения системы, т. е.

$$E''_{н.мод} = \frac{E''_н \cdot 10^3}{\sqrt{3}M_U}; \qquad (5.6)$$

$$U_{U.мод} = \frac{U_e \cdot 10^3}{\sqrt{3}M_U}. \qquad (5.7)$$

Выбранными масштабами сопротивлений и напряжений однозначно определяется масштаб токов

$$M_I = \frac{M_U}{M_X}. \qquad (5.8)$$

При наборе комплексных схем, как и при выполнении п. 3, нейтраль трансформатора принять заземленной наглухо.
6. Измерить симметричные составляющие токов и напряжений каждой последовательности.
7. Используя масштабы M_x и M_I, определить действительные значения симметричных составляющих токов и напряжений каждой последовательности.
8. Собрать комплексные схемы для других видов КЗ, т. е. для $К^{(2)}$, $К^{(1)}$.
9. Выполнить действия, изложенные в пп. 4-7.
10. Сравнить полученные результаты на модели с результатами расчета п. 3 и сделать выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Укажите основные соотношения теории симметричных составляющих при разложении произвольной трехфазной системы на симметричные составляющие.
2. Каковы граничные условия для всех видов КЗ?
3. Какие допущения приняты при изложении правила эквивалентности прямой последовательности?
4. Каков характер изменения напряжения всех трех последовательностей вдоль цепи в направлении от места несимметричного КЗ к источникам питания?
5. Почему сопротивления заземления нейтралей трансформаторов при составлении схем нулевой последовательности утраиваются?
6. С какой целью производят заземление и разземление нейтралей трансформаторов в электрических системах?

6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходная схема электрической системы согласно заданию.
3. Результаты аналитического расчета сверхпереходного режима: для одного из видов КЗ привести полный расчет; для двух других – свести результаты в таблицу.
4. Таблица расчетных параметров элементов схем замещения всех последовательностей в именованных единицах, приведенных к точке КЗ.
5. Численные значения масштабов M_x, M_u, M_I.
6. Комплексные схемы замещения для всех видов несимметрии со значениями параметров схем замещения в соответствии с масштабами M_x и M_u .
7. Таблица значений несимметричных составляющих токов и напряжений, полученных на модели для всех видов КЗ.
8. Выводы.

Приложения

Таблица П.5.1

1. Формулы в относительных единицах для аналитического расчета несимметричных замыканий

Элемент системы	Расчетные параметры	Последовательность			Примечание
		прямая	обратная	нулевая	
Генератор	$E''_г$	$X_т = X_{d*} \cdot S_б / S_н$ $E''_г = U_{*г} +$ $+ \quad I_{нг*} \cdot X''_{d*} \cdot \sin\varphi$	$E''_г = 0$ $X_2 = X_{2г*} \cdot \frac{S_б}{S_н}$	$E''_г = 0$	$U_{г*} = 1$; $I_{нг*} = 1$ X''_{d*}, X_{d*} $\sin\varphi = 0{,}8$
Трансформатор	$X_т$	$X_т = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_н}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$	U_k, %, $S_{н,\ МВА}$
Линия	$X_л$	$X_1 = \ell \cdot S_б / U^2_{ср.н.}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = 3X_1$	X_0, l
Авто-трансформатор	$X_в$ $X_с$ $X_н$	$X_1 = \frac{U_{кв.}\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{нв}}$ $X_1 = \frac{U_{кс.}\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{нс}}$ $X_1 = \frac{U_{кн.}\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{нн}}$	$X_2 = X_1$ $X_2 = X_1$ $X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$ $X_0 = X_1$ $X_0 = X_1$	$U_{кв,}\% = \frac{1}{2}(U_{вн} +$ $+ U_{вс} - U_{сн})$; $U_{кс,}\% = \frac{1}{2}(U_{вс} +$ $+ U_{сн} - U_{вн})$; $U_{кн,}\% = \frac{1}{2}(U_{вн} +$ $+ U_{нс} + U_{вс})$;
Нагрузка обобщенная	$E''_{он}$, $X''_{он}$	$E''_н = 0{,}80$; $X_1 = 0{,}35\frac{S_б}{S_н}$;	$E''_н = 0$; $X_2 = X_1$	$E_н = 0$; $X_0 = \infty$;	$S_{он,}$МВА
Нагрузка двигательная	$E''_g; X''_g$	$E''_g = 0{,}9$; $X_1 = 0{,}2\frac{S_б}{S_н}$;	$E''_g = 0$; $X_2 = X_1$	$E''_g = 0$; $X_0 = \infty$;	S_g, МВА
Система	$U_с$ X_c	$U_с = 1$ $X_с = 0$	$U_c = 0$ $X_2 = X_1$	$U_c = 0$ $X_0 = 0$	$S_с = \infty$
Реактор заземляющий	X_p	–	–	$X_0 = 3X_p \frac{S_б}{U^2_{ср.н.}}$	$X_р$, Ом

Таблица П.5.2

2. Формулы в именованных единицах для расчета на модели несимметричных замыканий

Элемент системы	Расчетные параметры	Последовательность		
		прямая	обратная	нулевая
Генератор	$\overset{\circ}{E}''_{г}$	$\overset{\circ}{E}''_{*г} = U_{г} + I_{нг*} \cdot X''_{d*} \cdot \sin\varphi$ $\overset{\circ}{X}_{т} = X_{d*} \cdot \frac{U^2_{н}}{S_{н}} \cdot K^2$ $\overset{\circ}{E}''_{г} = E''_{*} \cdot U_{н}$	$\overset{\circ}{E}''_{г} = 0$ $\overset{\circ}{X}_{2} = X_{2*} \cdot \frac{U^2_{н}}{S_{н}} \cdot R_1^2$	$\overset{\circ}{E}''_{г} = 0$
Трансформатор	$\overset{\circ}{X}_{т}$	$X_{т} = \frac{U_{k}\%}{100} \cdot \frac{U^2_{в-н}}{S_{н}}$	$\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$	$\overset{\circ}{X}_{0} = \overset{\circ}{X}_{1}$
Линия	$X_{л}$	$X_1 = X_0 \cdot l$	$\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$	$\overset{\circ}{X}_{0} = (2..5,5)\overset{\circ}{X}_{1}$
Авто-трансформатор	$X_{в}$ $X_{с}$ $X_{н}$	$\overset{\circ}{X}_{1} = \frac{U_{кв.}\%}{100} \cdot \frac{U^2_{вн}}{S_{нв}}$ $\overset{\circ}{X}_{1} = \frac{U_{кс.}\%}{100} \cdot \frac{U^2_{вн}}{S_{нс}}$ $\overset{\circ}{X}_{1} = \frac{U_{кн.}\%}{100} \cdot \frac{U^2_{вн}}{S_{нн}}$	$\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$ $\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$ $\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$	$\overset{\circ}{X}_{0} = \overset{\circ}{X}_{1}$ $\overset{\circ}{X}_{0} = \overset{\circ}{X}_{1}$ $\overset{\circ}{X}_{0} = \overset{\circ}{X}_{1}$
Обобщенная нагрузка	$\overset{\circ}{E}''_{н1}\overset{\circ}{X}''_{н}$ $\overset{\circ}{E}''_{н1}\overset{\circ}{X}''_{он}$	$\overset{\circ}{E}''_{он} = 0{,}80U_{н} \cdot K$; $\overset{\circ}{X}_{1} = 0{,}35\frac{U^2_{н}}{S_{н}}K^2$;	$E''_{он} = 0$; $\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$	$\overset{\circ}{E}''_{он} = 0$;
Двигательная нагрузка	$\overset{\circ}{E}''_{g}\overset{\circ}{X}''_{g}$	$\overset{\circ}{E}''_{g} = 0{,}9U_{н} \cdot K$; $\overset{\circ}{X}_{1} = 0{,}2\frac{U^2_{н}}{S_{н}} \cdot K^2$;	$\overset{\circ}{E}''_{g} = 0$; $\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$	$\overset{\circ}{E}''_{g} = 0$;
Система	$\overset{\circ}{U}_{с}$ $\overset{\circ}{X}_{с}$	$\overset{\circ}{U}_{с} = \overset{\circ}{U}_{с} \cdot K$ $X_1 = X_{с} \cdot K$	$\overset{\circ}{U}_{с} = 0$ $\overset{\circ}{X}_{2} = \overset{\circ}{X}_{1}$	$\overset{\circ}{U}_{с} = 0$ $X_0 = 0$
Заземляющий реактор	$\overset{\circ}{X}_{р}$	–	–	$X_0 = 3X_{р}$

Лабораторная работа № 6

Однократная продольная несимметрия

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

1. Цель работы: построение и изучение комплексных схем замещения, построение векторных диаграмм токов и напряжений, эпюр распределения напряжений отдельных последовательностей при возникновении однократной продольной несимметрии.

2. Краткая теория

В настоящей работе рассматриваются два вида несимметрии, а именно: разрыв одной фазы и разрыв двух фаз (в одном и том же месте).

Основные уравнения падений напряжения в схемах каждой последовательности, составленные для симметричной части системы при чисто индуктивной цепи можно представить в виде:

$$\Delta\underline{U}_{LA1} = \underline{E}_{Ac} - jX_{L1c}\cdot\underline{I}_{LA1};$$

$$\Delta\underline{U}_{LA2} = 0 - jX_{L2c}\cdot\underline{I}_{LA2}; \qquad (6.1)$$

$$\Delta\underline{U}_{L0} = 0 - jX_{L0c}\cdot\underline{I}_{L0},$$

где $\Delta\underline{U}_{LA1}, \Delta\underline{U}_{LA2}, \Delta\underline{U}_{L0}$ – симметричные составляющие падения напряжения фазы А на несимметричном участке системы; X_{L1c}, X_{L2c}, X_{0c} – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Дополнительная связь между симметричными составляющими токов и падений напряжений устанавливается из граничных условий рассматриваемого вида продольной несимметрии.

2.1. Разрыв одной фазы

Разрыв одной фазы (рис. 6.1*а*) можно характеризовать следующими граничными условиями:

$$\underline{I}_{LA1} = 0;\ \Delta\underline{U}_{LB} = 0;\ \Delta\underline{U}_{LC} = 0. \qquad (6.2)$$

При разложении на симметричные составляющие условий (6.2) приходим к равенствам:

$$\Delta\underline{U}_{LA1} = \Delta\underline{U}_{LA2} = \Delta\underline{U}_{L0} = 1/3\ \Delta\underline{U}_{LA}. \qquad (6.3)$$

Используя (6.2) и (6.3), определим $\underline{I}_{-LA2}$ и $\underline{I}_{-L0}$:

$$\underline{I}_{LA2} = -\frac{\Delta\underline{U}_{LA1}}{jX_{L2C}};\quad \underline{I}_{L0} = -\frac{\Delta\underline{U}_{LA1}}{jX_{L0C}}. \qquad (6.4)$$

В соответствии с (6.2) можно записать:

$$\underline{I}_{-LA1} + \underline{I}_{-LA2} + \underline{I}_{-L0} = 0. \qquad (6.5)$$

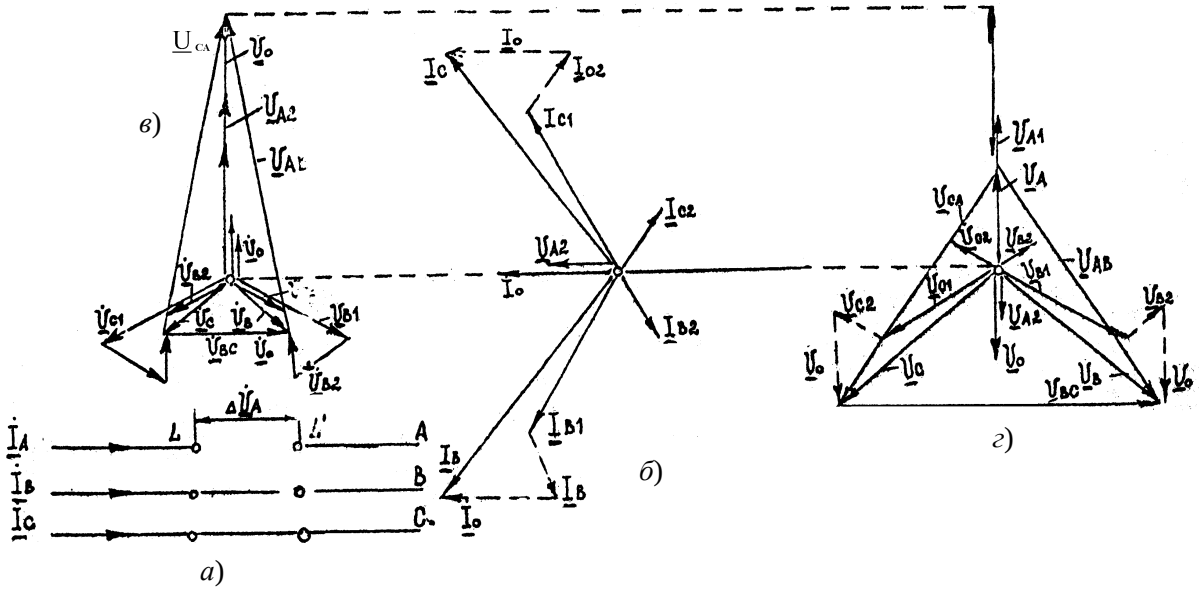


Рис. 6.1. Разрыв одной фазы трёхфазной цепи: а – исходная схема;
б – векторная диаграмма токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи;
в и г – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно,
в точках L и L^{I})

После подстановки (6.4) в (6.5) получим:

$$\Delta \underline{U}_{-\,LA1} = jX^{(1)}_{\Delta L} \cdot \underline{I}_{-LA1};$$

где $X^{(1)}_{\Delta L} = X_{L2C} \parallel X_{L0C}$. (6.6)

Для тока прямой последовательности фазы А в месте разрыва из (6.1) и (6.6) имеем:

$$\underline{I}_{LA1} = -\frac{\underline{E}_{AC}}{j(X_{L1C} + X^{(1)}_{AL})}. \qquad (6.7)$$

Для токов обратной и нулевой последовательностей с учетом (6.4) и (6.5):

$$\underline{I}_{LA2} = -\frac{X_{L0C}}{X_{L2C} + X_{L0C}} \cdot \underline{I}_{LA1}; \quad (6.8)$$

$$\underline{I}_{L0} = -\frac{X_{L2C}}{X_{L2C} + X_{L0C}} \cdot \underline{I}_{LA1}. \qquad (6.9)$$

Для определения напряжения с одной из сторон продольной несимметрии (в данном случае разрыва одной фазы) следует предварительно найти по схемам отдельных последовательностей симметричной части сети соответствующие составляющие этих напряжений. Прибавив к последним соответствующее напряжение $\Delta\underline{U}$, находят симметричные составляющие напряжений с другой стороны продольной несимметрии.

Зная все симметричные составляющие токов и напряжений, можно определить фазные величины токов и напряжений. В частности, для определения фазных токов в месте разрыва одной фазы могут быть использованы выражения:

$$\underline{I}^{(1)}_{L3} = \left(a^2 - \frac{X_{L2C} + aX_{L0C}}{X_{L2C} + X_{L0C}} \right) \cdot \underline{I}^{(1)}_{L}; \quad (6.10)$$

$$\underline{I}_{KC}^{(1)} = \left(a - \frac{X_{L2C} + a^2 X_{L0C}}{X_{L2C} + X_{L0C}} \right) \cdot \underline{I}_{LA1}. \quad (6.11)$$

Для нахождения модуля фазных токов при разрыве одной фазы может быть использован коэффициент, определяемый по выражению:

$$m_L^{(1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{L2C} - X_{L02}}{\left(X_{L2C} + X_{L02}\right)^2}}. \quad (6.12)$$

Для иллюстрации на рис. 6.1*б,в,г* приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте разрыва одной фазы (А).

2.2. Разрыв двух фаз

При разрыве двух фаз (рис. 6.2*а*) граничные условия будут:

$$\underline{I}_{LB} = 0; \underline{I}_{LC} = 0; \Delta\underline{U}_{LA} = 0. \quad (6.13)$$

В соответствии с (6.13) следует, что симметричные составляющие тока фазы А в месте разрыва двух других фаз связаны соответственно:

$$\underline{I}_{LA1} = \underline{I}_{LA2} = \underline{I}_{L0} = \frac{1}{3} \underline{I}_{LA}. \quad (6.14)$$

С другой стороны, поскольку согласно (6.14) имеем:

$$\Delta\underline{U}_{LA1} + \Delta\underline{U}_{LA2} + \Delta\underline{U}_{L0} = 0. \quad (6.15)$$

Достаточно сложить правые части уравнения (6.1) и сумму приравнять к нулю, после этого, учитывая (6.14), получим:

$$\underline{I}_{LA1} = \frac{E_{AC}}{j(X_{L1C} + X_{\Delta L}^{(2)})}, \quad (6.16)$$

где $X_{\Delta L}^{(2)} = X_{L2C} + X_{L0C}$.

Для фазного тока согласно (6.14) имеем:

$$\underline{I}_{LA} = 3\underline{I}_{LA1}.$$

Симметричные составляющие разности фазных напряжений в местах разрыва определяются для обратной и нулевой последовательностей
по (6.1), а для прямой последовательности проще по (6.15):

$$\Delta\underline{U}_{LA1} = -\left(\Delta\underline{U}_{LA2} + \Delta\underline{U}_{L0}\right). \quad (6.17)$$

На рис. 6.2*б,в,г* приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте разрыва фаз В и С.

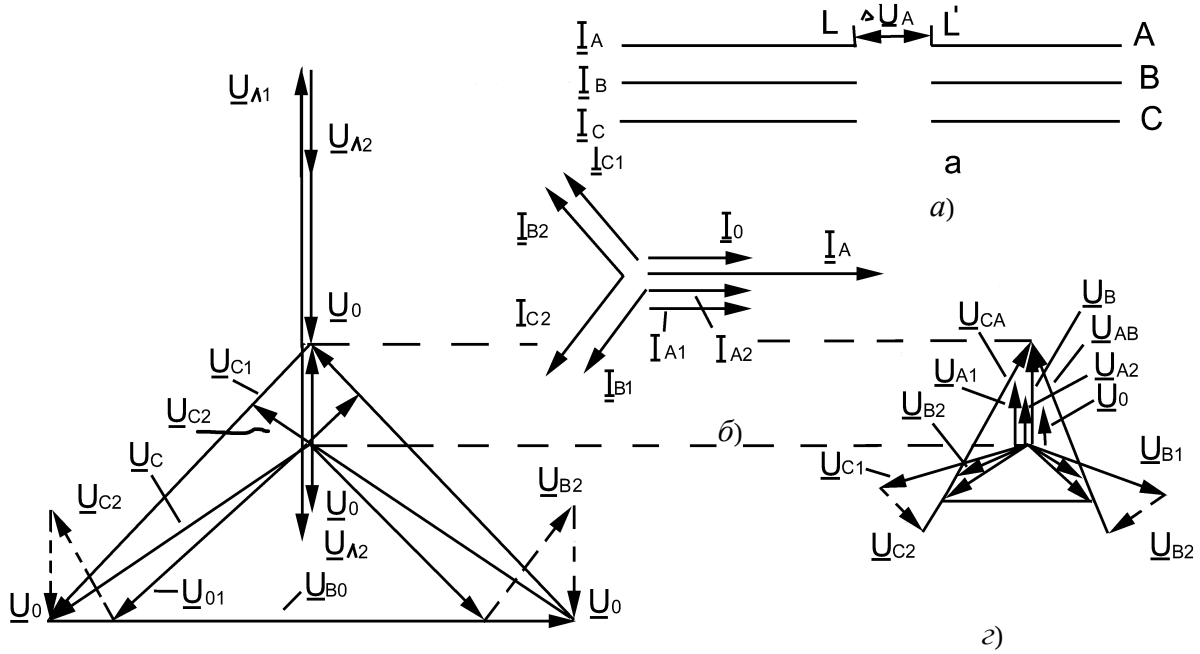


Рис. 6.2. Разрыв двух фаз трехфазной цепи:
а – исходная схема; б – векторная диаграмма токов в месте разрыва; в и г –векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно в точках L и LI)

2.3. Правило эквивалентности нулевой последовательности

Из структуры выражений для токов нулевой последовательности при рассмотренных видах однократной несимметрии непосредственно следует, что этот ток можно определить как ток симметричного трехфазного режима в схеме, где симметричный участок заменён симметричной цепью, величина сопротивления которого для каждого вида продольной несимметрии определяется сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схемами обратной и нулевой последовательности относительно места несимметрии.

Изложенное положение представляет собой по существу ***правило эквивалентности*** прямой последовательности применительно к условиям однократной продольной несимметрии, что позволяет ток прямой последовательности в месте продольной несимметрии при чисто индуктивной цепи выразить в общем виде как:

$$\underline{I}_{LA1}^{(n)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{\Delta L}^{(2)})}, \qquad (6.18)$$

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке:

$$\Delta\underline{U}_{L1}^{(n)} = X_{BL}^{(n)} \cdot I_{L1}^{(n)}, \qquad (6.19)$$

где верхний индекс (n) условно показывает вид рассматриваемой продольной несимметрии: ((1) – разрыва одной фазы; (2) – разрыва двух фаз).

Приведенные выше соотношения используем в данной работе для расчета аналитическим методом величин токов и напряжений в месте возникшей однократной продольной несимметрии, а также при исследовании однократной продольной несимметрии на модели постоянного тока.

2.4. Аналитический метод расчета переходного процесса при возникновении однократной продольной несимметрии

Приведем алгоритм расчета токов при возникновении однократной продольной несимметрии, используя правило эквивалентности прямой последовательности. Расчет ведём в относительных единицах.

1. Приводим полную информацию об исследуемой схеме электрической системы, выписывая из справочника данные об элементах системы, входящих в схему. Предварительно задаемся видом продольной несимметрии, который необходим для определения $X_{\Delta L}^{(n)}$.

2. Выбираем базисные условия. За базисную мощность $S_б$ источника питания принимаем мощность, равную 1000 МВА. За базисное напряжение принимаем среднее номинальное напряжение $U_{срн.}$ той ступени напряжения, на которой возникла та или иная несимметрия.
3. Составляем схемы замещения всех трех последовательностей: прямой, обратной и нулевой.
Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляем для любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени в нее входят генераторы и нагрузки соответствующим реактивностям и ЭДС. Все остальные элементы входят в схему неизменными сопротивлениями.
Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей условно принимают равным нулю, а реактивности обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от вида и условий возникшей несимметрии, а также от продолжительности переходного процесса.
Началом схем прямой и обратной последовательностей считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Это – точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности.
При продольной несимметрии схемы прямой и обратной последовательности имеют два конца: ими являются две точки, между которыми расположена данная несимметрия. Между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникшие в месте несимметрии.
Составление нулевой последовательности следует начинать от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. При продольной несимметрии это напряжение прикладывается в рассечку фазных проводов (рис. 6.3).

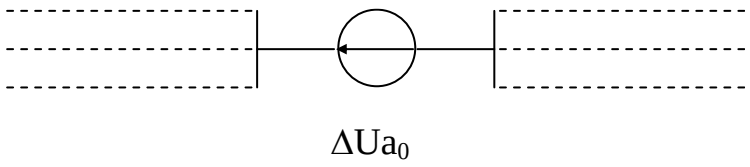


Рис. 6.3. Включение источника при разрыве фаз

Далее выявляются в пределах каждой электрически связанной цепи возможные пути протекания токов нулевой последовательности.
При продольной несимметрии циркуляция токов нулевой последовательности возможна даже при отсутствии заземленных нейтралей. В данной работе рассматриваются случаи, когда нейтрали трансформаторов или автотрансформаторов заземлены наглухо или через сопротивления обеих сторон от места, где приложено напряжение нулевой последовательности.
Сопротивление, через которое заземлены нейтраль трансформатора, генератора и т. д. должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через указанное сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трех фаз.
Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом. При продольной несимметрии нулевой последовательности имеется два конца – границы места несимметрии, т. е. точки, где возникла несимметрия.
4. Определяем результирующие сопротивления схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла та или иная несимметрия. На этом же этапе из схемы прямой последовательности находим также результирующею ЭДС относительно той же точки.
При продольной несимметрии на конкретной схеме (рис. 6.4*а*) проследим, как составляется схема замещения каждой последовательности.

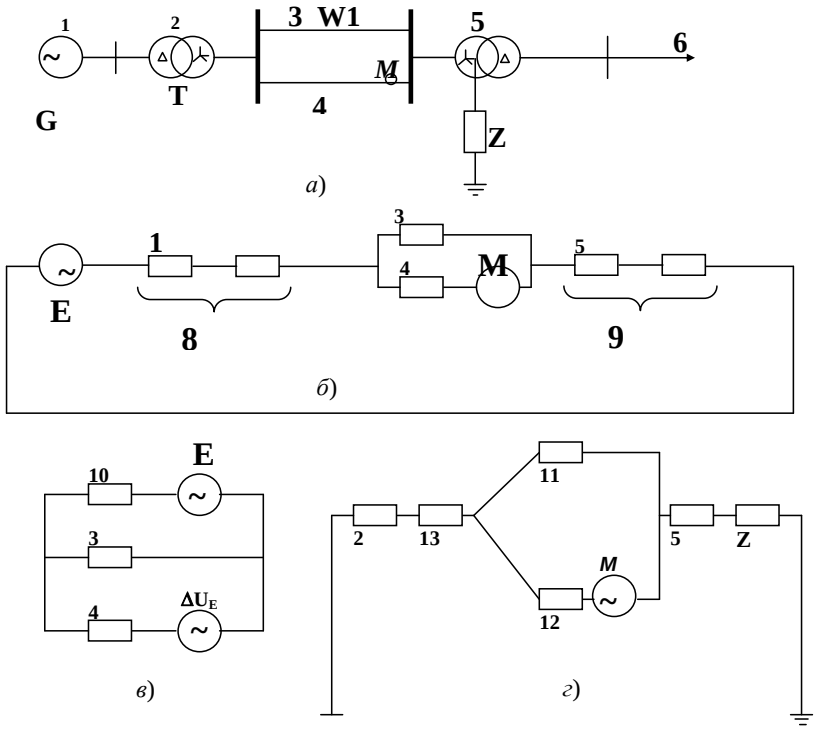


Рис. 6.4. Простейшая схема электрической сети (а) и схемы замещения для
прямой (б, в) и нулевой последовательности (г) при продольной несимметрии

Пусть в точке N возникла продольная несимметрия. В этом случае напряжение прямой последовательности в точке N должно быть введено в рассечку цепи элемента 4 (рис. 6.4*б*). Для определения результирующих ЭДС: сопротивления схемы относительно в данном случае необходимо вначале сложить последовательно элементы 8 и 9. Затем образовавшуюся ветвь 10 с ЭДС Е и ветвь 3 (рис. 6.4*в*) следует заменить эквивалентной, что даст искомую результирующую ЭДС относительно точки N, а для нахождения результирующего сопротивления относительно той же точки достаточно к сопротивлению полученной эквивалентной ветви прибавить сопротивление элемента 4. Схема обратной последовательности аналогична схеме (рис. 6.4*б*); в ней лишь отсутствует ЭДС источника. Её результирующее сопротивление находится так же, как и схемы прямой последовательности.

В схему нулевой последовательности рис. 6.4*г* двухцепная линия введена своей трехлучевой схемой замещения, с элементами 11, 12, 13, с тем, чтобы учесть взаимоиндукцию между цепями, находящимися теперь в различных условиях. Для нахождения результирующего сопротивления схемы здесь нужно сопротивление элемента 11 сложить параллельно с суммой сопротивлений элементов 2, 13, 5 и 7 (последний входит утроенной величиной) и затем прибавить сопротивление элемента 12.

5. По сопротивлению обратной и нулевой последовательностей определяем дополнительное сопротивление $X_{0L}^{(n)}$ и удаляем действительную точку несимметрии за сопротивление $X_{\Delta L}^{(n)}$, что позволяет в общем случае определить ток прямой последовательности $I_{LA1}^{(n)}$.

6. Модуль фазного тока при любом виде однократной продольной несимметрии определяем по выражению:

$$I_{L\phi}^{(n)} = m_L^n \cdot I_{LA1}^{(n)},$$

умножив на базисный ток, определяемый по формуле (5.3).

2.5. Исследование однократной продольной несимметрии на модели постоянного тока

Полученные выше соотношения между симметричными составляющими падений напряжений в месте рассматриваемой продольной несимметрии, позволяют составить для каждого случая несимметрии комплексную схему замещений, соединить между собой схемы отдельных последовательностей.

Такие схемы приведены на рис. 6.5*а,б*, причем в последнем случае показаны два варианта соединения, а именно: когда сопротивление X/3 соединены в звезду и когда сопротивление X соединены в треугольник. Эти комплексные схемы соответствуют особой фазе, в качестве которой, как обычно, принята фаза А. Комплексные схемы особенно удобны при использовании расчетных моделей и столов, поскольку в этом случае можно замерить приборами токи и напряжения отдельных последовательностей для любого участка и любой точки рассматриваемой системы.

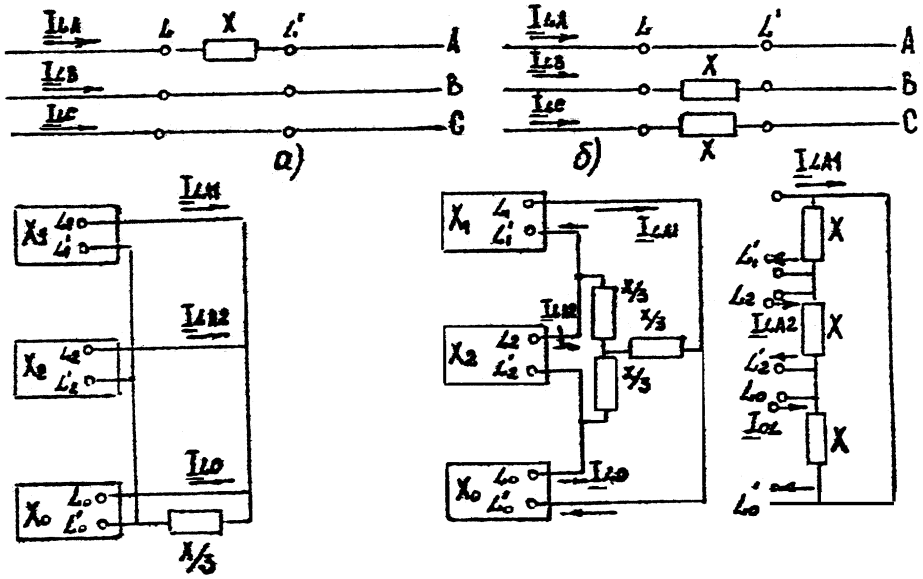


Рис. 6.5. Комплексные схемы замещения: а – при наличия сопротивления
в одной фазе; б – при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах

3. Задание на подготовительную работу

1. Ознакомиться с целью работы, детально изучить схему, представленную на лабораторном стенде (рис. 5.4) и оборудование для выполнения работы.
2. Ознакомиться с методом симметричных составляющих, правилом эквивалентности прямой последовательности, принципом составления схем замещения при рассмотрении различных видов несимметрии и принципом построения векторных диаграмм токов и напряжений в месте возникновения несимметри, с характером изменения напряжений всех трех последовательностей вдоль цепи в направлении от места возникшей продольной несимметрии и источником питания.

4. Порядок выполнения работы

1. Согласно варианта задания (табл. 5.3) и алгоритма расчета, изложенного выше, аналитическим путем определить токи неповрежденных фаз и напряжения по обе стороны от места разрыва в месте повреждения, соответственно, при разрыве одной или двух фаз, используя для определения параметров элементов схем замещения формулы, приведенные в табл. П.5.1 и П.5.2 и соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений, приведенных выше.
   Согласно варианта, принятого для расчета в п. 4.1, выполнить следующее.
2. Определить, пользуясь формулами, приведенными в табл. П.5.1 и П.5.2 параметры элементов схем замещения для всех последовательностей в именованных единицах, привести их к одной ступени напряжения, т. е. к среднему номинальному напряжению той ступени трансформации, на которой рассматривается соответствующий вид продольной несимметрии. Сверить результаты расчетов со значениями сопротивлений, приведенных на стенде.
3. Набрать на лабораторном стенде комплексную схему для соответствующего вида продольной несимметрии, например, для разрыва одной фазы. Для этого перед составлением комплексной схемы все сопротивления расчетной схемы замещения должны быть изменены в соответствии с принятым масштабам сопротивлений (5.4).
4. Сверхпереходную ЭДС генератора для установки на модели примем равной величине, лежащей в диапазоне 30-40 В, тогда масштаб напряжения модели определяется из формулы (5.5).

Используя масштаб напряжения, определяем напряжение источника, имитирующее сверхпереходную (при рассмотрении обрыва одной фазы в точке «Кз» и напряжением системы (5.6 и 5.7)).

При сборе комплексных схем, как и при выполнении п. 1, нейтрали трансформатора принять заземленной наглухо.

Замерить симметричные составляющие токов и напряжений каждой последовательности.

5. Используя масштабы M_U и M_I, определить действительные значения симметричных составляющих токов и напряжений каждой последовательности.
6. По данным, полученным в п. 4.5, построить векторные диограммы токов и напряжений в месте возникшей несимметрии.
7. Собрать комплексную схему для другого случая продольной несимметрии – разрыве двух фаз.
8. Выполнить действия, положенные в пп. 4-6.
9. Сравнить полученные результаты на модели с результатами расчета пункта 1 и сделать выводы.
10. С помощью модели определить как изменяются векторные диаграммы токов и напряжений при обрыве одной или двух фаз при заземлении нейтрали трансформатора через реактор. Значение сопротивления реактора задается преподователем.
11. С помощью модели построить эпюры распределения напряжений отдельных последовательностей при каждом виде, возникшей несимметрии в соответствующей точке электрической системы при однократной продольной несимметрии.

Укажите основные соотношении 6. Контрольные вопросы

1. теории симметричных составляющих при разложении трехфазной системы на симметричные составляющие при продольной несимметрии.
2. Каковы граничные условия и соотношения для симмитричных составляющих токов и напряжений в месте обрыва одной или двух фаз?
3. В чем состоит правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии?
4. Каковы особенности распределения напряжения различных последовательностей при продольной несимметрии?
5. Как влияет изменеие режима работы нейтрали трансформаторов на ток в здоровых фазах продольной несимметрии?

7. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходная схема электрической системы согласно задания.
3. Результаты аналитического расчета пункта 5.1: для разрыва одной фазы привести полный расчет; для разрыва двух фаз – свести в таблицу.
4. Таблица расчетных параметров элементов схем замещения всех последовательностей в именнованных единицах, приведенных к ступени напряжения, на которой расматривается однократная продольная несимметрия.
5. Численные значения масштабов – Mx, Mv, M.
6. Комплексные схемы замещения для всех видов несимметрии со значениями параметров схем замещения, выраженные в соответствии с масштабами Mx и Mu.
7. Таблица значений симметричных составляющих токов и напряжений, полученных на модели для всех видов симметрии.
8. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте с возникшей несимметрии с указанием маштабов.
9. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте возникшей несимметрии, полученные с помощью модели при расмотрении разрыва одной или двух фаз в случае, когда нейтраль трансформатора заземлена через реактор.
10. Эпюры распределения напряжений отдельных последовательностей от места возникшей несимметрии до источников питания.
11. Выводы.

Лабораторная работа № 7

Двухфазное короткое замыкание на землю

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

Задачи при изучении дисциплины:

Знать: физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах;
Уметь: анализировать результаты расчета переходных процессов для применения в реальных электроэнергетических системах и системах электроснабжения.
Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс	Формулировка:
ПК-2	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов
Индикаторы достижения компетенций	ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта

1. Цель работы: анализ основных соотношений и построение векторных диаграмм при двухфазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью с помощью теории симметричных составляющих.

2. Краткие теоретические сведения

При КЗ фаз В и С на землю (рис. 7.1*а*) граничные условия будут:

$$\underline{I}_{KA} = 0;\ \underline{U}_{KB} = 0\ ;\ \underline{U}_{KC} = 0. \qquad (7.1)$$

Найдем симметричные составляющие напряжений:
а) прямой последовательности:

$$\underline{U}_{KA1} = \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{KA} + a^2\underline{U}_{KB} + a\underline{U}_{KC}\right);$$

с учетом граничных условий:

$$\underline{U}_{KA1} = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA};$$

б) обратной последовательности:

$$\underline{U}_{KA2} = \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{KA} + a\underline{U}_{KB} + a^2\underline{U}_{KC}\right) = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA};$$

в) нулевой последовательности:

$$\underline{U}_{KA0} = \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{KA} + \underline{U}_{KB} + \underline{U}_{KC}\right) = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA}.$$

Таким образом:

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{KA0} = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA}. \qquad (7.2)$$

Основные уравнения между ЭДС и падениями напряжений отдельных последовательностей будут:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KA1} &= E_C - j\underline{I}_{KA1}X_{1C};\\ \underline{U}_{KA2} &= 0 - j\underline{I}_{KA2}X_{2C}; \qquad (7.3)\\ \underline{U}_{KA0} &= 0 - j\underline{I}_{KA0}X_{0C}. \end{aligned}$$

Из уравнений (7.3) с учетом (7.2), получим:

$$\underline{I}_{KA2} X_{2C} = \underline{I}_{KA0} X_{0C} . \qquad (7.4)$$

Из теории симметричных составляющих для тока фазы А имеем:

$$\underline{I}_{KA} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = 0 . \qquad (7.5)$$

Определим из выражения (7.5) значение тока $\underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA0}$ и подставим это значение в выражение (7.4). После промежуточных преобразований, получим для тока нулевой последовательности:

$$\underline{I}_{KA0} = -\underline{I}_{KA1} \frac{X_{2C}}{X_{2C} + X_{0C}} . \qquad (7.6)$$

Аналогично определим ток обратной последовательности:

$$\underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA1} \frac{X_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} . \qquad (7.7)$$

Из выражений (7.3) с учетом (7.2) и (7.6) имеем:

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{E}_C - j\underline{I}_{KA1} X_{1C} ;$$

$$\underline{U}_{KA0} = 0 - jX_{0C} \underline{I}_{KA0} = 0 + jX_{0C} \frac{X_{2C}}{X_{2C} + X_{0C}} \underline{I}_{KA1} ,$$

но $\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA0}$ и поэтому:

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{\underline{E}_C}{j(X_{1C} + \dfrac{X_{2C} X_{0C}}{X_{2C} X_{0C}})} .$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ будут:

$$\underline{I}_{KB} = \left(a^2 - \frac{X_{2C} + aX_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} \right) \underline{I}_{KA1} ,$$

$$\underline{I}_{KC} = \left(a - \frac{X_{2C} + a^2 X_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} \right) \underline{I}_{KA1} . \qquad (7.8)$$

Модули выражений (7.8) одинаковые и составляют:

$$m = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2C} X_{0C}}{(X_{2C} + X_{0C})^2}} .$$

В зависимости от отношения между X_{0C} и X_{2C} значение m находится в пределах $1{,}5 \le m \le \sqrt{3}$. Нижний предел наступает при $X_{2C} \le X_{0C}$, верхний при равном 0 или ∞.

На векторной диаграмме токов угол θ может изменяться в пределах $60° < \theta < 180°$, стремясь к нижнему пределу при $X_{0C} \to 0$, и к верхнему пределу при $X_{0C} \to \infty$, что соответствует условиям двухфазного КЗ без соединения с землей.

Выражение (7.2) позволяет построить векторную диаграмму напряжений двухфазного КЗ на землю, которая приведена на рис. 7.1*в*.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить получение с помощью теории симметричных составляющих основных соотношений между токами и напряжениями и их симметричными составляющими при двухфазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью.
2. Собрать схему испытаний на лабораторном стенде, приведенную на рис. 7.2. В табл. 7.1 указаны закорачиваемые фазы в соответствии с номером бригады.

Таблица 7.1

Варианты заданий

№ бригады	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Закорачив. фазы	A-B-0	A-C-0	B-C-0	A-B-0	A-C-0	B-C-0

3. Включить стенд и произвести измерения линейных и фазных напряжений. Результаты измерений занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты измерений и вычислений

КЗ фаз на землю	**Измерено**					**Вычислено**			
	U_A, В	**U_B, В**	**U_C, В**	**U_{AB}, В**	**U_{BC}, В**	**U_{CA}, В**	**U_1, В**	**U_2, В**	**U_0, В**
							Формула, результат	Формула, результат	Формула, результат

4. Определить напряжение прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке КЗ на основании теории симметричных составляющих. Результаты вычислений занести в табл. 7.2.
5. По результатам измерений и вычислений построить в масштабе векторную диаграмму напряжений, аналогичную приведенной на рис. 7.1*б*.

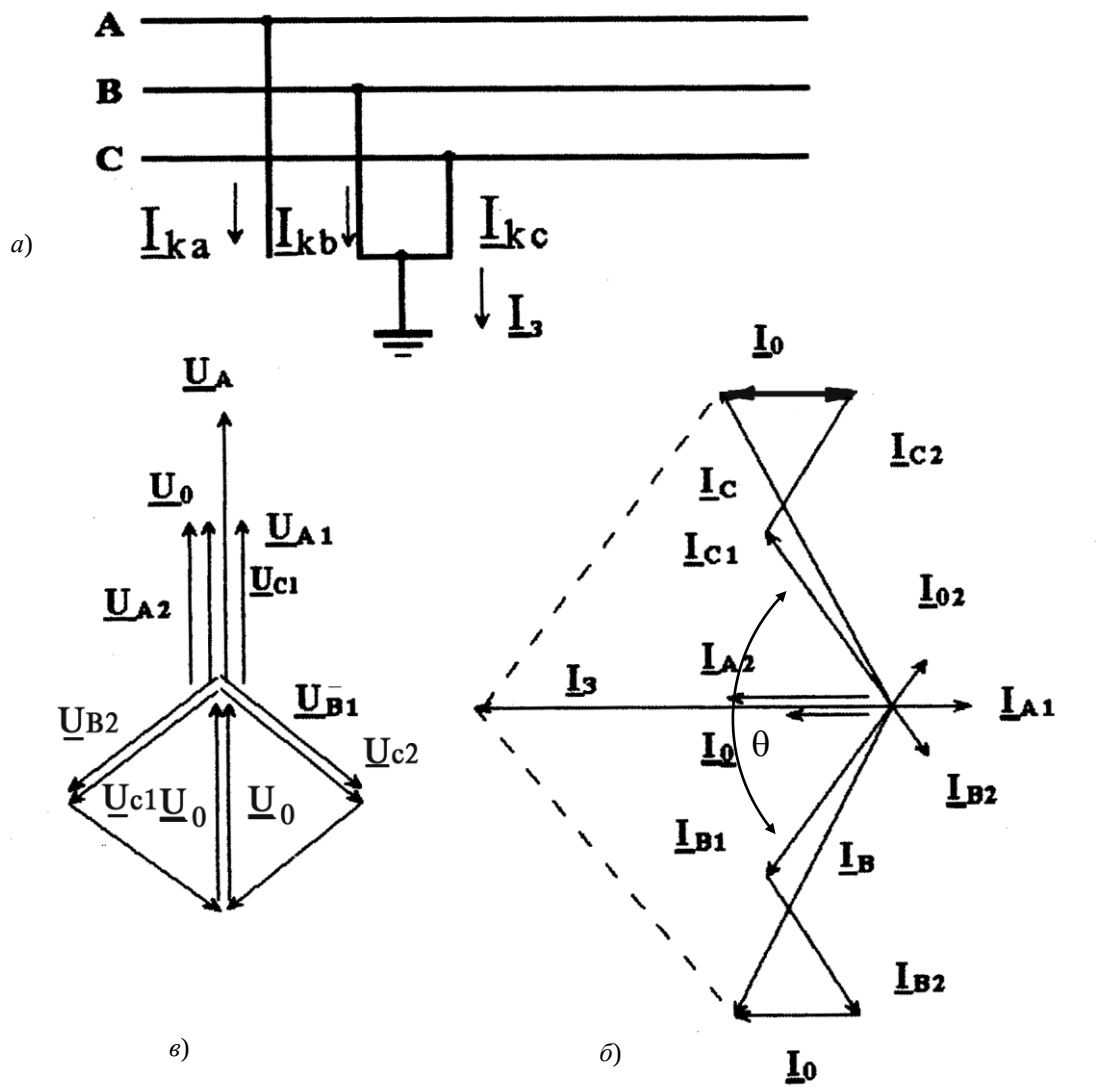


Рис. 7.1. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б), напряжений (в) двухфазного КЗ на землю

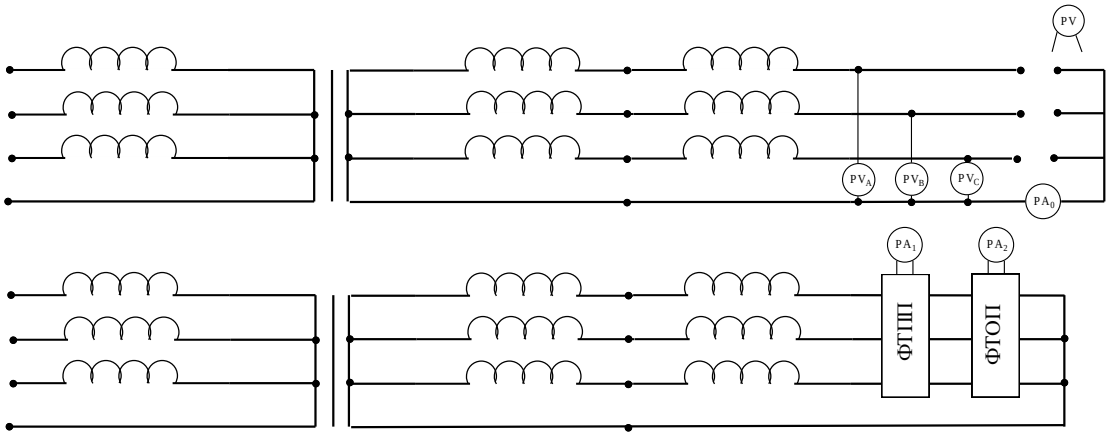


Рис. 7.2. Схема измерения фазных напряжений U_A, U_B, U_C, линейных напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

6. В испытательную схему подключить фильтры токов прямой (ФТПП), обратной (ФТОП) последовательностей и произвести замеры I_1, I_2, I_0 при закороченных фазах, указанных в табл. 7.1. Результаты измерений занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты измерений

КЗ фаз на землю	**Измерено**					
	I_A, А	**I_B, А**	**I_C, А**	**I_1, А**	**I_2, А**	**I_0, А**

7. По результатам измерений в масштабе построить векторную диаграмму токов (рис. 7.1*в*), используя метод симметричных составляющих.

4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема и граничные условия двухфазного КЗ на землю.
3. Схема для определения параметров двухфазного КЗ на землю.
4. Результаты измерений и вычислений в табличной форме.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов.
6. Выводы из анализа двухфазного КЗ на землю.

5. Контрольные вопросы

1. Каковы схема и граничные условия двухфазного КЗ на землю?
2. Как вычислить напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей при двухфазном КЗ на землю?
3. Как вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей при двухфазном КЗ на землю?
4. Как построить векторные диаграммы напряжений и токов при двухфазном КЗ на землю?

Лабораторная работа № 8

Учёт взаимоиндукции линий электропередач в схемах нулевой последовательности

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

1. Цель работы: изучение влияния взаимоиндукции ЛЭП на относительное распределение токов нулевой последовательности и получение количественной оценки погрешности, появляющейся в токах нулевой последовательности от неучета взаимоиндукции линии.

2. Краткая теория

Неучет взаимоиндукции не приводит к большой погрешности при вычислении тока КЗ, однако он может привести к значительной ошибке при определении токораспределения в схеме нулевой последовательности, что очень важно при настройке и анализе работы устройств релейной защиты от замыканий на землю. Рассмотрим это влияние.

Сопротивление, обусловленное взаимоиндукцией между двумя питающими линиями, например, вида провод-земля, можно вычислить по формуле:

$$Z_M = R_3 + jX_m = 0{,}05 + j\,0{,}45 \lg \frac{Д_3}{d};\quad \frac{Ом}{км}, \qquad (8.1)$$

где $Д_3$ – расстояние, называемое эквивалентной глубиной возврата тока через землю, равное приближённо 1000 м (980,35 м); d – расстояние между осями проводов двух параллельных линий.

В случае двухцепной ЛЭП сопротивление цепи увеличивается или уменьшается в зависимости от направления тока в обеих цепях благодаря наличию взаимоиндукции. При этом сопротивление взаимоиндукции между проводом одной цепи (например, фазой А) и тремя проводами (А, В, С) другой цепи определяется из выражения:

$$Z_{1-2} = 0{,}15 + j\,0{,}435 \lg \frac{Д_3}{Д_{1-2}};\quad \frac{Ом}{км}, (8.2)$$

где при линиях, выполненных с полным циклом транспозиции проводов, среднее геометрическое расстояние между рассматриваемыми цепями равно:

$$Д_{1\text{-}2} = \sqrt{d_{aa'} \cdot d_{ab'} \cdot d_{ac'} \cdot d_{ba'} \cdot d_{bb'} \cdot d_{bc'} \cdot d_{ca'} \cdot d_{cb'} \cdot d_{cc'}}\,. \qquad (8.3)$$

Для расчёта систем с взаимоиндукцией целесообразно использовать схемы замещения, в которых индуктивная связь заменяется электрической. В общем случае для двух взаимосвязанных цепей такая схема замещения представляет собой пассивный четырёхугольник с диагональными элементами. Причём некоторые из его элементов оказываются отрицательными, что вызывает затруднения при их имитации на расчётных моделях. Поэтому важно получить эквивалентную схему замещения без отрицательных сопротивлений. Известно, что такую схему замещения можно построить, если исходить из уравнений падения напряжения в магнитно-связанных цепях. Рассмотрим в качестве примера участок двухцепной линии электропередачи, не имеющий электрической связи по концам (рис. 8.1*а*). Запишем для него с учётом выбранного положительного направления токов уравнения для падения напряжения:

$$\Delta \underline{U}_{10} = \underline{I_{10}} \cdot jX_{10} + \underline{I_{20}} \cdot jX_{1-20}, \qquad (8.3)$$
$$\Delta \underline{U}_{20} = \underline{I_{20}} \cdot jX_{20} + \underline{I_{10}} \cdot jX_{2-20},$$

где X_{1-20} – реактивность взаимоиндукции; X_{10} и X_{20} – реактивность каждой цепи без учёта их влияния друг на друга.

Преобразуем полученную систему уравнений (8.3) путём прибавления к правым частям уравнений, соответственно, членов $\pm \underline{I}_{10} \cdot jX_{1-20}$ и $\pm \underline{I}_{10} \cdot jX_{1-20}$ к виду

$$\Delta \underline{U}_{10} = \underline{I}_{10} \cdot j(X_{10} - X_{1-20}) + (\underline{I}_{10} + \underline{I}_{20}) \cdot jX_{1-20}, \quad (8.4)$$
$$\Delta \underline{U}_{20} = \underline{I}_{20} \cdot j(X_{20} - X_{1-20}) + (\underline{I}_{20} + \underline{I}_{10}) \cdot jX_{1-20}.$$

Системе уравнений (8.4) удовлетворяет схема замещения, показанная на рис. 8.1*б*, аналогичная схеме замещения трансформаторов. Сопротивления $X_{\sigma 10} = (X_{10} - X_{1-2})$ и $X_{\sigma 20} = (X_{20} - X_{1-2})$ называются сопротивлениями рассеяния нулевой последовательности. Уравнение (8.4) примет вид:

$$\Delta \underline{U}_{10} = \underline{I}_{10} \cdot j(X_{\sigma 10}) + (\underline{I}_{10} + \underline{I}_{20}) \cdot jX_{1-20}, \quad (8.5)$$
$$\Delta \underline{U}_{20} = \underline{I}_{20} \cdot j(X_{\sigma 20}) + (\underline{I}_{20} + \underline{I}_{10}) \cdot jX_{1-20}.$$

Первые слагаемые представляют падение напряжения в реактивности рассеяния каждой соответствующей цепи тока; вторые – падения напряжения от алгебраической суммы токов обеих цепей и реактивности взаимной индукции.

Нетрудно установить, что если линии не связаны по концам между собой электрически, то сопротивление взаимоиндукции должно входить в ветвь, по которой проходит ток, равный сумме токов обеих цепей (рис. 8.1*в*). Пунктирные линии, соединяющие эти реактивности, свидетельствуют о том, что геометрический образ схемы замещения трансформатора нарушителя, поскольку реактивности $(X_{\sigma 10})$, $(X_{\sigma 20})$, (X_{1-20}) вводятся в различные ветви схемы нулевой последовательности. В этом случае токи нулевой последовательности каждой цепи могут отличаться как по величине, так и по направлению.

Однако часто индуктивно связанные цепи объединены электрически, хотя бы с одного конца. В этом случае реактивность взаимоиндукции подключается к общему узлу этих линий (рис. 8.1*г*).

Следовательно, в зависимости от характера соединения может быть построена та или иная схема замещения индуктивно связанных линий и набрана соответствующим образом на расчётной модели, используемой в данной работе.

Отметим, что при совершенно параллельных линиях, когда по ним проходят одинаковые по величине токи, сопротивление каждой цепи с учётом взаимоиндукции определяется, как это видно из выражения (7.3), непосредственно, без использования схемы замещения:

$$X_{\sigma} = X_{10} + X_{1-20}$$

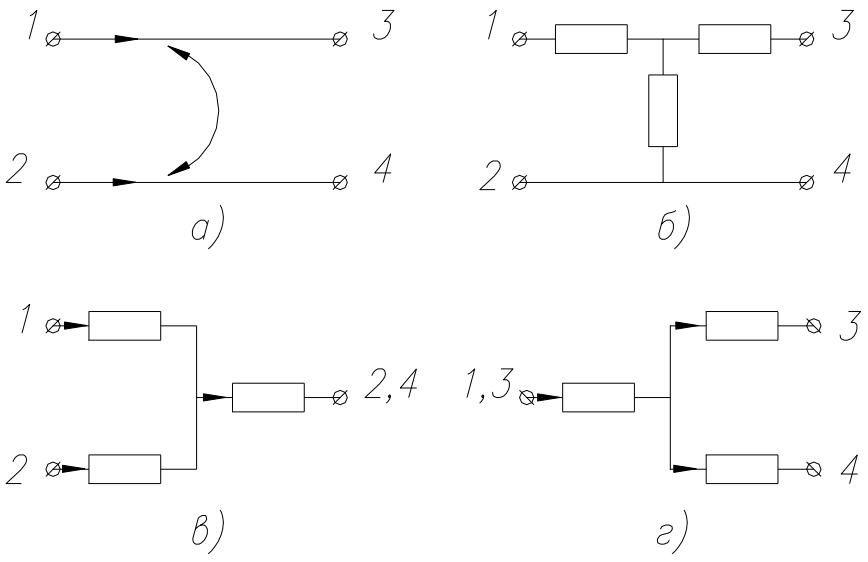


Рис. 8.1. Принципиальная схема замещения нулевой последовательности участка двухцепной линии электропередачи

В схеме без учёта взаимоиндукции линии падения напряжения

$$\underline{U}'_{10} = \underline{I}'_{10} \cdot jX_{10}; \quad \underline{U}'_{20} = \underline{I}'_{20} \cdot jX_{20},$$

где $\underline{I}'_{20}$, $\underline{I}'_{10}$ – токи нулевой последовательности линии без учёта взаимоиндукции.

Из систем (7.3) и (7.6) следует, что различие от неучёта взаимоиндукции цепей передаётся в основном вторым членом каждого из уравнений (8.3). Если ввести понятие эквивалентной реактивности нулевой последовательности одной из взаимосвязанных линий как отношение падения напряжения в ней к току в этой цепи, т. е.:

$$jX_{Э10} = \frac{\Delta U_{10}}{I_{10}} = jX_{10} \pm \frac{\underline{I}_{20}}{\underline{I}_{10}} \cdot jX_{1-20},$$

где $\underline{I}'_{20}$ и $\underline{I}'_{10}$ – абсолютные величины тока в цепи, то легко установить факторы, от которых зависит погрешность, обусловленные неучётом взаимоиндукции.

Если линию с наибольшей величиной тока принять за основную, то относительная эквивалентная реактивность будет

$$\frac{X_{Э10}}{X_{10}} = 1 \pm \frac{\underline{I}_{20}}{\underline{I}_{10}} \cdot \frac{X_{1-20}}{X_{10}}.$$

Таким образом, погрешности от неучёта взаимосвязей между линиями определяется как изменением тока в индуктивно связанной линии, так и изменением коэффициента связи $\frac{X_{1-20}}{X_{10}}$ между двумя цепями.

Отметим, что возможный диапазон изменения относительного тока в линии $\frac{\underline{I}_{20}}{\underline{I}_{10}}$ колеблется от +1 до –1, а коэффициент связи находится в пределах от 0 до 0,64, причём 0 соответствует случаю, когда линии бесконечно удалены друг от друга, а 0,64 – случаю, когда они находятся на одной опоре.

3. Описание установки

Используемая в работе установка представляет собой модель постоянного тока. На лицевой стороне стенда показана мнемоническая схема исследуемой системы (рис. 8.2). Элементы системы характеризуются следующими параметрами:

Таблица 1

	S, МВА	**Cos ϕ**	**U, кВ**	$\mathbf{X''_d}$	$\mathbf{U_К}$, %	$\mathbf{U_{ВН}}$, %	$\mathbf{U_{ВС}}$, %	$\mathbf{U_{СН}}$, %	$\mathbf{X_{01}}$	$\mathbf{X_{00}}$
Г1,Г2	150	0,85	13,8	0,12	-	-	-	-	-	-
Т1,Т2	180	-	230/11	-	18	-	-	-	-	-
Т3,Т4	240	-	220/10,5	-	14	-	-	-	-	-
АТ5,АТ6	180	-	220/121/11	-	-	32	12	20	-	-
СИСТЕМА	3000	-	-	-	-	-	-	-	1,8	3,6

Трансформаторы Т3 и Т4 присоединены на ответвлениях к середине линии, общая длина которой составляет 157 км. Индуктивные сопротивления линии вычислены и заданы в работе на единицу длины:

- реактивность прямой последовательности $X_1 = 0{,}4$, Ом/км;
- реактивность нулевой последовательности одной цепи без учёта влияния другой $X_{10} = X_{20} = 1{,}38$ Ом/км;
- реактивность взаимной индукции нулевой последовательности $X_{1-20} = 0{,}8$ Ом/км.

Исходя из этих данных, нетрудно рассчитать реактивность рассеяния:

$$X\sigma_{10} = X\sigma_{20} = X_{10} - X_{1-20} = 0{,}58 \text{ Ом/км};$$

при одинаковом конструктивном исполнении реактивность одной цепи с учётом взаимоиндукции со второй цепью при одинаковых по величине и знаку токах в обеих цепях.

$$X'_{10} = X'_{20} = X_{10} + X_{1-20} = 2{,}13 \text{ Ом/км}.$$

Схема замещения нулевой последовательности собирается с помощью гибких шнуров и контактных пластин в соответствии с условиями рабочего задания из элементов, показанных на рис. 8.1 и на стенде в виде мнемонической схемы. На этой схеме сопротивления каждого из участков линии, представлены 0,5 $X\sigma_{10}$ и 0,5 $X\sigma_{1-20}$. Требуемая схема замещения нулевой последовательности линии собирается из этих сопротивлений путём соответствующего их включения, определяемого характером электрической схемы замещения двух индуктивно связанных ЛЭП. Схемы замещения других элементов исследуемой системы также изображены на мнемонической схеме в виде сопротивлений. Все сопротивления выражены в именованных единицах при выбранном масштабе сопротивлений, равном $M_x = 10$.

Соответствующие зажимы элементов мнемонической схемы соединены с резисторами, смонтированными на обратной стороне стенда. Тумблеры, установленные на схеме, служат для подключения амперметра, измеряющего ток в данной цепи ветви. Предусмотрен ряд сопротивлений, с помощью которых можно представить нужный режим заземления нейтрали трансформаторов. При этом предполагается, что нейтрали автотрансформаторов всегда заземлены наглухо,а нейтрали трансформаторов Т3, Т4 – могут быть как заземлены наглухо, так и отключены. Нейтрали трансформаторов Т1, Т2 могут быть заземлены, кроме того, и через реактор. Сопротивление реактора, вводимое в схему нулевой последовательности утроенной величиной, может быть набрано из сопротивлений $3X_m$, $4{,}5X_m$, $9X_m$, отмеченных на схеме (рис. 8.2). Оно может принимать следующие значения: 3 $X_p = 0$, 3 X_m, $4{,}5X_m$, $7{,}5X_m$, $9X_m$, $22X_m$, $13{,}5X_m$, $16{,}5X_m$. $X_m = 5{,}5$ Ом – без учёта масштаба. Стенд питается от источника постоянного тока, “+” которого подключается через трансформатор тока к точке короткого замыкания, а “-” – к шине, объединяющей все точки нулевого потенциала. Напряжение между любой точкой схемы и нулевой шиной измеряется вольтметром.

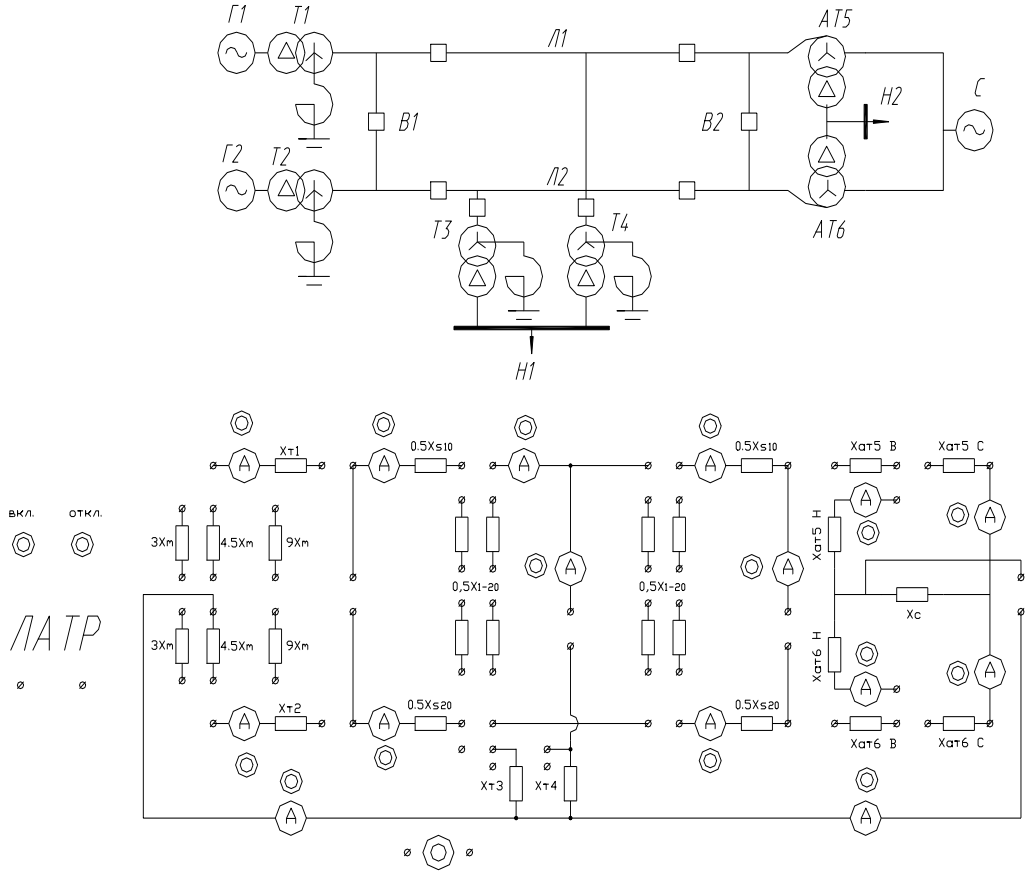


Рис. 8.2. Мнемоническая схема лабораторного стенда

В результате расчётов сопротивлений мнемонической схемы должны получиться следующие значения:

Таблица 2

Элемент	Значение, Ом	Элемент	Значение, Ом	Элемент	Значение, Ом
X_{T1}	529	$0{,}5\,X_{\sigma 20}$	314	X_{AT6B}	350
X_{T2}	529	$0{,}5\,X_{1-20}$	415	X_{AT6C}	0
X_m	55	X_{AT5B}	350	X_{AT6H}	590
X_{T3}	310	X_{AT5C}	0	X_C	0
X_{T4}	310	X_{AT5H}	590	$0{,}5\,X_{\sigma 10}$	314

4. Рабочее задание

1. Определить погрешности в процентах в точках нулевой последовательности, получаемые от неучёта взаимной индукции цепей ЛЭП при замыканиях в данной точке в следующих случаях:
   - Когда выключатель В1 замкнут, а В2 разомкнут.
   - Когда выключатель В1 и В2 разомкнуты при условии, что нейтрали трансформаторов Т1 и Т2 заземлены наглухо, а трансформаторы Т3, Т4 – отключены.
2. Определить погрешности в процентах в точках нулевой последовательности от неучёта взаимоиндукции при заземлении сопротивления в нейтрали трансформатора Т1 от $3X_p = 0$ и $3X_p = \infty$; нейтраль трансформатора Т2 заземлена наглухо, а трансформаторы Т3 и Т4 отключены; выключатель В1 замкнут, а В2 – разомкнут. Короткое замыкание – в той же точке. Определить ток в нейтрали трансформатора.
3. Построить эпюры напряжений в схемах с учётом и без учёта взаимоиндук-ции при замыкании на землю в заданной точке, исходя из условий, что выключатели В1, В2 – разомкнуты, нейтраль трансформатора Т1 заземлена через $3X_p = 3X_m$, трансформаторы Т2, Т3, Т4 отключены, линия Л2 отключена с обоих концов и заземлена для проведения ремонтных работ.

5. Контрольные вопросы

1. В чём основная трудность достоверного определения сопротивления нулевой последовательности ЛЭП?
2. Как влияют на сопротивление нулевой последовательности заземлённые тросы, и от каких факторов зависит их влияние?
3. Почему неучёт взаимоиндукции ЛЭП практически не влияет на ток нулевой последовательности в месте короткого замыкания?
4. Как определяется ток в нейтрали автотрансформаторов?

5.1. Содержание отчёта

1. Схема замещения нулевой последовательности с учётом и без учёта взаимоиндукции линии.
2. Выбор и расчёт масштабов моделирования.
3. Результаты измерений по пп. 4.1*а*,*б*.
4. Эпюры напряжений для заданного преподавателем варианта задания.

Лабораторная работа № 9

Короткие замыкания на стороне выпрямленного тока

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

1. Цель работы: изучение основных электрических параметров промышленных двухполупериодных трехфазных схем выпрямления.

2 Краткая теория

2.1. Общие положения

Потребителям необходим постоянный ток по двум причинам:

1. Многие энергоемкие технологические процессы требуют постоянного тока (электролиз, электрохимические процессы).
2. Постоянный ток обеспечивает большие удобства в управлении электродвигателями в тяговом и промышленном приводе. Поэтому около одной трети всей вырабатываемой электроэнергии используется потребителями постоянного тока. Ранее применялись электромеханические преобразователи, а с 30-х г. – вентильные преобразователи (ртутные, полупроводниковые).

2.2. Промышленные схемы выпрямления тока

В промышленных силовых установках применяются однофазные и трехфазные схемы выпрямления. Рассмотрим наиболее распространенные схемы выпрямления (трехфазные, двухполупериодные). При рассмотрении схем примем следующие условные обозначения, применяемые в технической литературе: U_d – среднее значение выпрямленного напряжения; I_d – среднее значение выпрямленного тока; m – число фаз выпрямления; i_a – мгновенное значение прямого тока вентиля; $U_{обр}$ – максимальное значение обратного напряжения на вентиле вторичной обмотки; U_2, I_2 –действующие значения фазных напряжений и токов вторичной обмотки трансформатора; S_1, S_2, $S_т$ – расчетные – первичная, вторичная и типовая мощности трансформатора; R_d – сопротивление включенное в цепь нагрузки.

Для удобства использования, основные электрические параметры промышленных схем выпрямления сведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Расчетные соотношения при чисто активной нагрузке и идеальных вентилях

Схема	Трехфазная мостовая	Трехфазная с уравнительным реактором
m	6	6
U_d/U_2	2,34	1,17
$U_{обр.макс}/U_d$	1,045	2,09
I_2/I_d	0,816	0,289
S_2/P_d	1,045	1,485

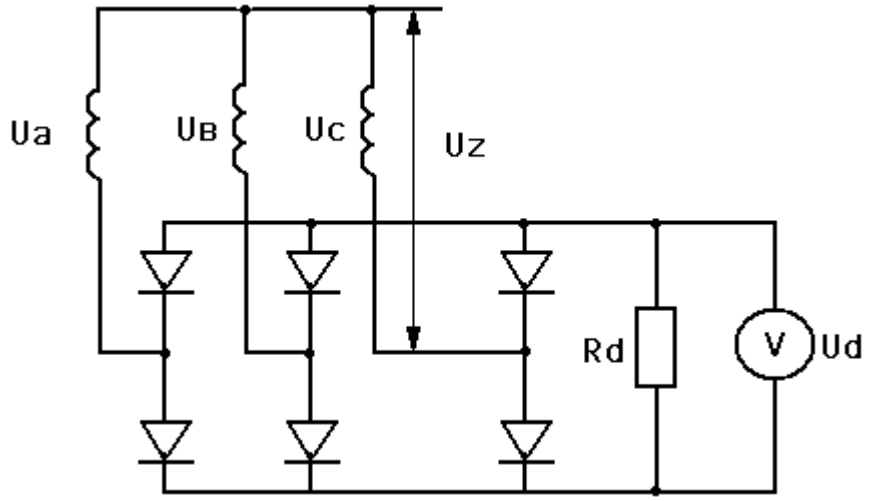


Рис. 9.1. Трехфазная мостовая схема (схема Ларионова)

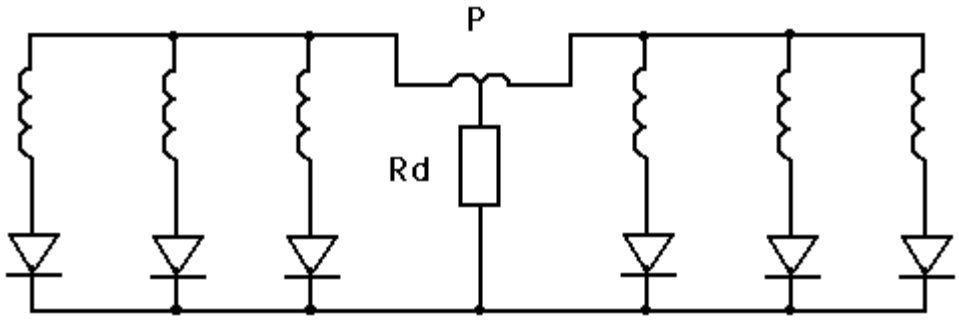


Рис. 9.2. Трехфазная схема с уравнительным реактором

2.3. Расчет тока КЗ на стороне выпрямленного тока

Для расчета принимается наиболее тяжелый режим, когда угол управления при КЗ равен нулю.
Среднее значение установившегося тока КЗ равно сумме средних значений токов в n вентилях, питающих место КЗ:

$$Idk = mI'dk = \frac{n}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{\sqrt{2}U_2}{x_2}\sin\theta d\theta = \frac{m\sqrt{2}U_2}{\pi x_2},$$

где U_2 – фазное напряжение анодной цепи, x_2 –индуктивное сопротивление цепи коммутации.
Для схемы с уравнительным реактором n = 6

$$Idk = 6\frac{\sqrt{2}U_2}{\pi x_2} = 2{,}7\frac{U_2}{x_2}.$$

Для трехфазной мостовой схемы n = 3

$$Idk = 3\frac{\sqrt{2}U_2}{\pi x_2} = 1{,}35\frac{U_2}{x_2}.$$

Если сопротивления выражены в ОЕ и приведены к базисной мощности, за которую принята номинальная мощность трансформатора, то:

$X_2 = 3\ X_* U_2^2 / S_{нт}$.

Ток в схеме с уравнительным реактором

$$Idkyd = 2\frac{\sqrt{2}}{\pi U_2}\frac{Sнн}{X_*};$$

ток в мостовой схеме:

$$Idkмdkм = \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2}\frac{Sнн}{X_*}.$$

С учетом активных сопротивлений

$$Idkyd = 2{,}7\frac{U_2}{\sqrt{Rk^2 + Xk^2}};$$

$$Idkмdkм = 1{,}35\frac{U_2}{\sqrt{Rk^2 + Xk^2}};$$

установившийся ток КЗ имеет пульсирующий характер. Максимальное значение этого тока:

$$Idkм = \frac{\pi}{3}Idk.$$

3. Порядок выполнения работы

3.1. Мостовая схема

1. Собрать схему испытания мостовой трехфазной схемы выпрямления, приведенной на рис. 9.3.
2. Включить стенд, записать показания приборов в табл. 9.2.
3. Вычислить значения U_d/U_2; $U_{обр}/U_d$; I_2/I_d; P_d; S_2; S_2/P_d и сравнить результаты вычислений с аналогичными отношениями, приведенными в табл. 9.1. Результаты вычислений записать в табл. 9.1.
4. Произвести КЗ (между выводами Rd).

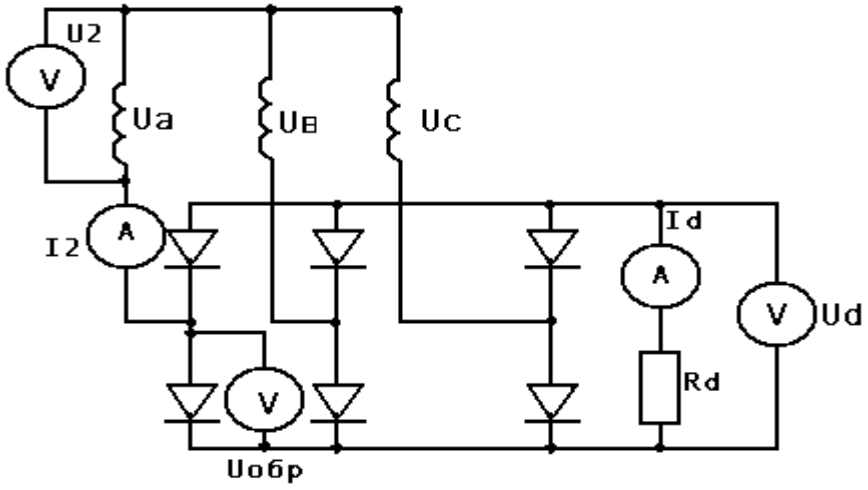


Рис. 9.3 Мостовая схема

3.2. Схема с уравнительным реактором

1. Собрать схему испытания схемы с уравнительным реактором (рис. 9.4), соблюдая полярность вторичных обмоток трансформатора.

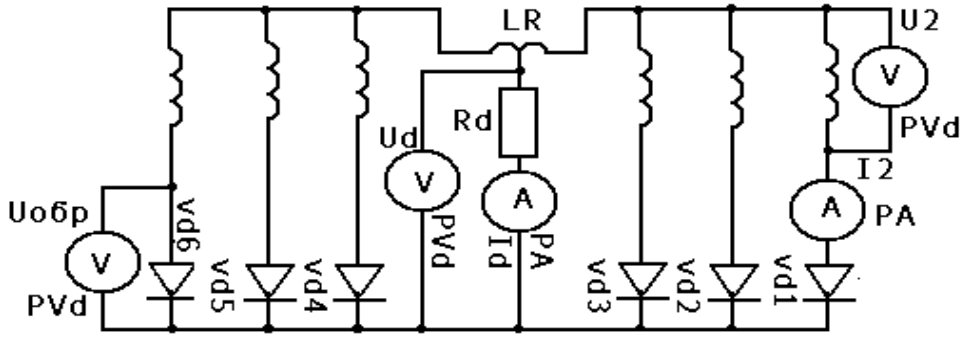


Рис. 9.4 Схема с уравнительным реактором

2. Включить стенд, записать показания приборов в табл. 9.2.
3. Вычислить значения U_d/U_2; $U_{обр}/U_d$; I_2/I_d; P_d; S_2; S_2/P_d и сравнить результаты вычислений с аналогичными отношениями, приведенными в табл. 9.1. Результаты вычислений записать в табл. 9.2.
4. Произвести КЗ между выводами R_d.

3.3. На основании вычислений сделать выводы о работе вентилей по току и обратному напряжению. Сравнить условия работы вентилей в рассматриваемых схемах.

4. Контрольные вопросы

1. В каких отраслях промышленности применяют выпрямленный ток?
2. Какие трехфазные схемы выпрямления применяются в промышленности?
3. При какой схеме выпрямления будет иметь место большая пульсация выпрямленного тока?
4. Вентили какой схемы выпрямления работают в более легком режиме по току, по напряжению?
5. Каков порядок расчета тока КЗ на стороне выпрямленного тока? Каковы исходные данные для расчета?

5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы испытаний мостовой схемы выпрямления и схемы с уравнительным реактором.
3. Результаты испытаний и вычислений в табличной форме.
4. Письменный ответ на вопросы 4, 5.

Таблица 9.2 Результаты измерений и вычислений

Схема выпрямления	**Измеренные величины**				
	U_2, В	I_2, А	I_d, А	U_d, В	$U_{обр}$, В
Мостовая					
С уравнительным реактором					

Продолжение таблицы 9.2

Вычисленные величины									
U_d/U_2	U_d/U_2 (табл. 9.1)	$U_{обр}/U_2$	$U_{обр}/U_2$ (табл.9.1)	I_2/I_d	I_2/I_d (табл. 9.1)	P_d, Вт	S_2, ВА	S_2/P_d	S_2/P_d, (табл. 9.1)

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

8.1.1. Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

8.1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

8.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям.
2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям.
3. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.

8.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. http://www.biblioclub.ru -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. http://www.iprbookshop.ru/ - Электронно- библиотечная система IPRbooks

Лабораторная работа № 10

Изучение модели-анализатора электрических систем

Цель:

Цель изучения дисциплины:

- дать представление о физике явлений, происходящих при электромагнитных переходных процессах и методы их количественной оценки.

Задачи при изучении дисциплины:

Знать: физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах;
Уметь: анализировать результаты расчета переходных процессов для примен ьных электроэнергетических системах и системах электроснабжения.
Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс	Формулировка:
ПК-2	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов
Индикаторы достижения компетенций	ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта

1. Цель работы: ознакомление с устройством модели-анализатора электрических систем и основными принципами производства измерений.

2. Модель-анализатор электрических систем

2.1. Назначение и область применения

Модель-анализатор электрических систем предназначается для определения токов и напряжений при продольной и поперечной несимметриях в сложных электрических сетях и применяется в проектных, эксплуатационных и научно-исследовательских организациях, связанных в своей работе с проектированием и эксплуатацией электрических сетей.
Аварийными режимами, рассчитываемыми на модели-анализаторе, могут быть:
а) трехфазные, двухфазные и однофазные КЗ на землю;
б) разрывы одной или двух фаз;
в) сложные виды повреждений – разрывы фаз с одновременными КЗ в различных точках.
На модели-анализаторе можно собирать в определенном масштабе схему электрической системы со сложной конфигурацией, состоящей не более чем из 192 элементов.
Схема электрической системы может иметь практически неограниченное количество число точек питания с одинаковыми значениями ЭДС.
Если по условиям расчета необходимо иметь различные значения ЭДС, то они могут быть установлены независимо друг от друга на трех различных уровнях с использованием помимо основного источника (ЭДС) добавочных источников питания (ΔE_1 и ΔE_2).

2.2. Питание модель-анализатора

В качестве основного источника для питания модели обычно используется выпрямитель, обеспечивающий стабилизацию выпрямленного напряжения, как от колебаний напряжения, так и от изменения нагрузки.
Добавочные источники питания подают регулярное напряжение от
1 до 18 В напряжение на шины ($+\Delta E_1$; $-\Delta E_1$; $+\Delta E_2$; $-\Delta E_2$).
Максимальный ток добавочного источника питания – 180 мА.

2.3. Технические данные

1. Основной источник питания (ЭДС):
   пределы регулировки……...2..36 мА
   максимальный допустимый ток…… 360 мА
2. Добавочные источники питания (E_1;E_2)
   количество…….……2 шт.

пределы регулировки……..1..18 мА
максимальный допустимый ток…… 180 мА

3. Блок сопротивления
количество…….……..160 шт
Из них:
100 блоков……... 10..1000 Ом
со ступенями регулировки…….…….10 Ом

Максимально допустимые токи на сопротивлениях блоков
1 Ом……..…300 мА
10 Ом……150 мА
100 Ом……50 мА
1000 Ом…….……..…15 мА

2.4. Описание основных узлов

2.4.1. Коммутационное поле

На модели-анализаторе сборка исследуемых схем производится матричным методом.
Коммутационное поле делится из 8 частей, причем каждая часть состоит из двух половин – верхней и нижней.
На верхней и нижней половинах каждой части имеются по 18 горизонтальных и 20 вертикальных шин. В местах пересечений шин установлены контактные гнезда для соединения их между собой.
Горизонтальные шины верхней и нижней половины, имеющие одинаковые номера, в каждой из 8 частей соединены перемычками. Шины «КЗ» (верхняя и нижняя, соединенные между собой перемычками): «-» основного источника питания и «+» основного источника питания, выполнены сквозными через все части поля коммутационного. К каждой верхней и соответствующей нижней вертикальным шинам подсоединены концы одного из блоков сопротивлений.
Для осуществления связи между 8-ю частями имеются 66 трансферных шин (№№ 201..268).
Соединительные гнезда трансферных шин расположены по обоим концам горизонтальных шин каждой из 8-ми поля коммутационного. Включением в эти гнезда штекеров осуществляется соединение трансферных шин с соответствующей горизонтальной шиной. Например, к трансферной шине № 201 могут быть присоединены горизонтальные шины №№ 38, 58, 78 и т. д., к трансферной шине № 236 – горизонтальные шины №№ 37, 57, 77 и т. д.
На каждой из 8-ми частей коммутационного поля две нижние горизонтальные шины верхней половины и две верхние горизонтальные шины нижней половины при помощи штекеров могут быть присоединены к шинам добавочным источникам питания «$+\Delta E_1$», «$-\Delta E_1$», «$+\Delta E_2$» и «$-\Delta E_2$».
Подсоединение шин к добавочным источникам питания осуществляется аналогично подключению трансферных шин.
Схема коммутационного поля предусматривает возможность параллельного включения двух и более модель-анализаторов.

2.4.2. Блоки сопротивлений

Величина сопротивлений генераторов, трансформаторов, реакторов, ЛЭП и т. д. в выбранном масштабе набирается на 160 блоках сопротивлений, имеющих номера от 21 до 180. Токи сопротивлений состоят из трех декад 9*1 Ом, 9*10 Ом, 9*100 Ом, 9*1000. Сопротивление измерительного контура 100 Ом входит в набранную величину. Поэтому декады 9*10 Ом имеют обозначения, начиная с единицы, тогда как другие декады имеют обозначения, начиная с нуля.
Набирают сопротивления с помощью штекерных переключателей. Гнезда штекерного переключателя и, соответственно, контакты штекера имеют прямоугольную форму. Вставлять штекер в гнездо можно только в определенном положении.
Пример набора сопротивления одного элемента 340 Ом: устанавливаем на декаде 9*100 Ом – штекер на отметке 3; на декаде 9*10 Ом – на отметке 4 и на декаде 9*1 Ом – на отметке 0.

2.4.3. Панель измерительная

В модели применены мультиметры типа DT-830B, причем один из них используется как вольтметр, другой – как амперметр. Величина сопротивлений всех измерительных шунтов равна 10 Ом. Исключение составляют измерительные шунты ЭДС и КЗ, сопротивление которых равно 1 Ом. Поэтому при измерении тока этими шунтами фактически ток в 10 раз больше обозначенного на переключателе пределов измерения.
Измерения производятся при помощи двухпозиционных ключей вызова измерения с самовозвратом. Среднее положение нейтральное.

При измерениях тока с помощью ключей вызова «ЭДС», «ΔE_1», «ΔE_2» следует вычитать ток управления. Он замеряется нажатием ключа вызова измерений источника питания до подключения нагрузки к источникам питания.
В цепи вольтметра имеется дополнительный переключатель на два положения: измерение схемы и измерительные гнезда. Когда переключатель вольтметра стоит в положении «Схема», вольтметр измеряет напряжение между шиной «+» основного источника питания и верхней вертикальной шириной измеряемого элемента.
Когда переключатель стоит в положении «измерительные гнезда» можно производить замер напряжения между любыми точками схемы при помощи длинных проводов с наконечниками.
Зажим «+» вольтметра нормально присоединен к шине «+» основного источника питания. При нажатии ключа «E_1» и «E_2» зажим «+» вольтметра подключается к шине «+» соответствующего добавочного источника питания и отключается от основного источника.
На панели измерительной установлены общий выключатель питания модель-анализатора, а также потенциометры грубой и точной регулировки напряжения источника питания. Минимальная регулируемая величина устанавливается в крайнем левом положении поворотом ручек потенциометра. Увеличение достигается вращением по часовой стрелке.

3. Производство расчетов на модели

Модель-анализатор не отражает действительных фазовых соотношений, действующих в реальной электрической сети между точками и напряжениями. Это вносит неизбежную погрешность как при расчетах аварийных режимов, так и нормальных режимов работы сети. Однако применение моделей на постоянном токе в большинстве случаев оказывается оправданным, поскольку эти погрешности обычно не превышают погрешностей в исходных данных.

3.1. Составление схемы набора и набор ее на модели-анализаторе

Схема набора составляется на основе расчетной схемы исследуемой цепи (с приведенными к одной ступени напряжения и перечисленными в масштаб модели сопротивлениями сети) и задания на выполнение расчетов.
Для подготовки набора на расчетной схеме наносятся номера сопротивлений в соответствии с их номинальной величиной. Номера сопротивлений принимаются подряд. Если на данной части коммутационного поля нет номиналов сопротивлений, входящих в расчетную схему, то занимаются сопротивления на ближайшей части поля коммутационного с нужными номиналами. После того, как проставлены номера всех сопротивлений, проставляются номера шин, с которыми соединяются данные сопротивления. В этом случае, если к шинам данной станции или подстанции подключаются с разных частей коммутационного поля, то около шин станции или подстанции пишутся номера шин, занимаемых на обеих частях коммутационного поля и, кроме того, в скобках номера трансферных шин через которые соединяются шины. При этом, если для шины данной станции или подстанции занимаются две шины, то их номера должны отличатся на число кратной 20-ти.
Все генераторы, если расчет ведется при их равных ЭДС, подключаются к шине «-», все нагрузки к шине «+».
В качестве примера на рис. 10.1 и 10.2 показана простейшая расчетная схема и ее набор на планшете коммутационного поля модели. В этом примере все сопротивления схемы набираются на одной части коммутационного поля, и трансферные шины не используются. Цифры, стоящие около сопротивлений, обозначают номера сопротивлений (в кружках) и номинальную величину в Омах. Точки около мест присоединения линий к шинам показывают, что здесь расположены измерительные шунты.

3.2. Производство измерений на модели-анализаторе

Измерительные шунты в цепи элементов сопротивлений установлены только с одной стороны этих элементов. Положительное направление тока выбрано при его протекании к верхним шинам коммутационного поля. Для изменения направления тока, текущего через прибор, надо в этом случае изменить полярность с помощью тумблера полярности, переключив его в положение «-».
Ввиду того, что измерительные шунты установлены с одной стороны элементов сопротивлений, измерение напряжений с помощью ключей вызова можно производить только на тех шинах, к которым присоединен элемент сопротивлений концом с измерительным шунтом (на верхних шинах коммутационного поля), чтобы измерительные шунты были подключены к тем верхним шинам коммутационного поля, на которых требуется измерять напряжение. В примере концы элементов с измерительными шунтами обозначены точками. Например, сопротивление 67 подключено к верхней горизонтальной шине 61, поэтому при помощи ключа вызова измерений 67 мы замерим напряжение на шине 62.

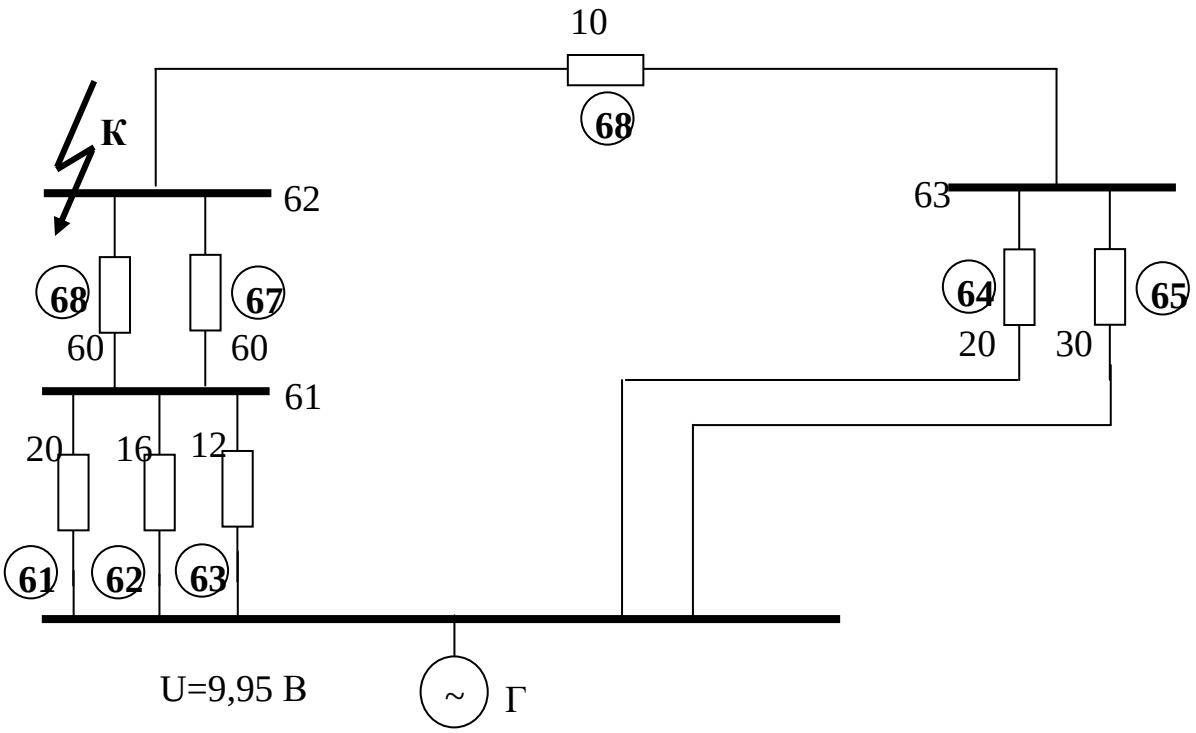


Рис. 10.1. Простейшая расчетная схема

Измерение напряжения между любыми двумя точками исследуемой схемы может производиться с помощью длинных проводов с наконечниками, предусмотренными для этой цели.

Между шиной «КЗ» и шиной «+» установлен измерительный шунт 1 Ом. Это дает возможность при определении токов КЗ с учетом нагрузок измерять суммарный ток в месте КЗ без учета токов, ответвляющихся в цепи нагрузок. При этом измерении тока основного источника питания и тока в месте КЗ показания прибора необходимо увеличить в 10 раз.

Набор схемы производится при отключенном источнике питания и потенциометрах грубой и точной регулировки величины ЭДС, установленных в минимальную величину напряжения (тумблер включения основного источника питания ставится в положение «Откл», а ручки регулировки величины ЭДС «грубая» и «точная» установлены в крайнем левом положении).

После набора и проверки схемы включается основной источник питания и напряжение плавно поднимается до величины нескольких вольт, контролируя одновременно суммарный ток источника питания и ток в наиболее нагруженных линиях, с тем чтобы не допустить перегрузки элементов сопротивлений. Если точки в ветвях лежат в допустимых пределах, то устанавливают выбранную в масштабах величину напряжения, после него собранная схема ставится на прогрев в течение 20 мин, не менее. После прогрева устанавливается точная величина напряжения и производится замер тока управления источника питания (штекер на шине «+» снят). После этого можно приступить к измерению токов в ветвях, напряжений в узловых точках исследуемой схемы.

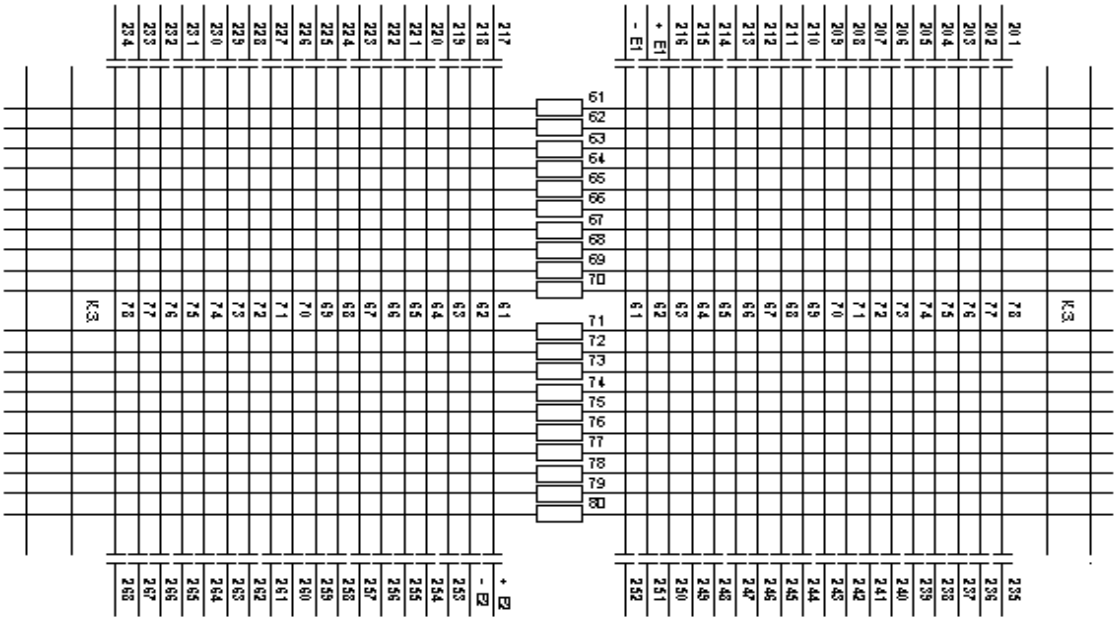


Рис. 10.2. Коммутационное поле модели с набранной расчетной схемой

При работе на модели-анализаторе необходимо помнить следующее:
1. При включении штекеров в гнезда следует прилагать усилие строго перпендикулярно к плоскости панели. Перегибы штекеров в ту или иную сторону не допускаются, т. к. это приводит к порче штекеров.
2. При ослаблении контакта штекеров допускается увеличить выпуклость контактной части, но при этом следует следить, чтобы контактные пластины в месте выхода из пластмассы были прижаты друг к другу. В противном случае пластмассовая часть штекеров будет нарушена.
3. Не следует касаться контактной части штекеров руками. Это приводит к увеличению переходного сопротивления контакта и, следовательно, понижает точность расчетов.
4. Строго запрещается одновременное нажатие нескольких ключей вызова измерений. Это может привести к выходу из строя измерительных приборов.
5. Запрещается поднимать напряжение основного источника питания выше 36 В и добавочных – выше 18 В.
6. Во время работы необходимо следить за тем, чтобы токи источников и элементы не превышали максимально допустимых величин.

4. Выбор масштаба электрических величин

Для производства расчетов на модели–анализаторе расчетная схема исследуемой сети должна быть приведена к одной ступени напряжения. За базисную ступень обычно выбирается наиболее разветвленная часть сети.
Перед составлением схемы набора на модель-анализаторе все сопротивления схемы в соответствии с принятым масштабом сопротивлений должны быть изменены. Масштаб сопротивлений для высоковольтных сетей (110 кВ и выше) рекомендуется выбрать так, чтобы все сопротивления реальной сети увеличивались бы в 10 раз, т. е.

$$M_X = \frac{X_{сист}}{R_{мод}} = 0{,}1.$$

Рекомендуемые масштабы напряжений для установки на модель-анализаторе в зависимости от номинального напряжения сети даны в табл. 10.1.
Величины сопротивлений на модели-анализаторе, с целью получения большей точности, следует выбирать наибольшими, однако так, чтобы не были превзойдены максимально допустимые токи в элементах сопротивлений. Выбор напряжений меньше 6,0 В не рекомендуется, т. к. при этом снижается точность измерений.

Выбранными масштабами сопротивлений и напряжений однозначно определяется масштаб токов:

$$M_\tau = \frac{M_v}{M_x}$$

Таблица 10.1

Линейные напр. сети	**Фазовые напр. сети**	**Напр. модели**	**Масштаб напр.**
$U_л$, кВ	**$U_ф$, кВ**	**$U_м$, кВ**	**Mu**
115	66,5	33,25 13,30 6,65	$2 10^3$ $5 10^3$ $10 10^3$
230	133,0	26,6 13,3 6,25	$5 10^3$ $10 10^3$ $20 10^3$
330	191,0	19,1 9,95	$10 10^3$ $20 10^3$
500	289,9	28,9 14,45	$10 10^3$ $20 10^3$
750	434	21,7 8,64	$20 10^3$ $50 10^3$

5. Задание на работу

1. Ответить на контрольные вопросы.
2. Для заданной схемы (номер схемы соответствует номеру бригады) выбрать масштабы сопротивлений, напряжений, составить расчетную схему, набор на планшете коммутационного поля.
3. Набрать схему на коммутационном поле модели-анализатора.
4. Произвести измерение напряжений и токов во всех плечах и узловых точках сети.
5. Сравнить результаты, полученные с помощью модели-анализатора, полученными аналитическим путем.

6. Контрольные вопросы

1. Назначение модели-анализатора электрических систем.
2. Устройство и назначение коммутационного поля.
3. Устройство измерительной панели.
4. Последовательность производства расчетов на модели-анализаторе.
5. Основные принципы выбора масштаба электрических величин.
6. Как составляется схема набора на модели-анализаторе?
7. Производство измерений на модель-анализаторе.

7. Содержание отчета

Отчет по работе должен в себе содержать:

1. Исходная электрическая схема, подлежащая расчету, с указанием основных параметров элементов, места и вида КЗ.
2. Выбор и расчет масштабов моделирования.
3. Схема замещения системы в том виде, как она должна быть подготовлена для ее набора на модели. На ней должны быть указаны величины сопротивлений и порядковые номера всех элементов.
4. Результаты определения токов КЗ (таблицы, содержащие данные измерения на модели и результаты расчета).
5. Краткие выводы.

6. Литература

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766
.

Номер схемы соответствует номеру бригады

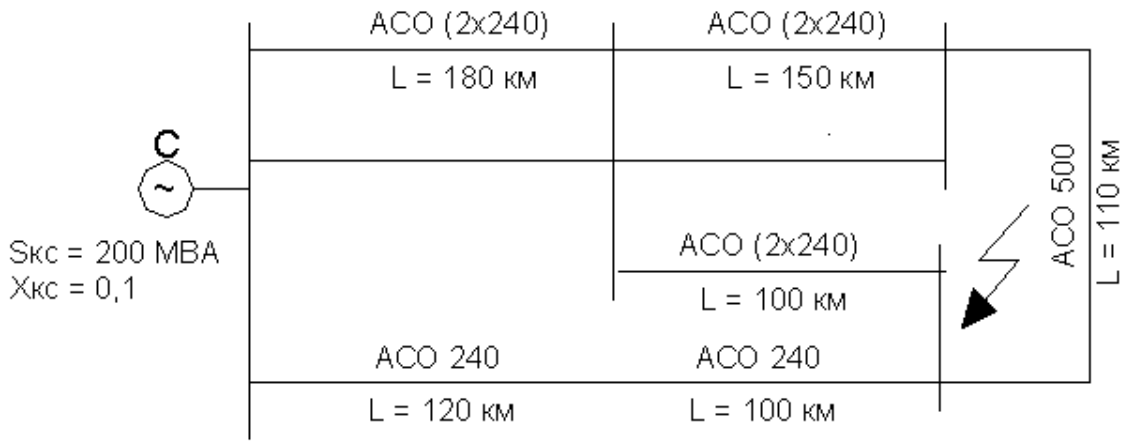


Схема 1

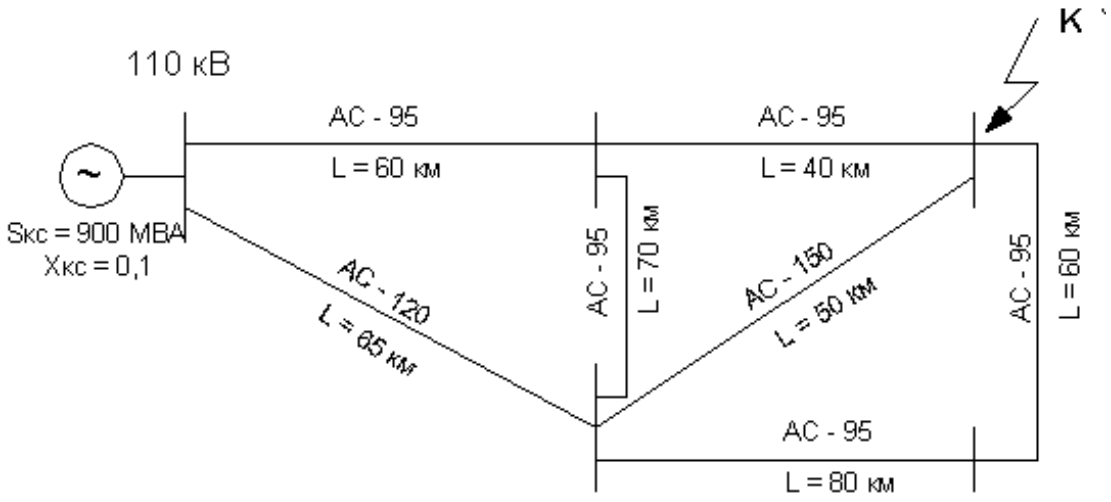


Схема 2

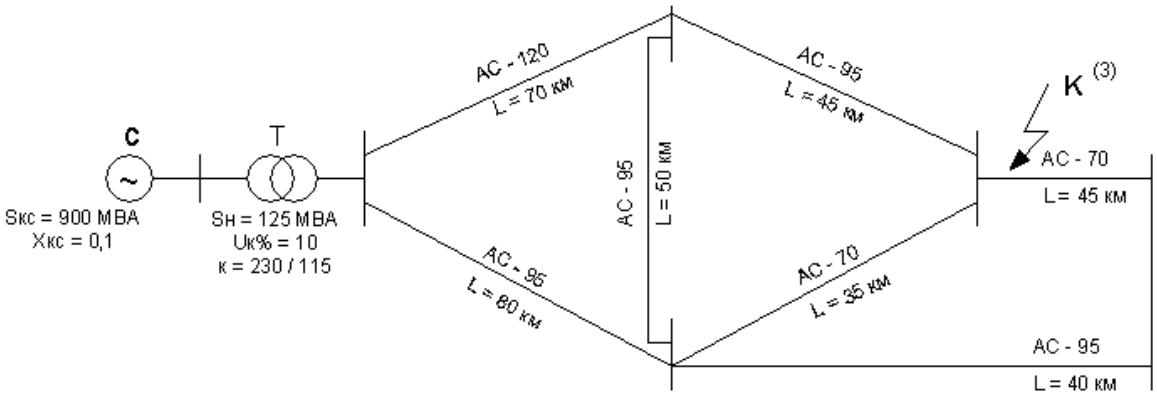


Схема 3

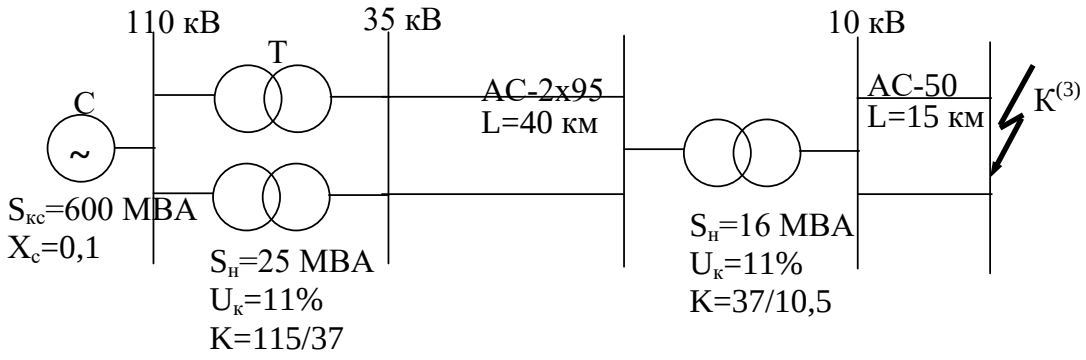


Схема 4

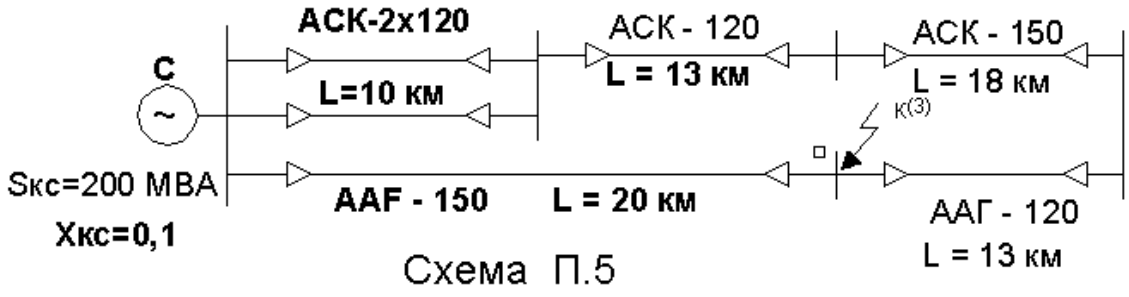


Схема 5

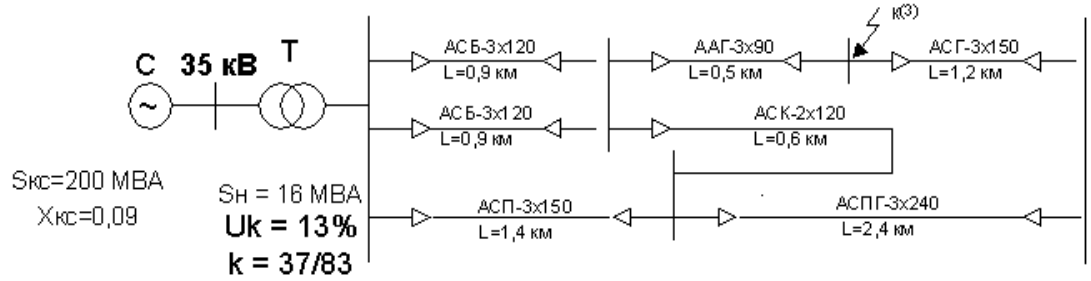


Схема 6

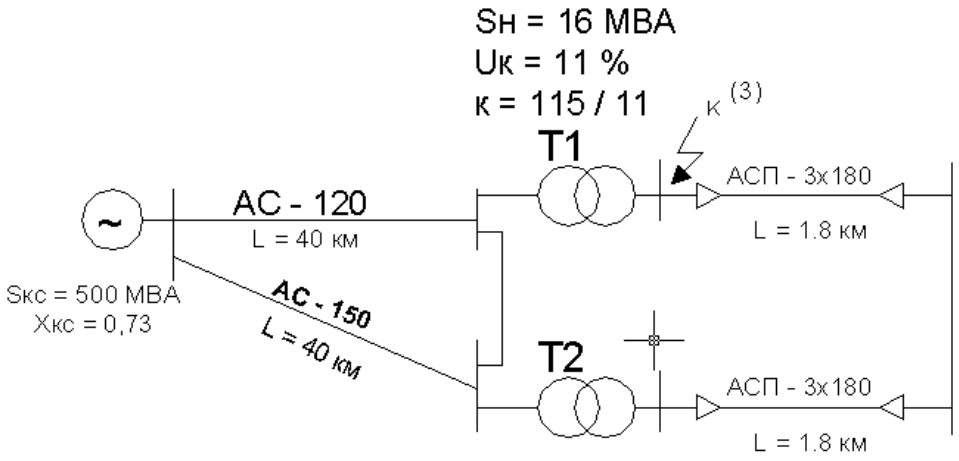


Схема 7

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

По выполнению расчетно-графических работ по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах»

для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	3
1.	Цель, задачи и реализуемые компетенции	4
2.	Формулировка задания и ее объем	5
3.	Общие требования к написанию и оформлению работы	9
4.	Рекомендации по выполнению задания	11
5.	План-график выполнения задания	18
6.	Критерии оценивания работы	19
7.	Порядок защиты работы	21
	Список рекомендуемой литературы	22

Цель, задачи и реализуемые компетенции

Основной целью изучения дисциплины «**Переходные процессы в электроэнергетических системах**» является получении знаний о построении и режимах работы систем электроснабжения промышленных и гражданских объектов, а также объектов сельского хозяйства и транспортных систем.

Задачей дисциплины является изучение физических основ формирования режимов электропотребления, освоение основных методов расчёта интегральных характеристик режимов и определения расчётных нагрузок, показателей качества электроснабжения, изучение методов достижения заданного уровня надежности оборудования и систем электроснабжения.

При выполнении расчетно-графической работы реализуются следующие компетенции:

Индекс	Формулировка:
ПК-2	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов
Индикаторы достижения компетенций	ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта

Формулировка задания и ее объем.

– Базовый уровень

Рассчитать электрические нагрузки групп электроприемников методом упорядоченных диаграмм показателей графиков электрических нагрузок по разделу 1.

Повышенный уровень

Рассчитать электрические нагрузки групп электроприемников методом упорядоченных диаграмм показателей графиков электрических нагрузок по разделу 1-4.

2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В итоге изучения дисциплины студент должен знать:

- об объектах, явлениях, процессах и методах анализа поведения электроэнергетической системы (ЭЭС) и систем электроснабжения (СЭС) при различных нарушениях;
- о теории статической и динамической устойчивости ЭЭС и СЭС;Студент должен уметь:
- методами расчетов переходных режимов ЭЭС и СЭС (статической и динамической устойчивости);- методами анализа поведения ЭЭС и СЭС;

уметь использовать:

-- математические модели и программные комплексы для анализа переходных процессов;

Выполнять необходимые расчеты;

формирования и постановки задач расчета переходных режимов ЭЭС и СЭС;

- использования современной вычислительной техники для расчетов устойчивости ЭЭС и СЭС.

Общие требования к написанию и оформлению работы.

Основные требования к работе

При выполнении и оформлении контрольной по ГОСТу надо учитывать общие требования, которые предъявляются к работе:

- студент должен придерживаться заданной тематики;
- запрещено менять тему самостоятельно без обращения к преподавателю;
- при оформлении работы нужно учитывать нормы и ГОСТы;
- контрольная выполняется на основании не менее семи источников, выбранных автором;
- работа должна быть авторской, в ней должны содержаться собственные выводы студента;
- текст контрольной должен иметь объем не менее 7 листов.

Оформление по ГОСТу текста контрольной

Когда работа выполнена, ее необходимо привести в соответствующий вид согласно ГОСТам:

- контрольную набирают в Word или другом текстовом редакторе с аналогичным функционалом;
- при наборе нужно использовать шрифт Times New Roman;
- интервал между строк — полуторный;
- размер шрифта — 14;
- текст выравнивается по ширине;
- в тексте делают красные строки с отступом в 12,5 мм;
- нижнее и верхнее поля страницы должны иметь отступ в 20 мм;
- слева отступ составляет 30 мм, справа — 15 мм;
- контрольная всегда нумеруется с первого листа, но на титульном листе номер не ставят;
- номер страницы в работе всегда выставляется в верхнем правом углу;
- заголовки работы оформляются жирным шрифтом;
- в конце заголовков точка не предусмотрена;
- заголовки набираются прописными буквами;
- все пункты и разделы в работе должны быть пронумерованы арабскими цифрами;

- названия разделов размещаются посередине строки, подразделы – с левого края;
- работа распечатывается в принтере на листах А4;
- текст должен располагаться только на одной стороне листа.

Работа имеет такую структуру:

1. Титульный лист;
2. Оглавление и введение;
3. Основной текст и расчет контрольной;
4. Заключительная часть работы;
5. Перечень использованной литературы и источников;
6. Дополнения и приложения.

Если в работе есть приложения, о них надо упоминать в оглавлении.

Ссылки нумеруются арабскими цифрами, при этом учитывают структуру работы (разделы и подразделы).

Рекомендации по выполнению задания.

При расчетах токов КЗ допускается не учитывать:

1. Сдвиг по фазе ЭДС и изменение частоты вращения роторов синхронных машин, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;

2. Ток намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов;

3. Насыщение магнитных систем электрических машин;

4. Поперечную емкость воздушных линий электропередачи (U=110-220кВ, если их длина не превышает 200 км, и U=330-600 кВ, если длина не превышает 150 км);

5. Активные сопротивления элементов сети напряжением свыше 35 кВ.

В электрической трехфазной системе напряжением 110 кВ и выше возможны следующие виды КЗ: трехфазное - $К^{(3)}$; двухфазное - $К^{(2)}$; двухфазное на землю - $К^{(1.1)}$; однофазное на землю - $К^{(1)}$. Расчеты токов КЗ производятся с помощью расчетных схем сети, в которые вводятся все участвующие в питании места КЗ источники, а также элементы (трансформаторы, линии, реакторы и др.) с учетом их связей, как с местом КЗ, так и между собой. Для упрощения проводимых расчетов целесообразно в расчетной схеме все магнитосвязанные цепи заменить одной эквивалентной электрически связанной цепью, т.е. составить схему замещения. Для расчета несимметричных КЗ рекомендуется использовать метод симметричных составляющих и правило эквивалентности прямой последовательности .

2.2 Определение параметров элементов эквивалентных схем замещения.

Параметры эквивалентных схем замещения могут быть определены:

1. В именованных и относительных единицах приведением значений параметров расчетных схем к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

2. В относительных и именованных единицах значений параметров расчетных схем к выбранным базисным условиям с учетом средних коэффициентов трансформации, равных отношению средних номинальных напряжений сетей соответствующих ступеней напряжений. Рекомендуется использовать шкалу средних номинальных между фазных напряжений сетей в [кВ]: 3,15; 6,3;10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 750.

В первом случае рассчитывают токи КЗ при наличии данных с фактических коэффициентов трансформация. Наиболее предпочтителен для практических расчетов (рекомендуется в КР) второй способ приведения. Расчетные выражения для этого способа приведены в табл. 1. При выборе данных условий следует руководствоваться тем, чтобы порядок числовых значений был удобен для оперирования с ними. За базисную мощность ($S_б$) целесообразно принимать число, кратное десяти. Например, 10, 100, 1000 и т. п. [МВА]. За базисные напряжения ($U_б$) рекомендуется принимать среднее значение той степени трансформации, где находится точка КЗ.

Базисный ток и сопротивление определяются по выражениям:

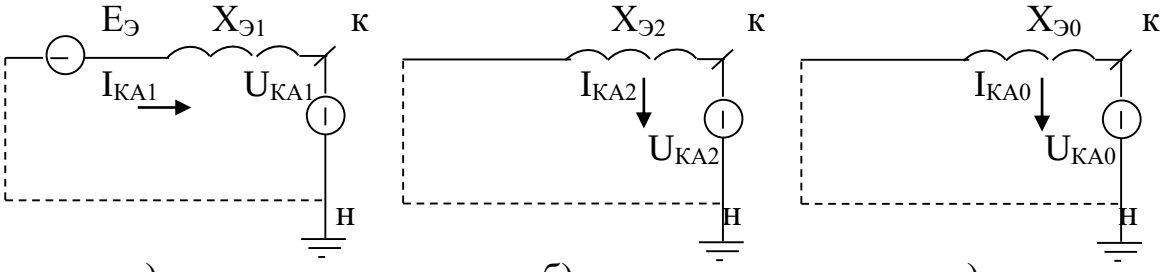
$$Iб = \frac{Sб}{\sqrt{3} \cdot Uб} \qquad Zб = \frac{Uб}{\sqrt{3} \cdot Iб} = \frac{Uб}{Sб} \quad (1)$$

2.3. Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

Определение параметров их элементов. (В дальнейшем приняты широко распространенные обозначения индексов для параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей: 1, 2, 0).

1. Схема замещения прямой последовательности аналогична схеме, которая составляется для расчетов симметричного КЗ. В зависимости от момента времени и метода расчета все элементы, в состав которых входят вращающие машины (генераторы, нагрузки двигатели, системы и т.п.), вводятся в схему замещения прямой последовательности соответствующими реактивными ЭДС. Все остальные элементы вводятся в схему неизменными сопротивлениями.

Началом схемы (н) прямой последовательности считается точка, в которой объедены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. В месте несимметрии (конец схемы - к) действует ЭДС, равная напряжению прямой последовательности. Любую схему прямой последовательности можно привести к простейшей схеме, из которой определяется результирующая ЭДС $E_Э$ и результирующее сопротивление прямой последовательности $X_{Э1}$



а). б). в).

Рис. 1

2. Схема замещения обратной последовательности по конфигурации не отличается от схемы прямой последовательности. Началом схемы обратной последовательности является точка, объединяющая начало всех генерирующих и нагрузочных ветвей (ЭДС обратной последовательности равны нулю). В конце схемы (в точке КЗ) приложено напряжение U_{KA2}. Параметры элементов схем замещения обратной последовательности для трансформаторов, воздушных линий, кабелей и реакторов те же, что и в схеме прямой последовательности. По сравнению со схемой замещения прямой

последовательности изменяются сопротивления обратной последовательности элементов, в состав которых входят вращающиеся машины.

Если для нагрузки сопротивление обратной последовательности не задано, то его можно принимать равным $X_{Н(2)}$=0,35 о. е.

Сопротивление обратной последовательности генераторов дается в каталогах в относительных единицах с приведением к номинальным параметрам генератора.

Схема замещения обратной последовательности приводится к виду, изображенному на рис. 1, б. Здесь $X_{Э2}$ является результирующим сопротивлением обратной последовательности.

3. Вид схемы замещения нулевой последовательности зависит от заземления нейтралей сети высшего напряжения (110 кВ и выше), количества трансформаторов и автотрансформаторов, схем соединения их обмоток. Если нейтраль трансформатора будет незаземлена, то не будет контура для протекания тока нулевой последовательности. При соединении обмотки трансформатора в треугольник ток нулевой последовательности в этой обмотке протекает, но далее пути для него нет.

В схеме замещения нулевой последовательности по сравнению с прямой изменяются сопротивления линий электропередачи. Это обусловлено особенностями циркуляция токов нулевой последовательности.

Составление схемы замещения нулевой последовательности следует начинать от точки КЗ, где приложено напряжение $U_{КА0}$ и являющейся концом схемы замещения. Далее в схему вводятся те элементы, но которым протекают токи нулевой последовательности. Концы этих элементов, имеющих потенциалы земли, т. е. заземленные нейтрали трансформаторов (автотрансформаторов) и обмотки, соединенные треугольником, объединяются в общую точку, получая начало схемы замещения нулевой последовательности. Затем схему свертывают относительно точки КЗ для определения результирующей величины сопротивления нулевой последовательности Хэо (рис. 1, в).

При определении сопротивлений любых схем замещения следует использовать формулы, приведенные в табл. 1.

2.4. Общий порядок аналитического расчета электрических сетей при КЗ.

После составления схем замещения электрической схемы и определения параметров их элементов возникает необходимость определения токов и напряжений как в месте повреждения, так я в любом заданном месте.

Для этого используются обычные методы, которые изучались в курсах "Теоретические основы электротехники" и "Электрические сети и системы".

1. Приведение схемы замещения к простейшему виду.

Для этого используются методы параллельного и последовательного сложения сопротивлений, преобразования треугольника в звезду и обратно, метод эквивалентных ЭДС.

Иногда в более сложных случаях при преобразовании схемы замещения возникает необходимость применения способа разреза схемы. Преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразований или участвовала них только на последних этапах.

2. При ручном расчете иногда бывает удобней использовать принцип наложения. Для этого необходимо определять собственные и взаимные сопротивления схемы замещения.

В КР производятся расчеты начальной стадии переходного процесса при трехфазном и несимметричных (при однократной поперечной несимметрии) КЗ. В задачи этих расчетов входит определение действующего значения периодической слагающей тока КЗ в начальный момент времени ($I_{П0}$) - начального сверхпереходного тока (I"), а также ударного тока (i_y, I_y).

При выполнении расчетов используются все те допущения, которых были изложены ранее. Кроме них, в практических расчетах по определению начального сверхпереходного тока допускается равенство продольных и поперечных сверхпереходных реактивностей синхронных машин ($x"_d = x"_q$), вне зависимости от их типов, что значительно упрощает расчеты.

При расчетах несимметричных КЗ предполагается, что периодическая слагающая тока состоит только из основной гармоники, т.е. пренебрегают высшими гармониками.

2.5. Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ

2.5.1. Общие положения

При расчете $I_{П0}$ должны быть учтены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные асинхронные двигатели мощностью 100 кВт и более если они не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами. В автономных системах следует учитывать и электродвигатели мощностью менее 100 кВт, если их доля в суммарном КЗ составляет не менее 5 %.

2.5.2. Расчетные параметры схемы замещения прямой последовательности

Синхронные и асинхронные машины в схему замещения прямой последовательности должны быть введены сверхпереходными сопротивлениями ($x"_d$) и сверхпереходными ЭДС численно равными, значениям этих ЭДС в момент, предшествующий КЗ (E"). При отсутствии данных по E" значение ЭДС для различных элементов сети могут быть определены соответствии с табл. 1.

Нагрузка в схеме замещения учитывается приближенно, как источник со сверхпереходным сопротивлением $x"_н$=0,35 и ЭДС $E"_н$=0.85 (если не заданы другие величины).

Все остальные элементы сети входят с заданными параметрами, приведенными к одной базисной мощности, $S_Б$ (в о. е.), либо к одной ступени напряжения (в именованных единицах).

2.5.3. Составление эквивалентных схем прямой последовательности для различных видов КЗ и определение полных токов.

Для расчетов и анализа несимметричных КЗ важным выводом является правило эквивалентности прямой последовательности. Суть этого правила состоит в том, что ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ можно определить как ток некоторого эквивалентного трехфазного КЗ, удаленного от действительной точки повреждения на дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$ (шунт КЗ), величина которого определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, ($x_{Э2}$ и $x_{Э0}$) относительно, места КЗ и зависит от вида КЗ. В соответствие с этим правилом эквивалентная схема прямой последовательности имеет вид, изображенный на рис. 2.

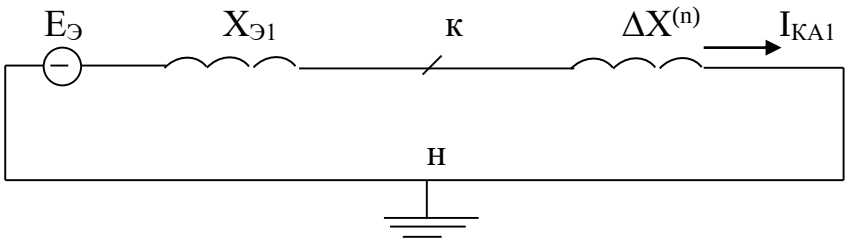


Рис.2

Ток прямой последовательности особой фазы (А) в месте КЗ при любом несимметричном КЗ (n) следует определять до формуле

$$I_{KA1}^{(n)} = \frac{E_Э}{j(x_{Э1} + \Delta x^{(n)})} \quad (2)$$

где $\Delta x^{(n)}$ - дополнительное сопротивление (определяется в соответствии с табл. 2).

Схемы замещения всех трех последовательностей методом преобразований приводятся к простейшему виду. При этом определяются суммарные сопротивления схемы каждой последовательности относительно места КЗ $x_{Э1}$, $x_{Э2}$, $x_{Э0}$, а в схеме прямой последовательности Еэ. При выполнении преобразований схем следует выбирать такую последовательность, чтобы число преобразований, особенно сложных, было наименьшим. Это обеспечивает меньшее количество ошибок в вычислениях и экономит расчетное время. В тоже время последовательность преобразований должна быть такова, чтобы в последнюю очередь преобразовались те части схемы, в ветвях которых необходимо определить токи и остаточные напряжения. Таким образом, сокращается объем вычислений при обратном развертывании схемы. Полный ток поврежденной фазы в месте КЗ равен

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{KA1}^{(n)} \quad (3)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз ток поврежденной фазы в месте КЗ больше тока прямой последовательности (табл. 2.)

Таблица 2

Вид КЗ	n	$\Delta x^{(n)}$	Значение коэффициента $m^{(n)}$
Трехфазное	0	0	1
Двухфазное	2	$x_{Э2}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	1	$x_{Э2} + x_{Э0}$	3
Двухфазное на землю	1.1	$\frac{x_{Э2} \cdot x_{Э0}}{x_{Э2} + x_{Э0}}$	$\sqrt{3}\sqrt{1-\frac{x_{Э2} \cdot x_{Э0}}{(x_{Э2} + x_{Э0})^2}}$

2.5.4. Определение симметричных, фазных токов и напряжений в месте КЗ и заданных сечениях.

Токи и напряжения обратной и нулевой последовательности в месте повреждения связаны определенными соотношениями с токами и напряжениями прямой последовательности для расчетной фазы, которые определяются видом повреждения. Если принять для всех несимметричных повреждений за расчетную фазу А, соотношения будут:

- для двухфазного КЗ

$$I_{KA2} = -I_{KA1}; U_{KA1} = U_{KA2} \quad (4)$$

- для однофазного КЗ

$$I_{KA1} = I_{KA2} - I_{KA0}; U_{KA1} + U_{KA2} + U_{KA0} = 0 \quad (5)$$

- для двухфазного на землю

$$I_{KA1} + I_{KA2} + I_{KA0} = 0; U_{KA!} = U_{KA2} - U_{KA0}$$

$$I_{KA2} = -I_{KA1}\frac{\Delta x^{(1.1)}}{x_{Э2}}; I_{KA0} = -I_{KA1}\frac{\Delta x^{(1.1)}}{x_{Э0}} \quad (6)$$

Полные токи в фазах соответственно:

$$I_{KA} = I_{KA1} + I_{KA2} + I_{KA0}$$

$$I_{KB} = a^2 I_{KA1} + aI_{KA2} + I_{KA0} \quad (7)$$

$$I_{KC} = aI_{KA1} + a^2 I_{KA2} + I_{KA0}$$

где $a = e^{j120} = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$; $a^2 = e^{j240} = -0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Напряжения различных последовательностей в месте повреждения находятся как (рис 1)

$$U_{KA1} = jI_{KA1} \cdot \Delta x^{(n)}$$

$$U_{KA2} = -jI_{KA2} \cdot x_{Э2} \quad (8)$$

$$U_{KA0} = -jI_{KA0} \cdot x_{Э0}$$

Полные напряжения отдельных фаз в месте повреждения определяются через соответствующие (U_{KA1}, U_{KA2}, U_{KA0}) по соотношениям, аналогичным для токов

$$U_{KA} = U_{KA1} + U_{KA2} + U_{KA0}$$

$$U_{KB} = a^2 U_{KA1} + aU_{KA2} + U_{KA0} \quad (9)$$

$$U_{KC} = aU_{KA1} + a^2 U_{KA2} + U_{KA0}$$

Для нахождения фазных токов и напряжений в заданном сечении необходимо произвести расчет токораспределений в схемах всех последовательностей, последовательно развертывая каждую из них. Исходным для этих расчетов является получение значения токов и напряжений различных последовательностей в месте повреждений (рис 1).

При развертывании схем пользуются известными правилами и законами распределения токов в линейных электрических цепях, для схем прямой последовательности напряжение в какой - либо удаленной от места повреждения точке (m) будет определяться как

$$U_{ma1} = U_{ka1} + \sum_{i-1,n} I_{mi1} jx_{mi1} \quad (10)$$

где $\sum_{i-1,n} I_{mi1} jx_{mi1}$ - сумма падений напряжения в ветвях по пути от точки повреждения до заданной m;

I_{mi1}-ток ветвей с сопротивлением x_{mi1};

n-число ветвей на пути преобразования от точки n до m.

Напряжения обратной и нулевой последовательности в сечении "m" определяются

$$U_{ma2} = U_{ka2} + \sum_{i-1,n} I_{mi2} jx_{mi2}$$

$$U_{ma0} = U_{ka0} + \sum_{i-1,n} I_{mi0}\, jx_{mi0} \qquad (11)$$

Для этих схем по мере удаления расчетного сечения от места повреждения абсолютная величина напряжения уменьшается. Все преобразования выполнятся по схеме замещений. При наличии на пути преобразования трансформаторов необходимо учесть, что взаимная ориентация векторов токов и напряжения различных последовательностей может изменяться, группой соединения обмоток этих трансформаторов.

Векторы напряжений и токов различных последовательностей при переходе через трансформаторы получают определенное угловое смещение. Поэтому полученные значения токов и напряжений в сечении (m) должны быть умножены па оператор поворота e^{pj30}, в котором $p=(-1)^N$, в котором N - номер группы соединений обмоток трансформатора. При переходе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y или Δ/Δ (группа 12) углового смешения нет. При переходе через трансформаторы с наиболее часто встречающейся группой Y/Δ-11составляющие прямой последовательности поворачиваются на угол 30 градусов по направлению вращения векторов (e^{j30}), обратной последовательности на 30 градусов против направления вращения векторов (e^{j30}). Поэтому выражения для напряжений U_{ma1} и U_{ma2} при одной трансформации будут иметь вид:

$$U_{ma1} = (U_{ka1} + \sum_{i-1,n} I_{mi1}\, jx_{mi1})e^{j30}$$

$$U_{ma2} = (U_{ka2} + \sum_{i-1,n} I_{mi2}\, jx_{mi2})e^{-j30} \qquad (12)$$

При переходе с треугольника на звезду - наоборот, прямая на (e^{-j130}), обратная на (e^{j30}). В общей случае, когда на пути развертывания схемы встречается не одна трансформация, поворот должен быть учтен соответствующее число раз. Токи нулевой последовательности трансформируются лишь при переходе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y.

Определив составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей расчетной фазы А, находятся полные токи и напряжений путем их геометрического суммирования по формулам (7) и (9).

Полные токи и напряжения фаз как в месте повреждения, так и в месте сечения могут быть получены и графически, путем вычерчивания векторных диаграмм на комплексной плоскости.

Следует помнить, что полученные значения, выражены в относительных единицах, при базисных условиях или именованных, приведенных к базисному напряжению. Для определения действительных значений токов и напряжений необходимо при переходе от относительных единиц учесть базисные условия:

$$I_{та} = I_{та*} \cdot \frac{S_б}{\sqrt{3} U_{ср} m}$$
$$U_{та} = U_{та*} \cdot \frac{U_{ср} m}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

При переходе от базисных именованных единиц к действительным:

$$I_{та} = I_{та} (\frac{U_б}{U_{ср} m})^2$$
$$U_{та} = U_{та} \frac{U_{ср} m}{U_б} \quad (14)$$

2.6. Расчет периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

2.6.1. Синхронные генераторы к компенсаторы

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени гидро- и турбогенераторов мощностью до 500 МВт включительно и всех синхронных компенсаторов при радиальной схеме следует применять типовые кривые, приведенные на (рис. 3, б), которые характеризуют изменение этой составляющей во времени при различных удаленностях точки КЗ. Значение периодическое составляющей тока КЗ в произвольный момент времени отнесены к начальному значению этой составляющей т. е.

$$\gamma_t = \frac{I_{nt}}{I_{n0}} \quad (15)$$

Удаленность точки КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этой машины в начальный момент КЗ к номинальному току машины (начальный относительный ток):

$$I_{n0*} = \frac{I_{n0}}{I_{ном}} \quad (16)$$

где $I_{ном}$ - номинальный ток синхронной машины (группы машин), приведенной к той ступени напряжения сети, где находится точка КЗ, кА:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} U_{ср,к} \cos\varphi_{ном}} \quad (17)$$

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

$U_{СР,К}$ - среднее номинальное напряжение сети той ступени напряжения, где находится точка КЗ, кВ.

Кривые рис. 3 следует использовать для расчетов действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных генераторов, имеющих тиристорную независимую или высокочастотную систему возбуждения, а также от синхронных компенсаторов, кривые рис. 4-5 - от синхронных генераторов, имеющих тиристорную систему самовозбуждения соответственно с последовательными трансформаторами и без последовательных трансформаторов, кривые рис. 6 от синхронных генераторов с диодной бесщеточной системой возбуждения.

Все кривые построены для синхронных генераторов (компенсаторов), у которых кратность предельного напряжения возбуждения по отношению к номинальному напряжению возбуждения не превышает двух. Для гидрогенераторов, имеющих повышенные кратности предельного напряжения возбуждения по отношению к номинальному напряжению возбуждения (больше двух) кривые рис. 3 допускается использовать только при небольшой удаленности точки КЗ, когда $I_{n0}>3$. При большей удаленности точки КЗ периодическую составляющую тока КЗ следует принимать неизменной по амплитуде.

Если отношение действующего значения периодической составляющей тока синхронной машины в начальный момент КЗ к номинальному току менее двух, то КЗ следует считать удаленным и периодическую составляющую тока КЗ принимать неизменной по амплитуде.

Расчет действующего значения периодической составляющей КЗ от синхронного генератора (компенсатора) или нескольких однотипных синхронных генераторов (компенсаторов), находящихся в одинаковых условиях (однотипные генераторы и их системы возбуждения, примерно одинаковые мощности, одинаковые условия подключения к месту КЗ) по отношению к точке КЗ, следует вести в следующем порядке:

1. Составить схему замещения для определения начального значения периодической составляющее тока КЗ от синхронной машины (или группы машин) и найти относительный ток I_{*n0};
2. По кривой $\gamma_t=f(t)$, соответствующей найденному значению I_{*n0}, для заданного момента временя найти отношение токов $I_{nt} / I_{n0} = \gamma_t$;
3. Определить действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины (или группы машин) в кА в момент времени t:

$$I_{nt} = \gamma_t I_{n0} I_{ном} \quad (18)$$

2.6.2. Асинхронные двигатели

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени при радиальной схеме следует использовать типовые кривые, приведенные на рис. 7, которые характеризуют наименьшее этой составляющей во времени при разных удаленностях точки КЗ. Значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент отнесены к начальному значению этой составляющей:

$$\gamma_{tAD} = \frac{I_{ntAD}}{I_{n0AD}} \quad (19)$$

Удаленность точки КЗ от асинхронного электродвигателя характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этого электродвигателя в начальный момент КЗ к его номинальному току (начальный относительный ток):

$$I_{*n0} = \frac{I_{n0AD}}{I_{номAD}} \quad (20)$$

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронного электродвигателя в произвольный момент времени аналогичен изложенному в п.2.6.1. Значение периодической составляющей тока в кА в момент времени t равно:

$$I_{ntAD} = \gamma_{tAD} I_{*n0} I_{ном} \quad (21)$$

2.6.3. Синхронные двигатели

При приближенных расчетах действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного двигателя в произвольный момент времени в радиальной схеме допускается использовать типовые кривые, приведенные на рис. 8, которые характеризует изменение этой составляющей во времени при разных удаленностях точки КЗ. Методика нахождения токов от синхронных двигателей аналогична приведенной в п. 2.6.1, поэтому здесь больше не приводится.

2.6.4. Использование типовых кривых для определения несимметричных токов КЗ в сложных электрических системах

Порядок расчета следующий:

1. Составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Обобщенные нагрузки в схемы не вводятся.

2. Расчетная схема прямой последовательности преобразуется к лучевому виду относительно точки КЗ (рис. 9).

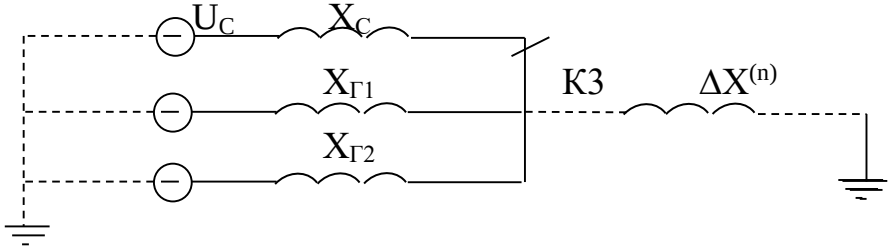


Рис. 9. Преобразование схем

3. По схемам замещения обратной и нулевой последовательностей определяется величина шунта-КЗ $\Delta x^{(n)}$ (табл. 2), который подключается к точке КЗ преобразованной схемы замещения прямой последовательности (рис.9).
4. Полученная схема вновь преобразуется к лучевому виду (например, с помощью коэффициентов токораспределения).

5. Определяется I_{*n0}, а затем все необходимые токи по выражениям (15-21). Для системы $I_{nt} - U_c / x_c = const$.

6. Для определений общего тока в месте КЗ суммируются токи от всех лучей схемы.

2.7. Определение ударного тока КЗ

Значение ударного тока и действующего значения ударного тока необходимо знать для проверки и выбора электротехнического оборудования в системе. Под ударным током понимается наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ.

В простых радиальных электрических схемах ударный ток трехфазного КЗ ($i_{уд}$) в кА следует определять по формуле

$$i_{уд} = m^{(n)}\sqrt{2}I_{n0}(1+e^{-\frac{0.01}{T_a}}) - \sqrt{2}m^{(n)}I_{n0}k_{уд} \quad (22)$$

где $К_{уд}$ - удельный коэффициент;

$Т_а$ - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, (табл. 4).

В сложных разветвленных электрических схемах ударный ток КЗ следует рассчитывать путем решения системы уравнение контурных токов или узловых потенциалов (при нулевых начальных условиях), составленных с учетом как индуктивных, так и активных сопротивлений всех элементов расчетной схемы.

При приближенных расчетах ударного тока КЗ в любой сложной схеме допускается использование формулы:

$$i_{уд} = I_{n0}(1+e^{-\frac{0.01}{T_{a,эк}}})m^{(n)} \quad (23)$$

где $Т_{а,эк}$- эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. .

Если точка КЗ делит схему на радиальные, не зависимые друг от друга ветви, то при приближенных расчетах ударный ток КЗ следует определять как сумму ударных токов отдельных ветвей:

$$i_{уд} = \sum_{i=1,n}\sqrt{2}I_{n0}(1+e^{-\frac{0.01}{T_{ai}}})m^{(n)} \quad (24)$$

где $I_{n0,i}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i-й ветви

Действующее значение ударного тока можно определить по выражению:

$$I_{уд} = m^{(n)}I_{n0}k \quad (25), \text{ где } \quad k = \sqrt{1+2(k_y-1)^2}$$

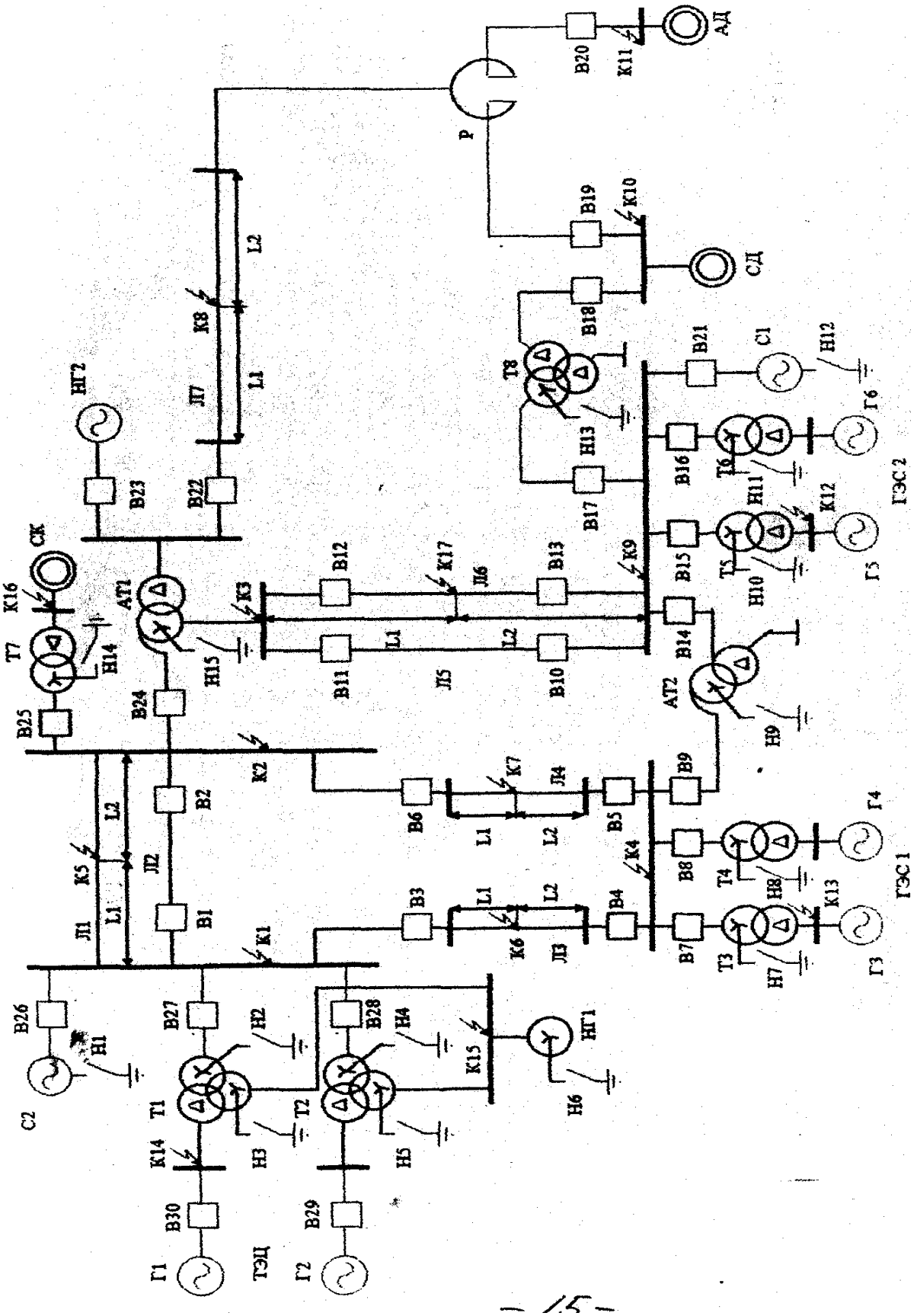
3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ

Темы, выносимые на самостоятельное изучение по курсу

№	Наименование темы

п/п	
1	Симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Основные положения и формулы. Суть применения метода симметричных составляющих для расчета переходных режимов.
2	Однократная поперечная несимметрия. Двухфазное КЗ. Однофазное КЗ. Двухфазное КЗ на землю. Правило эквивалентности прямой последовательности. Комплексные схемы замещения. Практический расчет тока при несимметричных КЗ. Сравнение видов КЗ по величине тока. Применение практических методов к расчету несимметричных КЗ. Определение фазных величин токов и напряжений в любой точке сети.
3	Основные понятия и определения: режим ЭЭС, параметры режима и параметры системы. Требования, предъявляемые к установившимся и переходным режимам. Понятие устойчивости электрической системы.
4	Уравнения электромеханических процессов в синхронных генераторах. Уравнения электромеханических процессов в синхронных и асинхронных двигателях. Моменты сопротивления приводов.

4. ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ



Варианты коммутации	Выключатели В, находящиеся во включенном состоянии	Номер КЗ для раздела	Сечение	Вид КЗ для разделов	Номер КЗ для раздела	Номер КЗ для разделов	Номера замкнутых нейтралей

		1 задания		2,4 задания	3 задания	2,4 задания	
1	1-8; 10-13; 21; 23; 24; 27-30	К5	К13	1/2	К17	К5	4; 7; 12; 15
2	1-9; 14-18; 25; 26	К9	К10	1.1/1	К13	К1	1;7; 9; 10;13;14
3	1-8; 10-13; 16;21; 23; 24; 27;30	К14	К13	1.1/1	К9	К5	2; 7; 11; 12; 15
4	3-14; 17-23	К17	К8	1/2	К10	К7	6-9; 13; 15
5	1; 2; 8-16; 23-27	К3	К12	1/1.1	К4	К5	1;2;8-10;14;15
6	3; 4; 7-15; 21; 23; 24; 27; 30	К15	К12	1/1.1	К13	К1	2;3;6;7;9;15
7	1; 2; 10-20; 22-26	К2	К12	1.1/2	К17	К5	1;10;13-15
8	1; 2; 5; 6; 8-14; 17; 18; 21; 23; 24; 27-30	К5	К15	1/2	К17	К3	2; 3; 6; 8; 9; 12; 13; 15
9	3-9; 12-14; 16-20; 23; 24; 26	К10	К13	1.1/1	К6	К9	1; 7; 9;11;13;15
10	7-14; 17-22; 24-26	К11	К13	1.1/1	К8	К17	8; 9; 12-15
11	1-6; 9-18; 20; 22; 24; 26	К8	К12	1.1/2	К8	К1	1; 9; 13; 15
12	1; 2; 8-14; 17-20; 22; 24; 27-30	К4	К10	1.1/1	К14	К2	2; 3; 6; 8; 9; 15
13	7-20; 24-26	К13	К16	1.1/1	К5	К9	1; 7-9; 11;13-15
14	3-6; 9; 12-15;17-19;22-24;27-30	К14	К12	1.1/1	К8	К4	2-6; 10; 13; 15
15	1-14; 19;20; 22-24; 26	К4	К8	1/2	К10	К5	1; 7-9; 15

Наименование	Рн, МВт	cosφ	Uн, кВ	X”d, о.е.	X_2, о.е.	Та, с	Предшествующий режим		
							U_0, о.е.	I_0, о.е	$cosφ_0$
Г1, Г2	220	0,85	15,75	0,1906	0,232	0,311	1	0,9	0,82
Г3, Г4	40	0,8	10,5	0,16	0,2	0,142	0,9	0,98	0,8
Г5, Г6	25	0,85	10,5	0,18	0,22	0,187	1	0,96	0,84

Наименование	Sн, МВА	$U_{НВ}$, кВ	$U_{НС}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	$U_{ВН-СН}$, кВ	$U_{ВН-НН}$, кВ	$U_{СН-НН}$, кВ
Т1, Т2	250	230				11	
Т3, Т4	80	242				10,5	
Т5, Т6	40	121				11	
Т7	125	242				11	
Т8 с расщ. обм.	80	115			10,5	30	
АТ1	125	230	121	6,3	11	47	26
АТ2	125	230	121	11	11	45	28

Наименование	$P_н$, МВт	$cosφ_н$	$U_н$, кВ	X”d, о.е.	X_2, о.е.	Та, с	Количество	Предшествующий режим

								U_0, о.е.	U_0, о.е.	U_0, о.е.
АД	3,125	0,9	6	0,88	0,86		5	1	0,97	0,89
СД	1,25	0,86	6	0,88	0,89	0,036	5	1	0,97	0,89
СК	60	0,8	11	0,23	0,26	0,145		1,1	1	0,8

Реактор	$U_н$, кВ	$I_н$, кА	$X_р$, %	$K_{СВ}$
Р	6	23	12	0,5

Наименование	$U_Н$, кВ	R, Ом/км	X_1, Ом/км	L, км
Л1, Л2	230			200
Л3	230			50
Л4	230			100
Л5, Л6	110			80
Л7	6	0,129	0,07	2,6

Наименование	$S_{КЗ}$, МВА	$S_Н$, МВА	$U_Н$, кВ	E_0, о.е.	X_1, о.е.	X_2, о.е.	X_0, о.е.
С1	1500			1	0,85	0,87	$2,5X_1$
С2	8000			1,15	0,95	0,97	$2,6X_1$
НГ1		200	110	0,85	0,35	0,45	0,07
НГ2		10	6	0,85	0,35	0,45	0,45

План-график выполнения задания.

Работа над расчетно-графической работой может быть представлена в виде выполнения следующих этапов:

№ п/п	Наименование этапа	Сроки выполнения
1.	Получение задания	На первом практическом занятии
2.	Первичная консультация с преподавателем	На первом практическом занятии
3.	Работа с информационными источниками	В течении семестра
4.	Написание контрольной работы	В течении семестра
5.	Предоставление контрольной работы на кафедру	В течении семестра
6.	Собеседование	На последнем практическом занятии

Критерии оценивания работы.

В целях повышения качества выполняемых РГР преподаватель руководствуется следующими критериями оценивания письменных работ студентов.

Оценка «отлично» выставляется студенту, если

- своевременно выполнил работу; использовал актуальную основную и дополнительную литературу, нормативные акты;
- представил обоснование выбранной методики расчета; выбрал верную последовательность выполнения работы;
- произвел точные расчеты; предоставил обоснованные выводы по работе.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если

- своевременно выполнил работу; использовал достаточно актуальную основную и дополнительную литературу, нормативные акты; представил верную методику расчета;
- выбрал верную последовательность выполнения работы; произвел точные расчеты; предоставил выводы по работе.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если

- выполнил работу не вовремя; использовал неактуальную основную и дополнительную литературу, нормативные акты;
- представил верную методики расчета;
- выбрал верную последовательность выполнения работы; произвел неточные расчеты;
- не предоставил обоснованные выводы по работе.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если

- несвоевременно выполнил работу;
- использовал неактуальную основную и дополнительную литературу, нормативные акты;
- выбрал неверную последовательность выполнения работы;
- произвел неточные расчеты со значительными ошибками;
- не предоставил обоснованные выводы по работе.

Порядок защиты работы.

Написанная студентом расчетно-графическая работа сдается на кафедру. Студент защищает расчетно-графическую работу до экзамена (зачета) перед преподавателем.

Работа не допускается к защите, если она не носит самостоятельного характера, основные вопросы не раскрыты, изложены схематично, фрагментарно, в тексте и расчетах содержатся ошибки, работа не оформлена согласно общим требования.

В ходе защиты расчетно-графической работы задача студента — показать углубленное понимание вопросов конкретной темы, хорошее владение материалом по теме.

Защита расчетно-графической работы проходит в форме индивидуальной беседы студента с преподавателем по основным положениям работы.

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

10.1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по организации и проведению самостоятельной работы обучающихся
по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

Введение

1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины

2 План-график выполнения самостоятельной работы

3 Контрольные точки и виды отчетности по ним

4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала

5 Список рекомендуемой литературы.

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины

«Переходные процессы в электроэнергетических системах»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;
- выполнение расчетно-графической работы.

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

Задачами самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

Цель самостоятельного решения задач - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

Задачами самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;

- развитие исследовательских умений.

Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

Задачами данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании ргр.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов	ИД-2$_{ПК-2}$ Рассчитывает режимы работы систем электроснабжения	Знает физику электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах Умеет анализировать результаты расчета электромагнитных переходных процессов для применения в реальных электроэнергетических системах и системах электроснабжения Владеет навыками расчета типовых переходных процессов

План-график выполнения самостоятельной работы
Технологическая карта самостоятельной работы студента

Код реализуемой компетенции	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки*	Обьем часов, в том числе		
				СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
6 семестр ОФО						
ПК-2 ИД-2$_{ПК-2}$	Самостоятельное изучение литературы по разделам	Конспект	Собеседование	35,52	3,88	39,4
	Подготовка к практическим занятиям	Конспект	Собеседование	3,24	0,36	3,6
	Подготовка к лабораторным занятиям	Отчет	Собеседование	4,8	0,6	5,4
	Подготовка к лекциям	Конспект	Собеседование	3,24	0,36	3,6
	Выполнение самостоятельного расчета	Отчет по РГР	Защита	18	2	20
Итого за 6 семестр				**64,8**	**7,2**	**72**
6 семестр ЗФО						
ПК-2 ИД-2$_{ПК-2}$	Самостоятельное изучение литературы по разделам	Конспект	Собеседование	127,26	14,14	141,4
	Подготовка к практическим занятиям	Конспект	Собеседование	0,72	0,08	0,8
	Подготовка к лабораторным занятиям	Отчет	Собеседование	1,08	0,12	1,2
	Подготовка к лекциям	Конспект	Собеседование	0,54	0,06	0,6
	Выполнение самостоятельного расчета	Отчет по РГР	Защита	11,7	1,3	13
Итого 6 семестр				**141,3**	**15,7**	**157**

Контрольные точки и виды отчетности по ним

В рамках рейтинговой системы успеваемость студентов по каждой дисциплине оценивается в ходе текущего контроля и промежуточной аттестации.

При проведении текущего контроля рейтинговая оценка знаний студента оценивается следующим образом:

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
6 семестр			
1.	Практическое занятие № 3	6 неделя	25
2.	Лабораторное занятие № 3	10 неделя	15
3.	Практическое занятие № 8	16 неделя	15
	Итого за 6 семестр		**55**
	Итого		**55**

Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	**100**
Хороший	**80**
Удовлетворительный	**60**
Неудовлетворительный	**0**

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту

сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

Методические указания по подготовке к расчетно-графической работе

Расчетно-графическая работа – это самостоятельная письменная работа студента, которая должна показать не только его владение теоретическим материалом, но и продемонстрировать практические умения проводить расчеты.

Цели выполнения РГР заключаются:

- закрепить и систематизировать теоретические знания и практические навыки студента;
- научить работать с литературой – изучать, анализировать информацию из научных источников;

При выполнении расчетно-графической работы реализуются следующие компетенции:

Код	Формулировка
ПК-2 ИД-$2_{ПК-2}$	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов Рассчитывает режимы работы системы электроснабжения объекта

Методические указания по подготовке к экзамену

Изучение дисциплины «**Переходные процессы в электроэнергетических системах**» завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания. На экзамене студент демонстрирует то, что он приобрел в процессе обучения по конкретной учебной дисциплине.

На консультации перед экзаменом студентов познакомят с основными требованиями, ответят на возникшие у них вопросы. Поэтому посещение консультаций обязательно.

При подготовке к экзамену необходимо использовать конспекты лекций по дисциплине, учебники и учебные пособия (из списка основной и дополнительной литературы) или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.

Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

Вопросы к экзамену 6 семестр

1. Основные сведения об электромагнитных переходных процессах.
2. Основные определения.
3. Назначение расчетов и требования к ним. Основные допущения. Понятие о расчетных условиях.
4. Система относительных единиц
5. Составление схем замещения. Преобразование схем замещения.
6. Применение принципа наложения.
7. Мощность короткого замыкания.
8. Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих. Приближенное решение.
9. Переходный процесс в простейших трехфазных цепях
10. Начальный момент внезапного нарушения режима.
11. Переходные ЭДС и реактивности синхронной машины.
12. Сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины
13. Характеристики двигателей и нагрузки.
14. Практический расчет начального сверхпереходного и ударного токов.
15. Уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины. Допущения, используемые при исследовании электромагнитного переходного процесса.
16. Уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины. Исходные уравнения.
17. Индуктивности обмоток синхронной машины.
18. Обобщенный вектор 3-х фазной системы.
19. Замена переменных.
20. Преобразование уравнений.
21. Выражения в операторной форме.
22. Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных обмоток.
23. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток.

24. Влияние АРВ при внезапном коротком замыкании.
25. Каскадное отключение и повторное отключение короткого замыкания.
26. Взаимное электромагнитное влияние синхронной машины при переходном процессе.
27. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания.
28. Приближенный учет системы.
29. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности.
30. Метод расчетных кривых.
31. Метод спрямленных характеристик.
32. Несимметричные короткие замыкания
33. Применяемость метода симметричных составляющих к исследованию переходного процесса.
34. Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей.
35. Синхронные машины. Асинхронные двигатели.
36. Обобщенная нагрузка. Трансформаторы. Воздушные линии.
37. Продольная несимметрия. Разрыв одной фазы.
38. Продольная несимметрия. Разрыв 2-х фаз.
39. Несимметрия от включения сопротивлений.
40. Правило эквивалентности прямой последовательности.
41. Комплексные схемы замещения. Схемы отдельных последовательностей.
42. Распределение напряжений. Применение принципа наложения.

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине " Переходные процессы в электроэнергетических системах ".
2. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине " Переходные процессы в электроэнергетических системах ".
3. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине " Переходные процессы в электроэнергетических системах ".
4. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы по дисциплине " Переходные процессы в электроэнергетических системах ".

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. http://www.biblioclub.ru -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. http://www.iprbookshop.ru/ - Электронно- библиотечная система IPRbooks
3. http://elibrary.ru/ - eLIBRARY.RU - НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Специальное программное обеспечение не требуется.

Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Специализированная учебная мебель и технические средства обучения, служащие для представления учебной информации: набор для демонстрационного оборудования, учебно-наглядные пособия.

Лабораторный стенд «Интелектуальные электрические сети» ИЭС2.

Информационные справочные системы:

1. http://docs.cntd.ru/ Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации ТЕХЭКСПЕРТ
2. Профессиональные справочные системы Техэксперт http://vuz.kodeks.ru/