

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:45:39

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

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

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

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	
Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора.....	6
Лабораторная работа № 2	
Простые замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью.....	12
Лабораторная работа № 3	
Двухфазное короткое замыкание.....	17
Лабораторная работа № 4	
Однофазное короткое замыкание.....	24
Лабораторная работа № 5	
Расчет несимметричных КЗ на модели постоянного тока.....	29
Лабораторная работа № 6	
Однократная продольная несимметрия.....	43
Лабораторная работа № 7	
Двухфазное короткое замыкание на землю.....	53
Лабораторная работа № 8	
Учет взаимоиндукции линий электропередач в схемах нулевой последовательности.....	58
Лабораторная работа № 9	
Короткие замыкания на стороне выпрямленного тока.....	65
Лабораторная работа № 10	
Изучение модели-анализатора электрических систем.....	70

Основные правила техники безопасности в лаборатории электротехники и электроники

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранный схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

1. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование или приборы с других рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в $0,025\text{ А}$ уже является опасным для жизни.

Лабораторная работа № 1

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.

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 электро-снабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Ин-	Формулировка:
декс	

ПК-2	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов
------	---

Инди- каторы до- стижения компетенций	ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта
--	--

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 электро-снабжения. 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 $m \cdot 30^\circ$ 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)

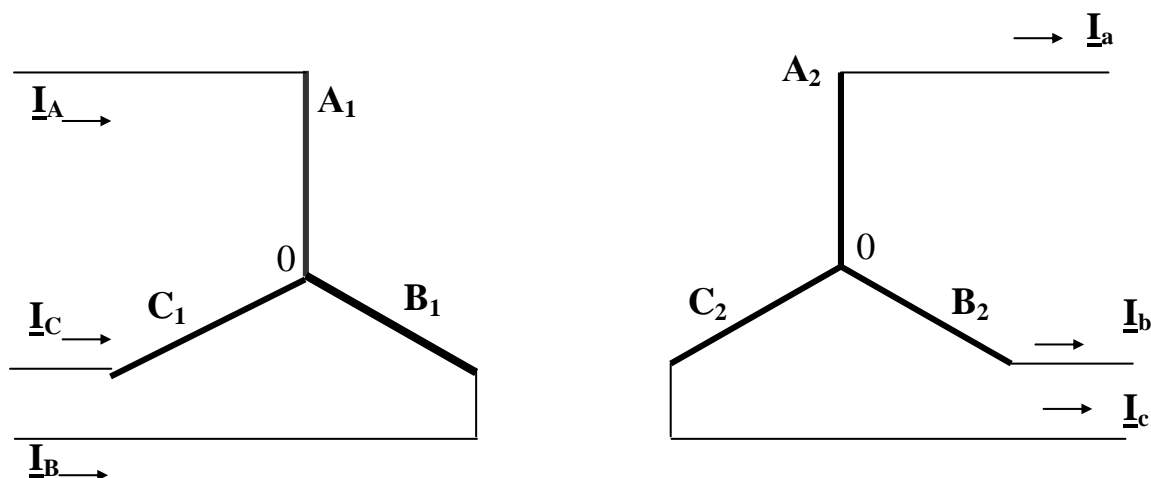


Рис. 1.1. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y-12

Коэффициент трансформации схемы Y/Y-12 $K = W_1/W_2$. Угловые смещения токов и напряжений по фазам на стороне I обмотки и II обмотки отсутствуют.

Векторные диаграммы напряжений при $K = 1$ приведены на рис. 1.2а при симметричном режиме (симметричная нагрузка по фазам или трехфазное КЗ) и токов (рис. 1.2б) при переходе через трансформатор с группой соединения обмоток Y/Y-12.

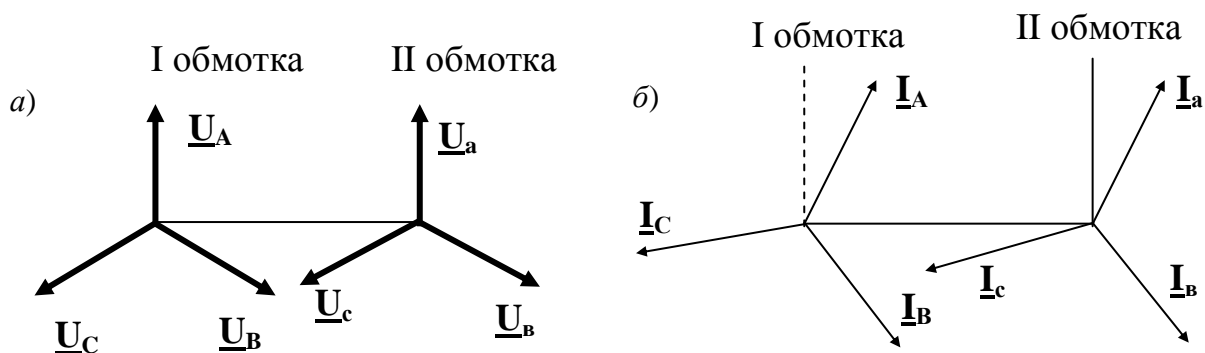


Рис. 1.2. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при переходе через трансформатор Y/Y-12 при симметричном режиме его работы

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:

$$\begin{aligned}\underline{I}_a &= \underline{I}_{ac} - \underline{I}_{ba} = (\underline{I}_A - \underline{I}_B) W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_A - \underline{I}_B) K / \sqrt{3}; \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{ba} - \underline{I}_{cb} = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) K / \sqrt{3}; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{cb} - \underline{I}_{ca} = (\underline{I}_C - \underline{I}_A) W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_C - \underline{I}_A) K / \sqrt{3}.\end{aligned}\quad (1.1)$$

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

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

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

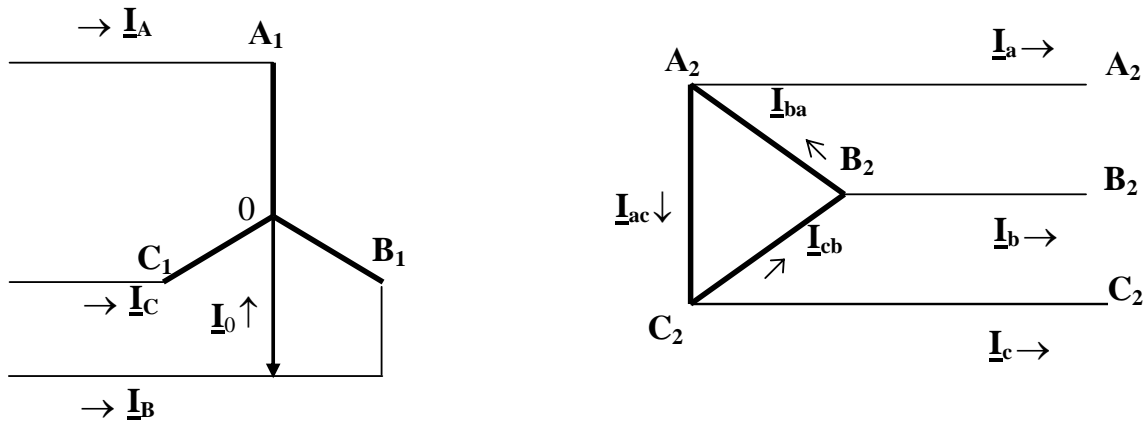


Рис. 1.3. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ-11

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:

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

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 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности на 30° 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.**

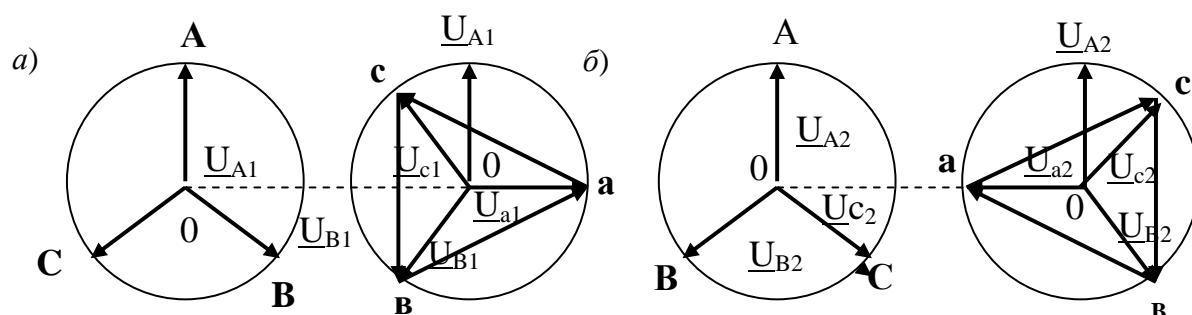
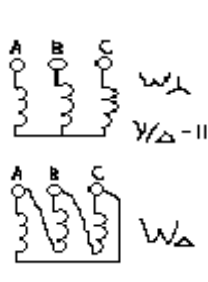
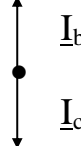
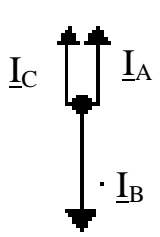


Рис. 1.4. Сдвиг векторов напряжений прямой (а) и обратной (б) последовательности для трансформатора с соединением обмоток Y/Δ-11

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		$I_a = \frac{3U_\phi}{Z_T^{(1)}}$		$I_A = 2/3 I_a$ $I_B = I_C = 1/3 I_a$
	b-c		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}$		$I_B = I_C = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)} = 0,866 I^{(3)}$

	b-c		$\underline{I}_b = \underline{I}_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}$		$I_A = I_C = \frac{I_B}{2}$ $I_B = \frac{2}{\sqrt{3}} I_b = I^{(3)}$
---	------------	---	--	--	--

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 Y₀/Y₀-12:

1.1. Соединить обмотки трансформатора в группу Y₀/Y₀-12, 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 Y₀/Δ-11:

2.1. Соединить обмотки трансформатора в группу Y₀/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				
	Y ₀ / Y ₀ -12			Y ₀ /Δ-11	
	K ⁽³⁾	K ⁽²⁾	K ⁽¹⁾	K ⁽³⁾	K ⁽²⁾

Первичная сторона					
I_A, A					
I_B, A					
I_C, A					
I_0, A					
U_A, B					
U_B, B					
U_C, B					
U_{AB}, B					
U_{BC}, B					
U_{CA}, B					

Продолжение табл. 1.2

Измеряемая величина	Схемы соединения обмоток трансформатора и виды КЗ				
	Y0 / Y0-12			Y0/Δ-11	
	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$
Вторичная сторона					
I_a, A					
I_b, A					
I_c, A					
U_a, B					
U_b, B					
U_c, B					
U_{ab}, B					
U_{bc}, B					
U_{ca}, B					
I_0, A					

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 Y0/Δ-11 и Y0 / Y0-12?
3. Чему равны токи на стороне треугольника трансформатора с соединением Y0/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	Y0 / Y0-12		Y0/Δ-11	
	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
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.

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

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.

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 электро-снабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс

Формулировка:

ПК-2

Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов

Индика-

торы достиже-
ния компетен-
ций

ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта

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 непо-

врежденным 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. 2.1а.

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. 2.1б)

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 R_d будет:

$$\underline{I}_k = 3 \frac{\underline{U}_{ф.ср.}}{3 R_d - j X_c}, \quad (2.1)$$

где $X_{сac}$ – 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.

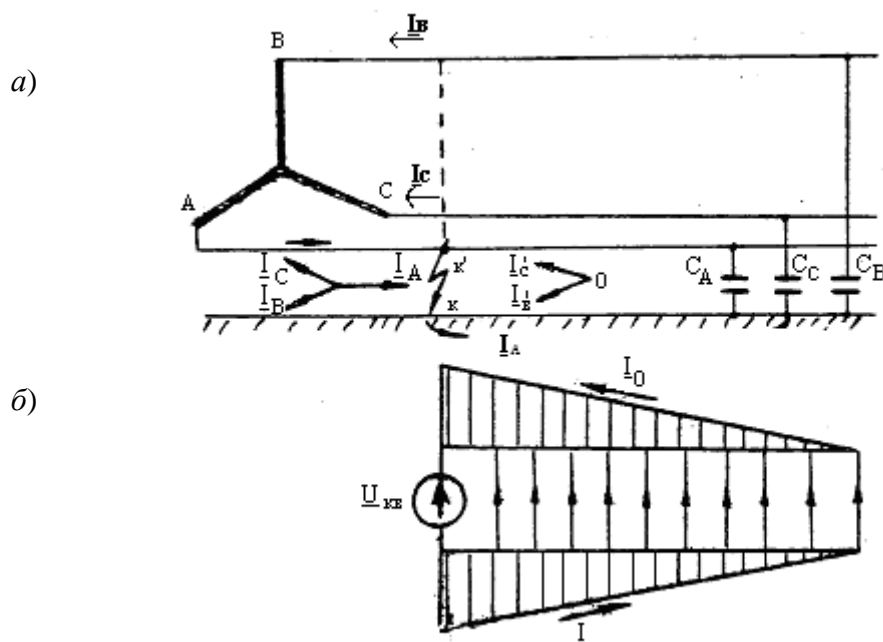


Рис. 2.1. Простое замыкание на землю: а – принципиальная схема; б – эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности

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

$$I_k = 3 \frac{U_{ф.ср.}}{jX_{сac}}, \quad (2.2)$$

т. е. ток в три раза превышает емкостной ток одной фазы в нормальных условиях.

Для грубой оценки тока замыкания на землю служит импирическая формула:

$$I_k = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.}}{N} \cdot L, \text{ А}, \quad (2.3)$$

где $U_{ср.}$ – 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

$$U_{k'a1} = U_{ф.ср.}; \quad (2.4)$$

– для обратной последовательности

$$U_{k'a2} = 0; \quad (2.5)$$

– для нулевой последовательности

$$U_{\alpha'0} = \frac{jX_{сac}}{3R_d - jX_{сac}} U_{ф.ср.} \quad (2.6)$$

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 R_d 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.

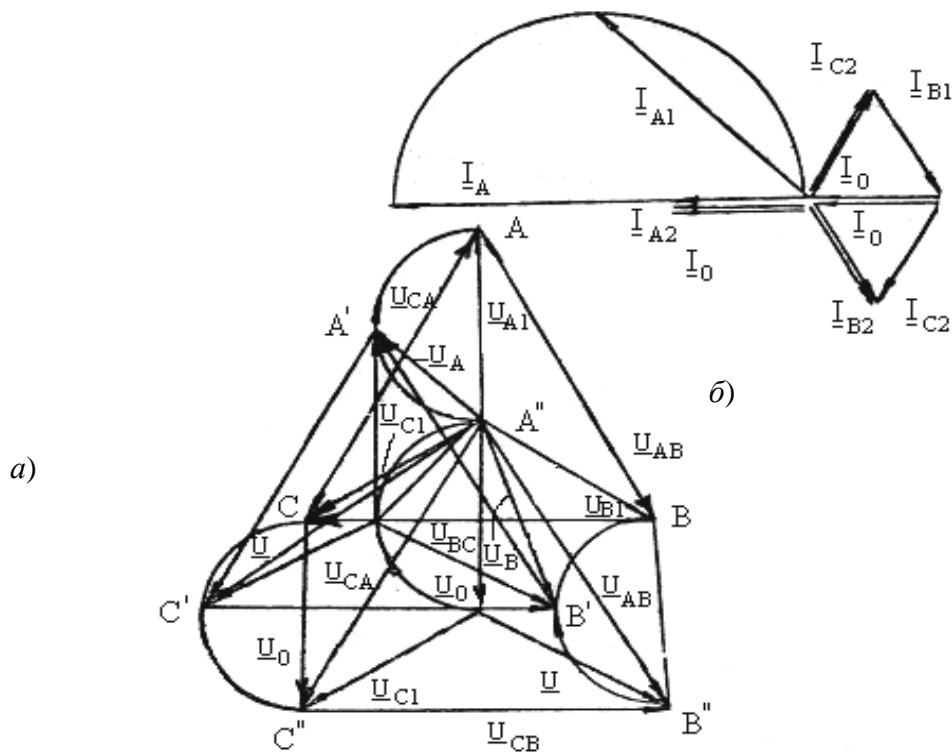


Рис. 2.2. Векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю

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 $X_{0c} = \infty$, 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	А	Воздушная	1
2	2	В	Кабельная	2
3	1	С	Воздушная	3
4	2	А	Кабельная	4
5	1	В	Воздушная	5
6	2	С	Кабельная	6
7	1	А	Воздушная	4
8	2	В	Кабельная	2
9	1	С	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. 2.3а с замыканием на землю фазы в соответствии с вариантом задания (табл. 2.1).

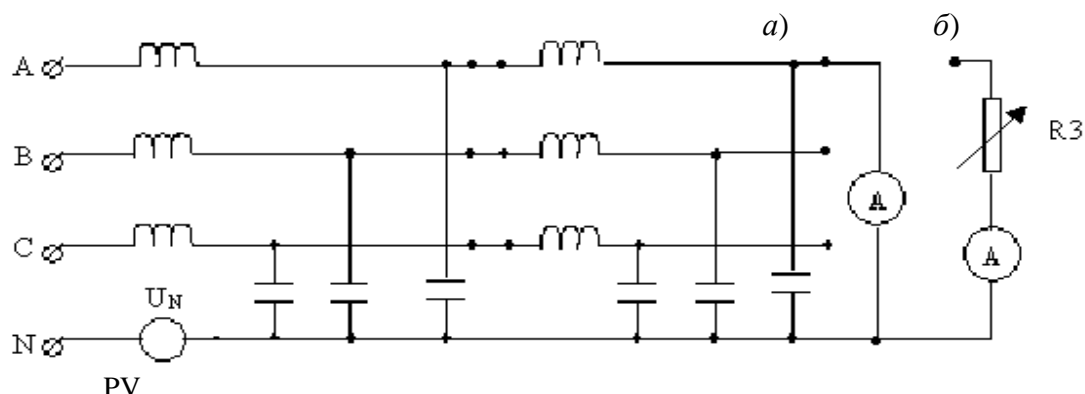


Рис. 2.3. Схема замыкания фазы на землю: а – металлическое замыкание на землю; б – замыкание через сопротивление R_3

5. Измерить линейные и фазные напряжения, напряжение смещения нейтрали U_N , ток замыкания на землю I_3 . 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_3 , используя метод симметричных составляющих, построить в масштабе векторную диаграмму токов.
8. По измеренной величине тока I_3 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 R_3
$U_{AB}, В$			
$U_{BC}, В$			
$U_{CA}, В$			
$U_A, В$			
$U_B, В$			
$U_C, В$			
$U_N, В$			
$I_3, А$			

9. Для заданной фазы произвести замыкание на землю через сопротивление R_3 (рис. 2.3б). Величина сопротивления R_3 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 R_3 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.

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

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.

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 электро-снабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс	Формулировка:
--------	---------------

ПК-2	Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов
------	---

Инди- каторы до- стижения компетенций	ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима системы электроснабжения объекта
--	--

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:

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

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:

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

Совместное решение уравнений (3.2) дает:

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

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:

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

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:

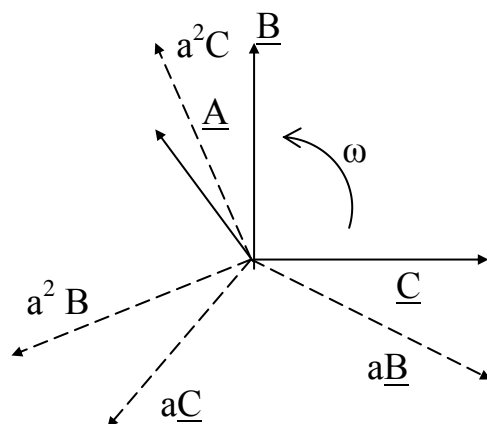
$$\begin{aligned} \underline{U}_{K1} &= \underline{E}_C - Z_{1c} \underline{I}_{K1}; \\ \underline{U}_{K2} &= 0 - Z_{2c} \underline{I}_{K2}; \\ \underline{U}_{K0} &= 0 - Z_{0c} \underline{I}_{K0}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где $\underline{U}_{K1}, \underline{U}_{K2}, \underline{U}_{K0}, \underline{I}_{K1}, \underline{I}_{K2}, \underline{I}_{K0}$ – симметричные составляющие напряжений и токов; \underline{E}_C – результирующая ЭДС; Z_{1c}, Z_{2c}, Z_{0c} – результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

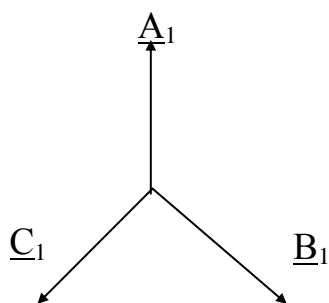
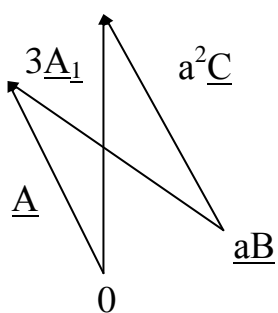
Уравнения (3.5) содержат шесть неизвестных величин: три составляющих напряжения и три составляющих тока. Недостающие уравнения для определения этих величин получают из граничных условий, которыми характеризуются тот или иной вид несимметричного КЗ.

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.

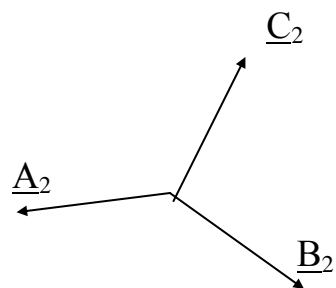
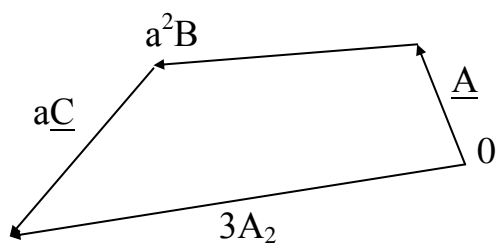
Исходная система



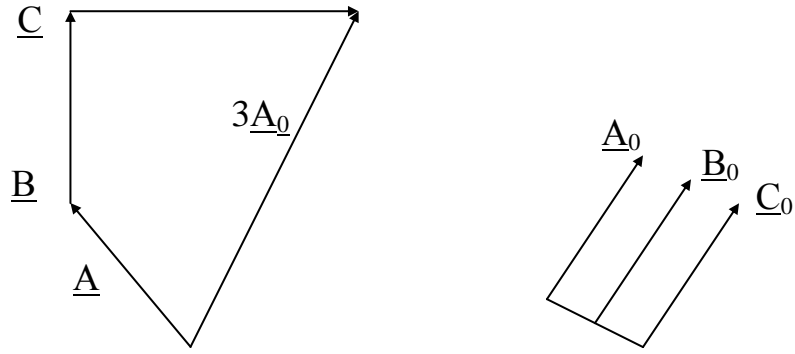
Прямая последовательность $3\underline{A}_1 = \underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}$.



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



Нулевая последовательность $3\underline{A}_0 = \underline{A} + \underline{B} + \underline{C}$.



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

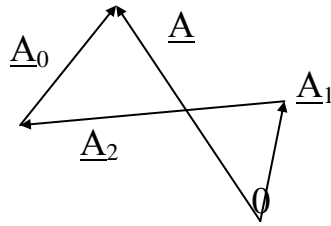


Рис. 3.1. Разложение несимметричной системы трех векторов на симметричные составляющие

2.3. Двухфазное короткое замыкание

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

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

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

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

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

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

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

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

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):

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

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

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

Фазные напряжения в месте КЗ:

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

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

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

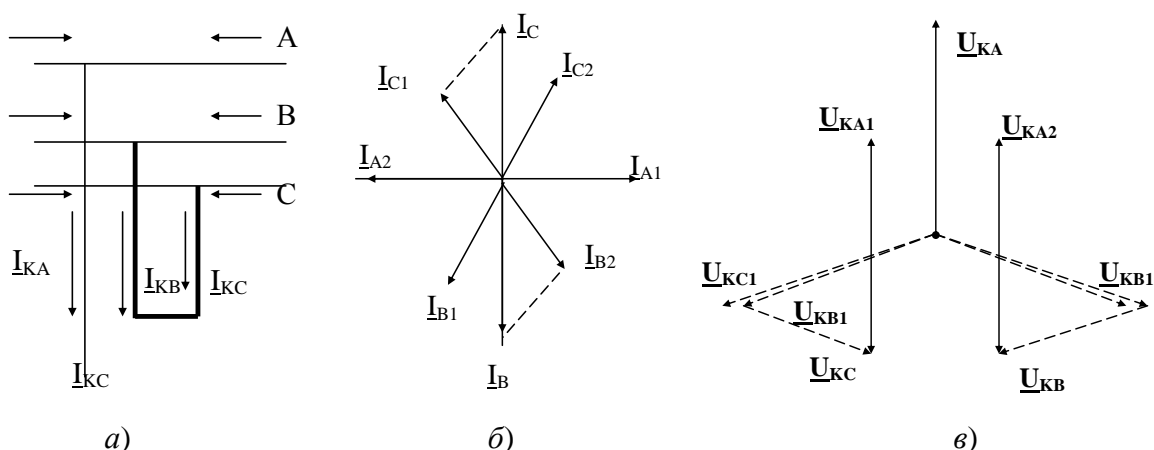


Рис. 3.2. Принципиальная схема (а), векторная диаграмма токов (б) и напряжений (в) двухфазного КЗ

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 ($A_K - B_K$ – для нечетных номеров бригад или $A_K - C_K$ – 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.

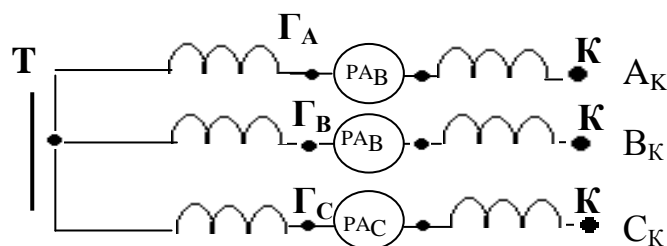


Рис. 3.3. Схема для измерения параметров двухфазного КЗ

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 a .
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
Ак – Вк (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

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

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:

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 электро-снабжения.

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 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:

$$\underline{U}_{KA1} = E_C - jI_{KA1} \cdot X_{1C};$$

$$\underline{U}_{KA2} = 0 - jI_{KA2} \cdot X_{2C};$$

$$\underline{U}_{KA0} = 0 - jI_{KA0} \cdot X_{0C},$$

где \underline{U}_{KA1} , \underline{U}_{KA2} , \underline{U}_{KA0} , I_{KA1} , I_{KA2} , 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. 4.1а) в сети с глухозаземлённой нейтралью граничными условиями будут:

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

Симметричные составляющие токов в фазе А будут:

а) прямой последовательности:

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

с учетом граничных условий (4.1):

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

б) обратной последовательности:

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

в) нулевой последовательности:

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

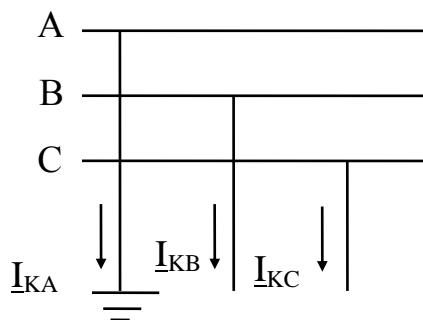
Таким образом: $\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA0} = \frac{1}{3} \underline{I}_{KA}.$

Ток в поврежденной фазе (через землю):

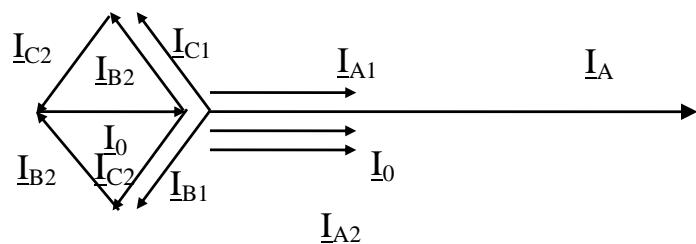
$$\underline{I}_{KA} = 3 \underline{I}_{KA1}. \quad (4.2)$$

Напряжение поврежденной фазы А:

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



а)



б)

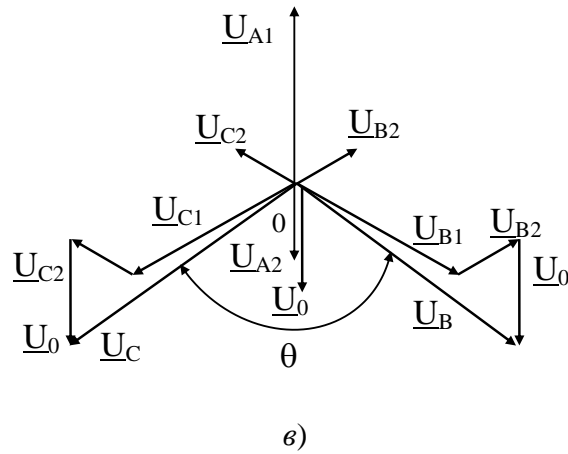


Рис. 4.1. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б), напряжений (в) однофазного КЗ

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания:

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

Фазные напряжения в месте короткого замыкания:

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

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 $60^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$. 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.

-

Таблица 4.1

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

30

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

Таблица 4.3

Результаты измерений и вычислений

КЗ фазы	Измеренные величины								Вычис- лено
	U_A, B	U_B, B	U_C, B	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	U_2, B	U_0, B	

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?

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

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:

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 электро-снабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс Формулировка:

ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов

Инди- ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима
каторы до- системы электроснабжения объекта
стижения
компетенций

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	При видах КЗ
-------------------------	--------------

их обозначение	двухфазном	однофазном	двухфазном на землю
Ток прямой последовательности \underline{I}_{A1}	$\frac{\underline{E}_{Ac}}{j \cdot (x_{1c} + x_{2c})}$	$\frac{\underline{E}_{Ac}}{j \cdot (x_{1c} + x_{2c} + x_{0c})}$	$\frac{\underline{E}_{Ac}}{j \cdot (x_{1c} + x_{2c} + x_{0c})}$
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}	$j x_{2c} \underline{I}_{A1}$	$j (x_{2c} + x_{0c}) \cdot \underline{I}_{A1}$	$j \frac{x_{2c} \cdot x_{0c}}{x_{2c} + x_{0c}} \cdot \underline{I}_{A1}$
Напряжение обратной последовательности \underline{U}_{A2}	$j x_{2c} \underline{I}_{A1}$	$-j x_{2c} \underline{I}_{A1}$	$j \frac{x_{2c} \cdot x_{0c}}{x_{2c} + x_{0c}} \cdot \underline{I}_{A1}$
Напряжение нулевой последовательности \underline{U}_0	-	$j x_{0c} \underline{I}_{A1}$	$j \frac{x_{2c} \cdot x_{0c}}{x_{2c} + x_{0c}} \cdot \underline{I}_{A1}$

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:

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

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 $X(n)\Delta$ и коэффициента $m(n)$

Вид КЗ	Обозначение типа КЗ	Дополнительное сопротивление $X^{(n)}_{\Delta}$	Коэффициент $m^{(n)}$
Трёхфазное	(3)	0	1
Двухфазное	(2)	$j x_{2c}$	$\sqrt{3}$
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:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_k^n, \quad (5.2)$$

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_b 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.

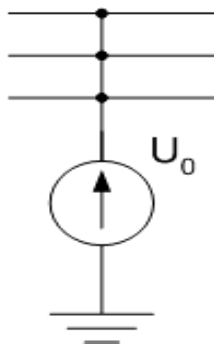


Рис. 5.1. Включение источника напряжения нулевой последовательности

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. 5.2а) 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.

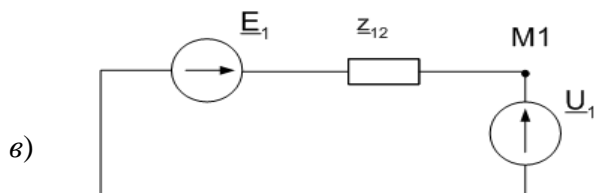
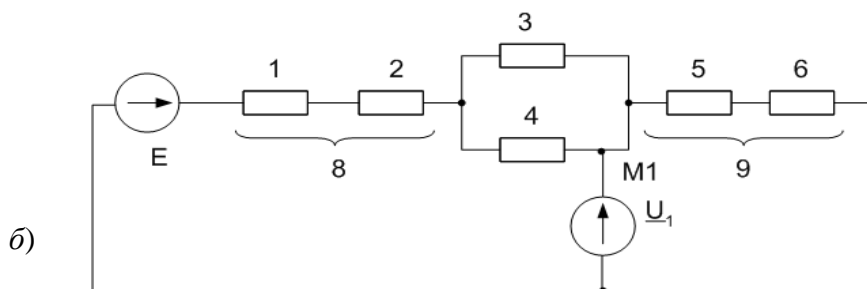
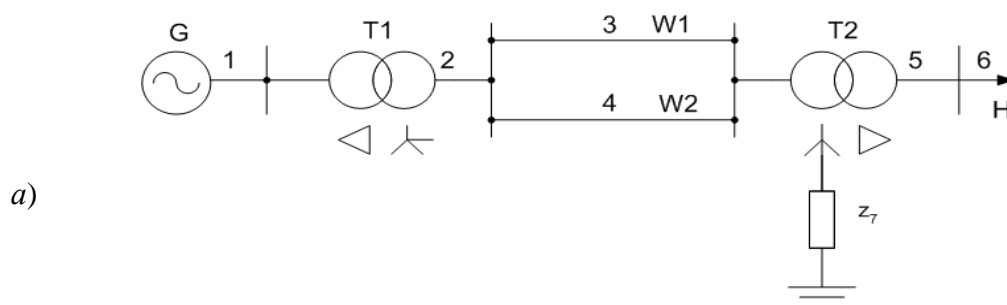
При несимметрии в точке М схема замещения прямой последовательности имеет вид, представленный на рис. 5.2б.

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 $E_n \neq 0$ и ветвь, получаемую сложением элемента 8 с параллельно соединенными элементами 3 и 4 и имеющую ЭДС E одной эквивалентной (рис. 5.2в). Схема обратной последовательности и ее преобразования аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников. Схему нулевой последовательности (рис. 5.2г) также преобразовываем путем последовательного и параллельного сложения ветвей.

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

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

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}. \quad (5.3)$$



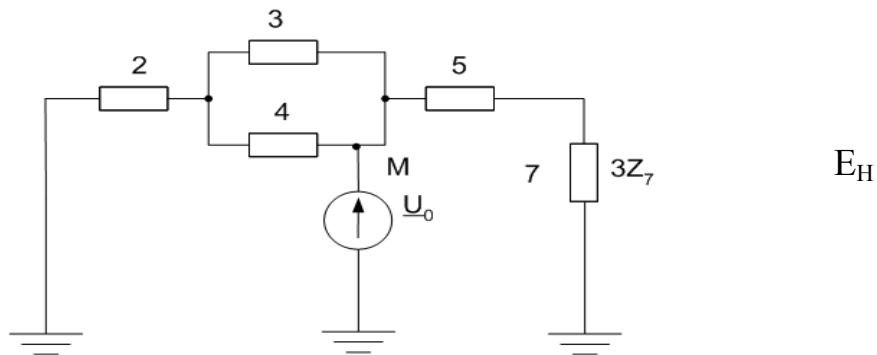


Рис. 5.2. Расчетная схема (а), схема замещения прямой последовательности (б), преобразованная схема замещения прямой последовательности (в), схема замещения нулевой последовательности (г)

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.

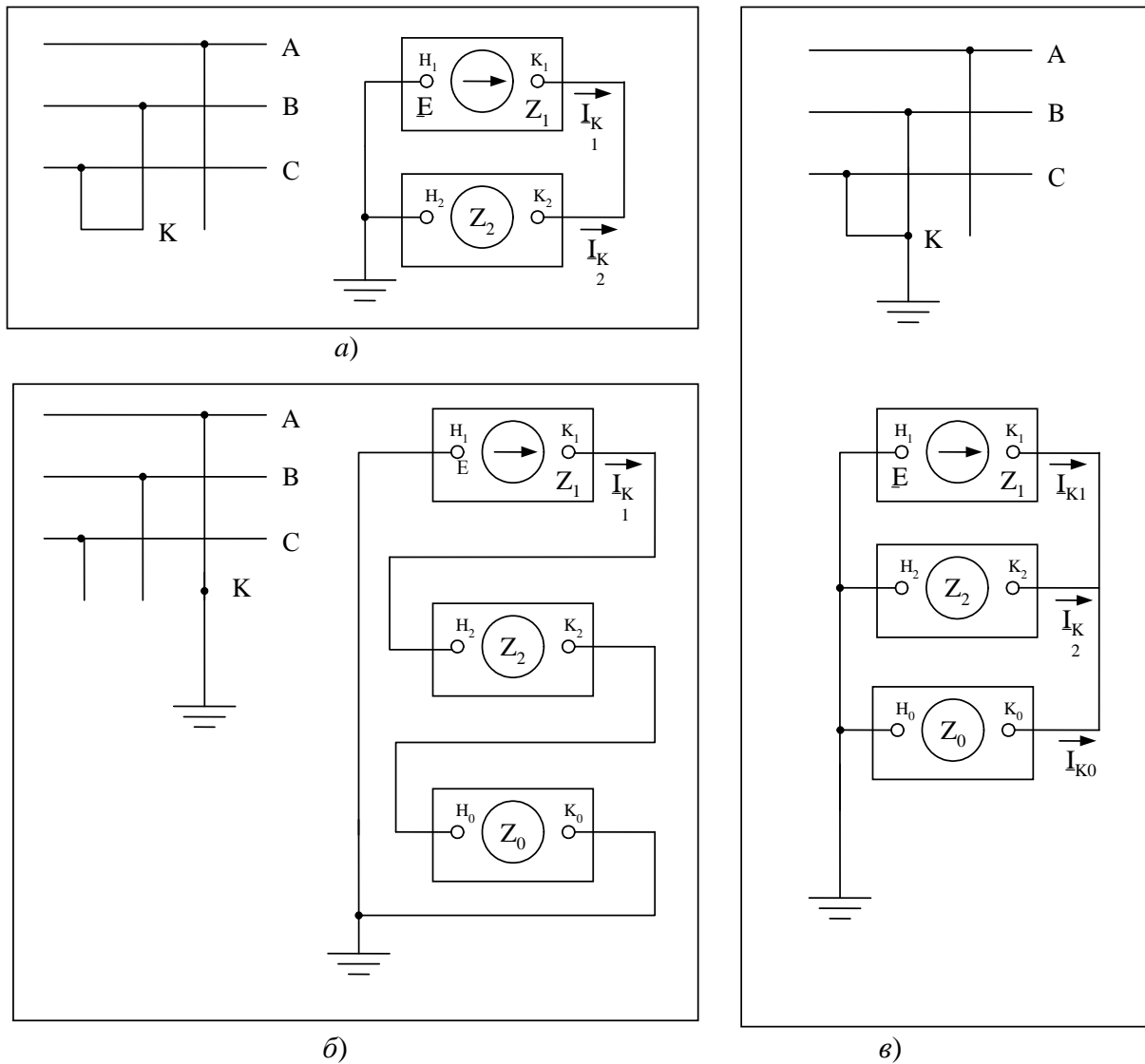


Рис. 5.3. Комплексные схемы замещения: а – для двухфазного КЗ; б – для однофазного КЗ; в – для двухфазного КЗ на землю

Нужно иметь в виду, что в комплексной схеме для однофазного КЗ (рис. 5.3б) 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 $Z_0 = \infty$ 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	K _{1, 115} K _{2, 230} K _{3, 115}	ТВ S _H = 125 МВА Cosφ = 0,8 U _H = 10,5кВ	X' _{dк} = 0,19 X _{2*} = 0,22
4 5 6 7 8 9	25 100 25 100 25 100	K _{1, 115} K _{1, 230} K _{2, 115} K _{2, 230} K _{3, 115} K _{3, 230}	-	-

Продолжение таблицы 5.3

Параметры элементов электрической системы									
		ЛЭП	Автотрансформатор				Нагрузка	Сис-тема	Реак-тор
Тип	U _к , %	X, Ом/км	Тип	U _к , %			S _H ' мВА	X _с , Ом	X _p %
				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 _{*H} = 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 происходит в точке К₃. 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 К₃; правая часть – система, нагрузка и автотрансформатор, расположенный справа от точки К₃.

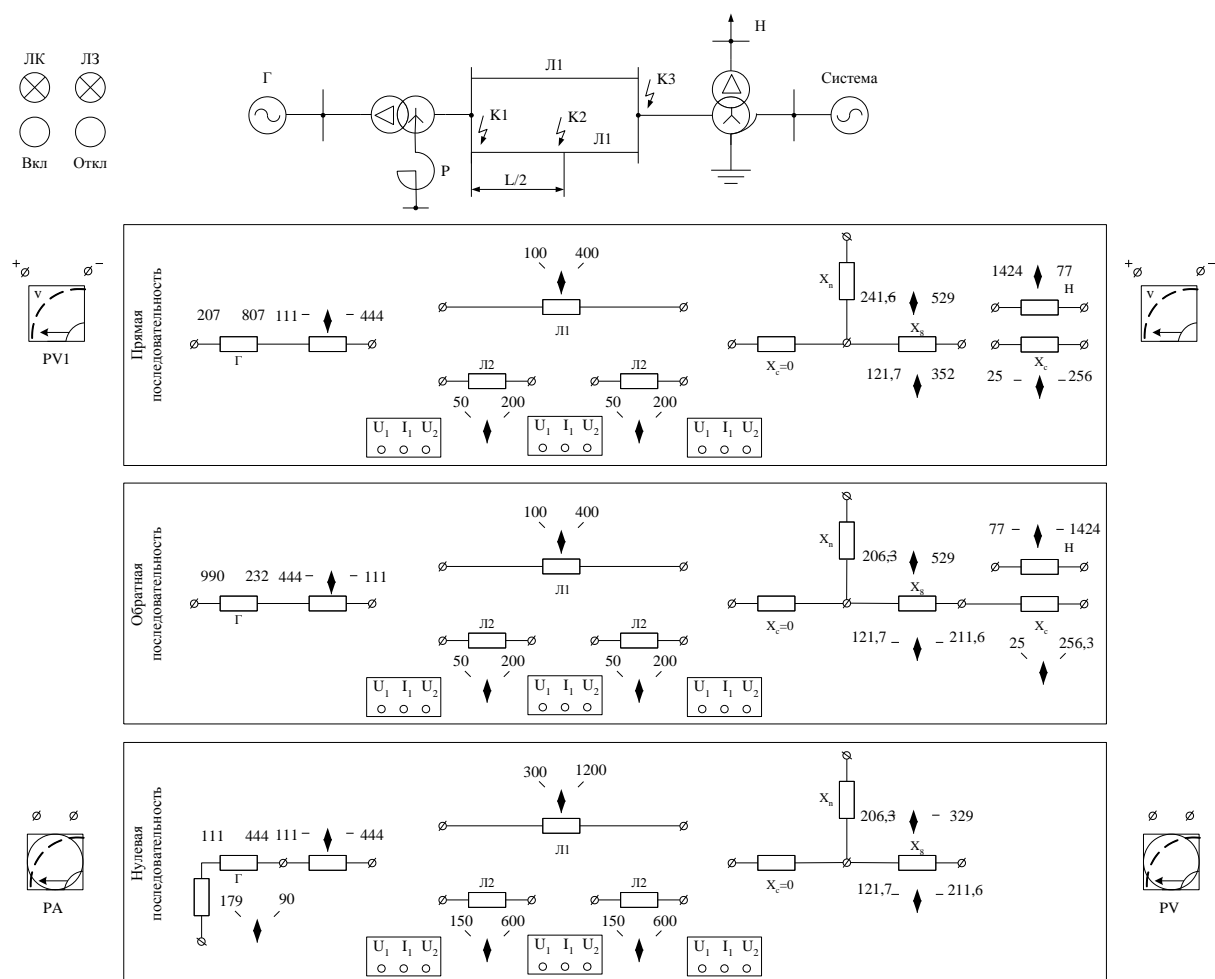


Рис. 5.4. Мнемоническая схема лабораторного стенда

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: $K^{(1)}$; $K^{(2)}$; $K^{(1,1)}$, 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

$$M_x = \frac{X_{\text{систем}}}{X_{\text{модел}}}, \quad (5.4)$$

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:

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

$U_{\text{мод}}$ – 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 K_3) и напряжения системы, т. е.

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

$$U_{\text{У.мод}} = \frac{U_e \cdot 10^3}{\sqrt{3}M_U}. \quad (5.7)$$

Выбранными масштабами сопротивлений и напряжений однозначно определяется масштаб токов

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

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 $K^{(2)}$, $K^{(1)}$.
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.

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

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	$E''_Г$	$X_T = X_{d*} \cdot S_{\bar{6}} / S_H$ $E''_Г = U_{*Г} + I_{HГ*} \cdot X''_{d*} \cdot \sin \varphi$	$E''_Г = 0$ $X_2 = X_{2Г*} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H}$	$E''_Г = 0$	$U_{Г*} = 1$; $I_{HГ*} = 1$ X''_{d*}, X_{d*} $\sin \varphi = 0,8$
Трансформатор	X_T	$X_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$	$U_k, \%$, S_H, MBA
Линия	X_L	$X_1 = \ell \cdot S_{\bar{6}} / U_{\text{ср.н.}}^2$	$X_2 = X_1$	$X_0 = 3X_1$	X_0, l
Авто-трансформатор	X_B X_C X_H	$X_1 = \frac{U_{\text{кв. \%}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{HB}}$ $X_1 = \frac{U_{\text{кв. \%}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{HC}}$ $X_1 = \frac{U_{\text{кв. \%}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{HH}}$	$X_2 = X_1$ $X_2 = X_1$ $X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$ $X_0 = X_1$ $X_0 = X_1$	$U_{\text{кв. \%}} = \frac{1}{2}(U_{BH} + U_{BC} - U_{CH})$; $U_{\text{кв. \%}} = \frac{1}{2}(U_{BC} + U_{CH} - U_{BH})$; $U_{\text{кв. \%}} = \frac{1}{2}(U_{BH} + U_{HC} + U_{BC})$;
Нагрузка обобщенная	E''_{OH}, X''_{OH}	$E''_H = 0,80$; $X_1 = 0,35 \frac{S_{\bar{6}}}{S_H}$;	$E''_H = 0$; $X_2 = X_1$	$E_H = 0$; $X_0 = \infty$;	S_{OH}, MBA
Нагрузка двигателя	$E''_g; X''_g$	$E''_g = 0,9$; $X_1 = 0,2 \frac{S_{\bar{6}}}{S_H}$;	$E''_g = 0$; $X_2 = X_1$	$E''_g = 0$; $X_0 = \infty$;	S_g, MBA
Система	U_c X_c	$U_c = 1$ $X_c = 0$	$U_c = 0$ $X_2 = X_1$	$U_c = 0$ $X_0 = 0$	$S_c = \infty$
Реактор заземляющий	X_p	—	—	$X_0 = 3X_p \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср.н.}}^2}$	$X_p, \text{Ом}$

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

Элемент системы	Расчетные параметры	Последовательность		
		прямая	обратная	нулевая
Генератор	$\overset{\circ}{E}''_{\Gamma}$	$\overset{\circ}{E}''_{*\Gamma} = U_{\Gamma} + I_{\text{нг}*} \cdot X''_{\text{д}*} \cdot \sin \varphi$ $\overset{\circ}{X}_{\Gamma} = X_{\text{д}*} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} \cdot K^2$ $\overset{\circ}{E}''_{\Gamma} = E''_{*} \cdot U_{\text{н}}$	$\overset{\circ}{E}''_{\Gamma} = 0$ $\overset{\circ}{X}_2 = X_{2*} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} \cdot R_1^2$	$\overset{\circ}{E}''_{\Gamma} = 0$
Трансформатор	$\overset{\circ}{X}_{\text{Т}}$	$X_{\text{Т}} = \frac{U_{\text{к}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{В-Н}}^2}{S_{\text{н}}}$	$\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$	$\overset{\circ}{X}_0 = \overset{\circ}{X}_1$
Линия	$X_{\text{л}}$	$X_1 = X_0 \cdot 1$	$\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$	$\overset{\circ}{X}_0 = (2..5,5) \overset{\circ}{X}_1$
Авто-трансформатор	$X_{\text{в}}$ $X_{\text{с}}$ $X_{\text{н}}$	$\overset{\circ}{X}_1 = \frac{U_{\text{кв.}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НВ}}}$ $\overset{\circ}{X}_1 = \frac{U_{\text{кс.}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НС}}}$ $\overset{\circ}{X}_1 = \frac{U_{\text{кн.}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НН}}}$	$\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$ $\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$ $\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$	$\overset{\circ}{X}_0 = \overset{\circ}{X}_1$ $\overset{\circ}{X}_0 = \overset{\circ}{X}_1$ $\overset{\circ}{X}_0 = \overset{\circ}{X}_1$
Обобщенная нагрузка	$\overset{\circ}{E}''_{\text{н1}} \overset{\circ}{X}''_{\text{н}}$ $\overset{\circ}{E}''_{\text{н1}} \overset{\circ}{X}''_{\text{он}}$	$\overset{\circ}{E}''_{\text{он}} = 0,80 U_{\text{н}} \cdot K ;$ $\overset{\circ}{X}_1 = 0,35 \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} K^2 ;$	$\overset{\circ}{E}''_{\text{он}} = 0;$ $\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$	$\overset{\circ}{E}''_{\text{он}} = 0;$
Двигательная нагрузка	$\overset{\circ}{E}''_{\text{г}} \overset{\circ}{X}''_{\text{г}}$	$\overset{\circ}{E}''_{\text{г}} = 0,9 U_{\text{н}} \cdot K ;$ $\overset{\circ}{X}_1 = 0,2 \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} \cdot K^2 ;$	$\overset{\circ}{E}''_{\text{г}} = 0;$ $\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$	$\overset{\circ}{E}''_{\text{г}} = 0;$
Система	$\overset{\circ}{U}_{\text{с}}$ $\overset{\circ}{X}_{\text{с}}$	$\overset{\circ}{U}_{\text{с}} = U_{\text{с}} \cdot K$ $X_1 = X_{\text{с}} \cdot K$	$\overset{\circ}{U}_{\text{с}} = 0$ $\overset{\circ}{X}_2 = \overset{\circ}{X}_1$	$\overset{\circ}{U}_{\text{с}} = 0$ $X_0 = 0$
Заземляющий реактор	$\overset{\circ}{X}_{\text{Р}}$	—	—	$X_0 = 3X_{\text{Р}}$

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.

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 электро-снабжения.

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: 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:

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{LA1} &= \underline{E}_{Ac} - jX_{L1c} \cdot \underline{I}_{LA1}; \\ \Delta \underline{U}_{LA2} &= 0 - jX_{L2c} \cdot \underline{I}_{LA2}; \\ \Delta \underline{U}_{L0} &= 0 - jX_{L0c} \cdot \underline{I}_{L0},\end{aligned}\tag{6.1}$$

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 ре-

активности 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. 6.1а) можно характеризовать следующими граничными условиями:

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

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

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

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

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

В соответствии с (6.2) можно записать:

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

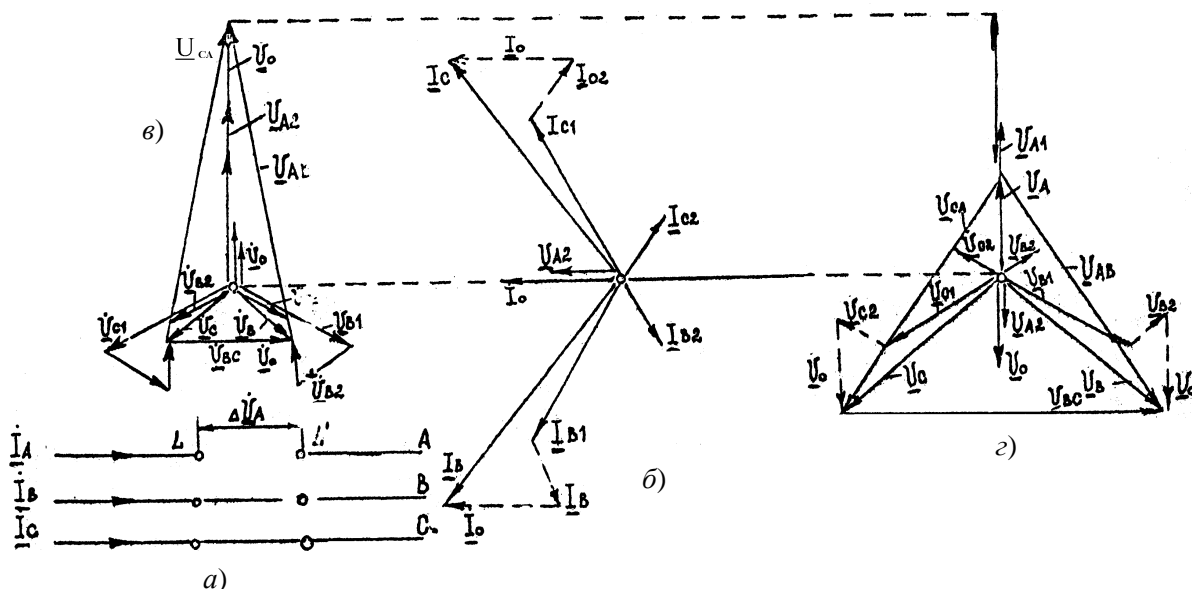


Рис. 6.1. Разрыв одной фазы трёхфазной цепи: а – исходная схема; б – векторная диаграмма токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи; в и г – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно, в точках L и L')

После подстановки (6.4) в (6.5) получим:

$$\Delta U_{-LA1} = jX_{\Delta L}^{(1)} \cdot I_{-LA1};$$

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

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

$$I_{LA1} = -\frac{E_{AC}}{j(X_{L1C} + X_{AL}^{(1)})}. \quad (6.7)$$

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

$$I_{LA2} = \frac{X_{L0C}}{X_{L2C} + X_{L0C}} \cdot I_{LA1}; \quad (6.8)$$

$$I_{L0} = \frac{X_{L2C}}{X_{L2C} + X_{L0C}} \cdot I_{LA1}. \quad (6.9)$$

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 ΔU , 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:

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

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

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

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

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

2.2. Разрыв двух фаз

При разрыве двух фаз (рис. 6.2а) 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:

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

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):

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

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

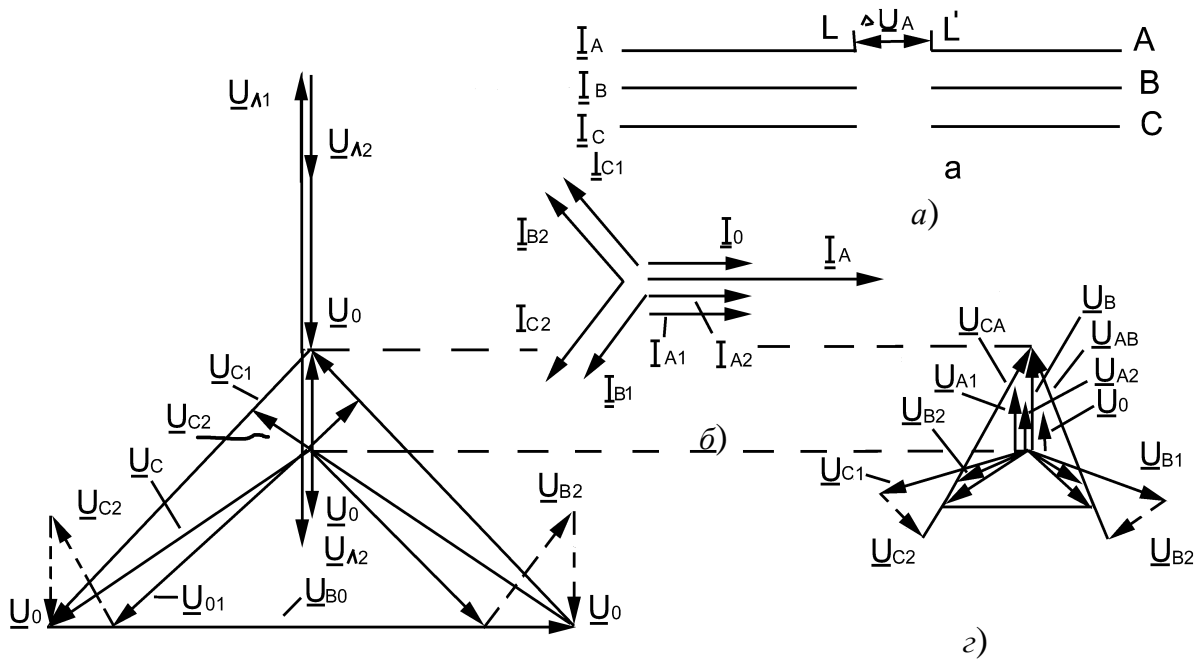


Рис. 6.2. Разрыв двух фаз трехфазной цепи:
 а – исходная схема; б – векторная диаграмма токов в месте разрыва; в и г – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно в точках L и LI)

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:

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

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке:

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

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_6 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 расщелку фазных проводов (рис. 6.3).

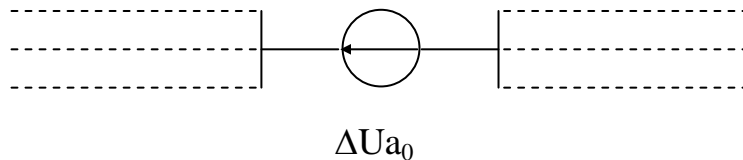


Рис. 6.3. Включение источника при разрыве фаз

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 нейтраль 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 результирующую ЭДС относительно той же точки.

При продольной несимметрии на конкретной схеме (рис. 6.4а) проследим, как составляется схема замещения каждой последовательности.

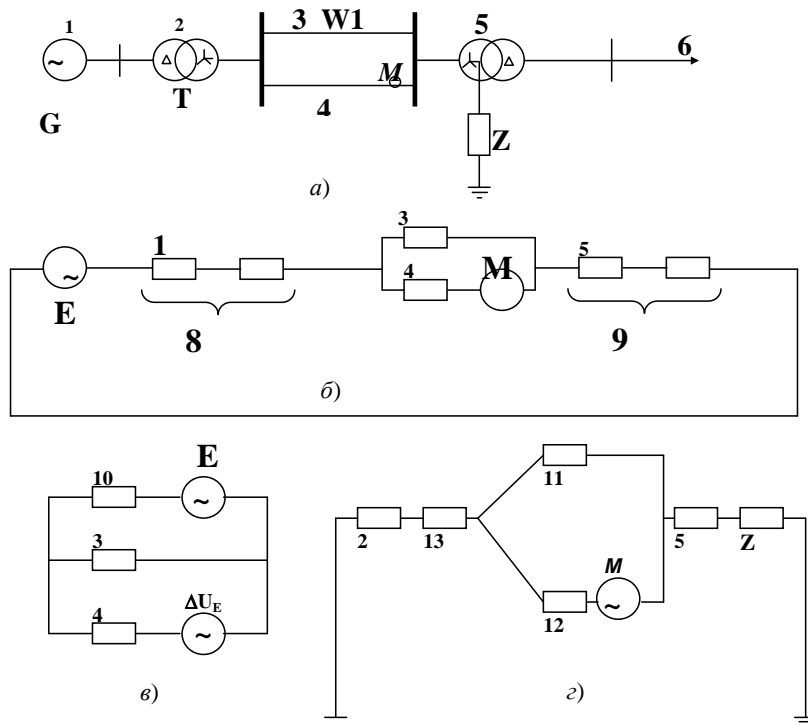


Рис. 6.4. Простейшая схема электрической сети (а) и схемы замещения для прямой (б, в) и нулевой последовательности (з) при продольной несимметрии

Пусть в точке N возникла продольная несимметрия. В этом случае напряжение прямой последовательности в точке N должно быть введено в расщелку цепи элемента 4 (рис. 6.4б). Для определения результирующих ЭДС: сопротивления схемы относительно в данном случае необходимо вначале сложить последовательно элементы 8 и 9. Затем образовавшуюся ветвь 10 с ЭДС E и ветвь 3 (рис. 6.4в) 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. 6.4б); в ней лишь отсутствует ЭДС источника. Её результирующее сопротивление находится так же, как и схемы прямой последовательности.

В схему нулевой последовательности рис. 6.4з двухцепная линия введена своей трехлучевой схемой замещения, с элементами 11, 12, 13, с тем, чтобы учесть взаимную индукцию 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 $X_{OL}^{(n)}$ 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:

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

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 замещения, соединить между собой схемы отдельных последовательностей.

Такие схемы приведены на рис. 6.5а,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.

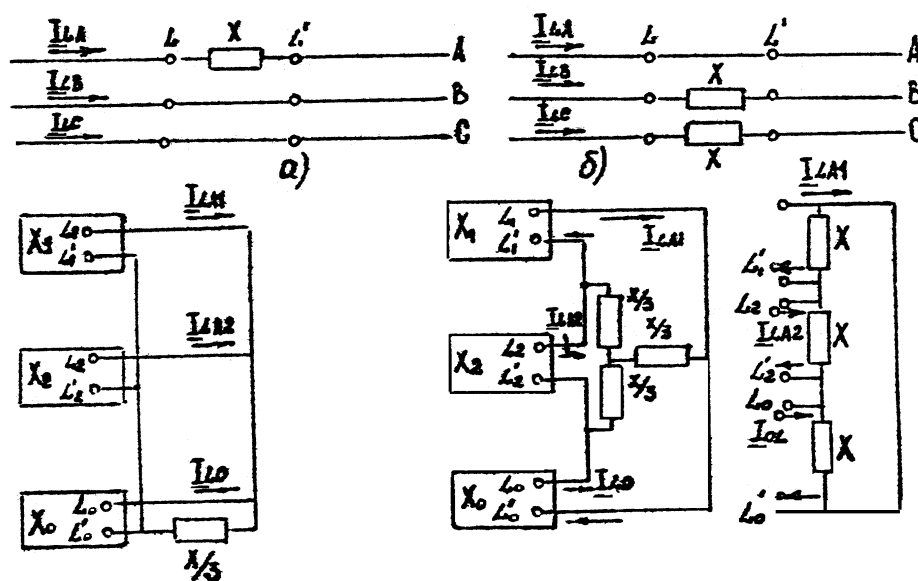


Рис. 6.5. Комплексные схемы замещения: а – при наличии сопротивления в одной фазе; б – при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах

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 несимметрии, 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 диаграммы 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 преподавателем.
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 соотношения 6. Контрольные вопросы

1. теории симметричных составляющих при разложении трехфазной системы на симметричные составляющие при продольной несимметрии.
2. Каковы граничные условия и соотношения для симметричных 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 изменение 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 именованных единицах, приведенных к ступени напряжения, на которой рассматривается однократная продольная несимметрия.
5. Численные значения масштабов – M_x , M_v , M .
6. Комплексные схемы замещения для всех видов несимметрии со значениями параметров схем замещения, выраженные в соответствии с масштабами M_x и M_v .
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 масштабов.
9. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте возникшей несимметрии, полученные с помощью модели при рассмотрении 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.

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

12.

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 электропитания.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс

Формулировка:

ПК-2

Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов

Инди-

ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима

каторы до-

системы электроснабжения объекта

стижения

компетенций

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. 7.1а) граничные условия будут:

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

Найдем симметричные составляющие напряжений:

а) прямой последовательности:

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

с учетом граничных условий:

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

б) обратной последовательности:

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

в) нулевой последовательности:

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

Таким образом:

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

Основные уравнения между ЭДС и падениями напряжений отдельных последовательностей будут:

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

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

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

Из теории симметричных составляющих для тока фазы А имеем:

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

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:

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

Аналогично определим ток обратной последовательности:

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

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:

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

Токи поврежденных фаз в месте КЗ будут:

$$\underline{I}_{KB} = \left(a^2 - \frac{X_{2C} + aX_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} \right) \underline{I}_{KA1}, \quad (7.8)$$

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

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 $1,5 \leq m \leq \sqrt{3}$. Нижний предел наступает при $X_{2C} \leq X_{0C}$, верхний при равном 0 или ∞ .

На векторной диаграмме токов угол θ может изменяться в пределах $60^\circ < \theta < 180^\circ$, стремясь к нижнему пределу при $X_{0C} \rightarrow 0$, и к верхнему пределу при $X_{0C} \rightarrow \infty$, 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. 7.1в.

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. 7.1б.

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. 7.1в), 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?

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

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.

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 электро-снабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс Формулировка:

ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов

Индикаторы ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима
достижения системы электроснабжения объекта
компетен-
ций

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

2. Краткая теория

Неучет взаимоиנדукции 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 взаимоиנדукцией между двумя питающими линиями, например, вида провод-земля, можно вычислить по формуле:

$$Z_M = R_3 + jX_m = 0,05 + j 0,451 \lg \frac{D_3}{d} ; \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, \quad (8.1)$$

где D_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 взаимной индукции. При этом сопротивление взаимной индукции между проводом одной цепи (например, фазой А) и тремя проводами (А, В, С) другой цепи определяется из выражения:

$$Z_{1-2} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{1-2}}; \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, \quad (8.2)$$

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

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

Для расчёта систем с взаимной индукцией 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. 8.1а). Запишем для него с учётом выбранного положительного направления токов уравнения для падения напряжения:

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

$$\Delta \underline{U}_{20} = \underline{I}_{20} \cdot jX_{20} + \underline{I}_{10} \cdot jX_{2-20},$$

где X_{1-20} – реактивность взаимной индукции; 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. 8.1б, 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. 8.1в). 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. 8.1г).

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:

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

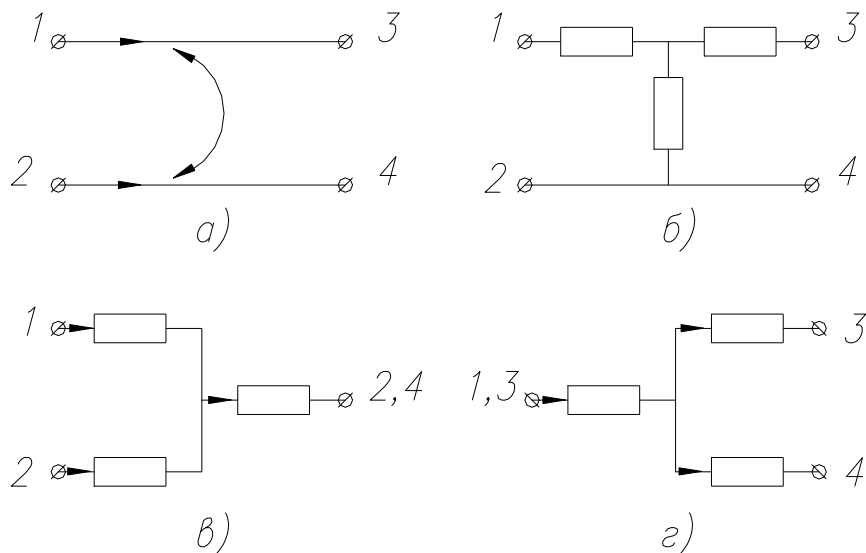


Рис. 8.1. Принципиальная схема замещения нулевой последовательности участка двухцепной линии электропередачи

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.:

$$jX_{\Sigma 10} = \frac{\Delta U_{10}}{I_{10}} = jX_{10} \pm \frac{I_{20}}{I_{10}} \cdot jX_{1-20},$$

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

$$\frac{X_{\Sigma 10}}{X_{10}} = 1 \pm \frac{I_{20}}{I_{10}} \cdot \frac{X_{1-20}}{X_{10}}.$$

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 $\frac{I_{20}}{I_{10}}$ 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, MVA	Cosφ	U, кВ	X _d ^{//}	U _K , %	U _{ВН} , %	U _{ВС} , %	U _{СН} , %	X ₀₁	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: $3X_p = 0$, $3X_m$, $4,5X_m$, $7,5X_m$, $9X_m$, $22X_m$, $13,5X_m$, $16,5X_m$. $X_m = 5,5 \text{ Ом}$ – 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.

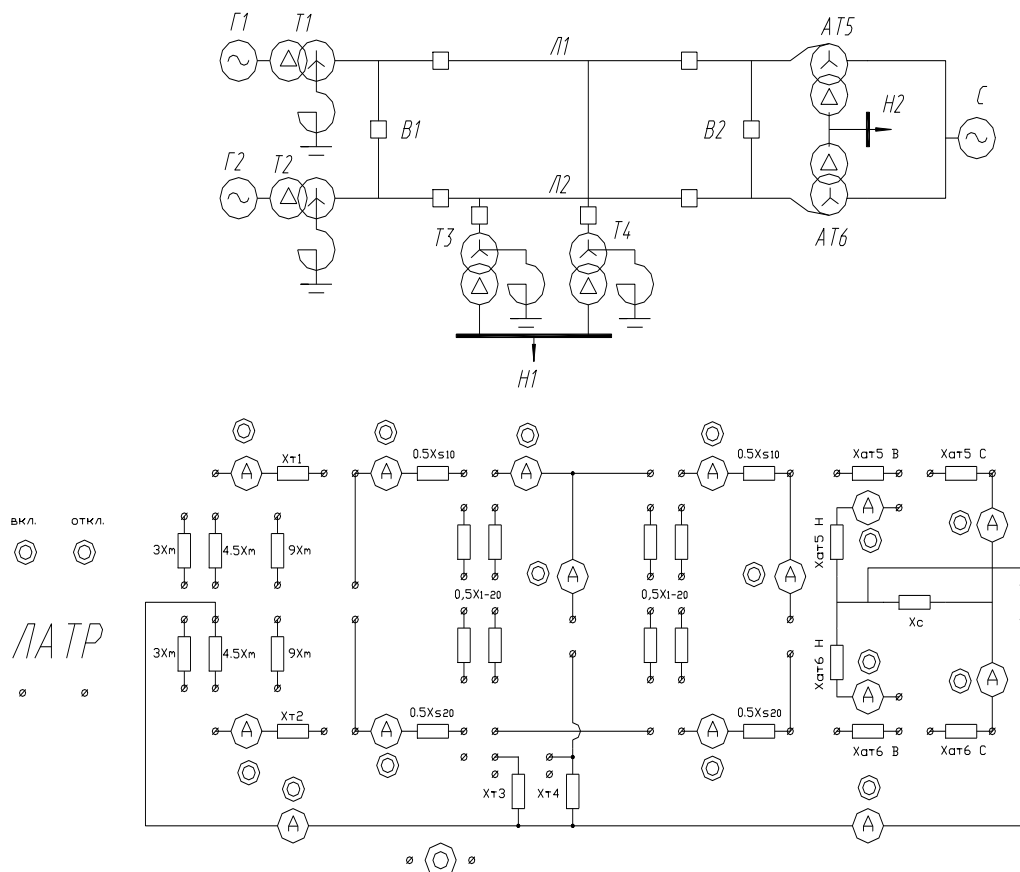


Рис. 8.2. Мнемоническая схема лабораторного стенда

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 взаимоиндукции 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. 4.1а,б.
4. Эпюры напряжений для заданного преподавателем варианта задания.

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

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.

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 электро-снабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Формируемые компетенции:

Индекс Формулировка:

ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения объектов

Индикаторы ИД-3ПК-2 Обеспечивает заданные параметры режима
достижения системы электроснабжения объекта
компетен-
ций

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 вы-

прямления (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 вентилей; $U_{обр}$ – 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_T – 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 уравни- тельным 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

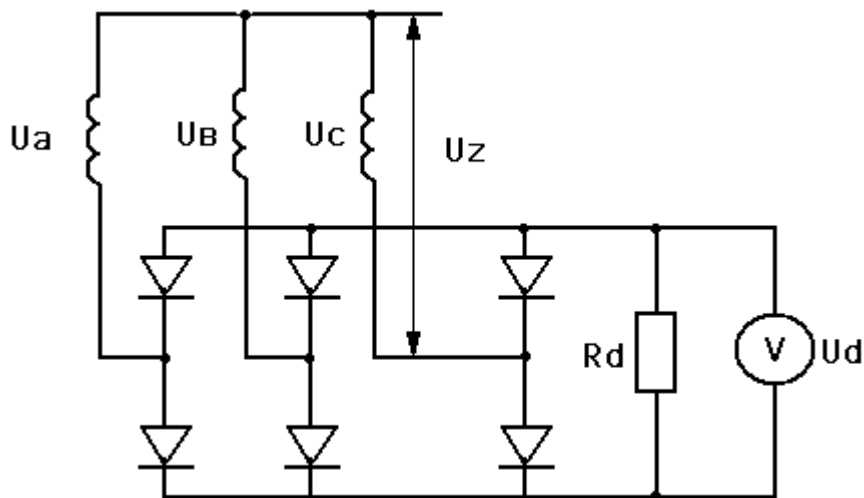
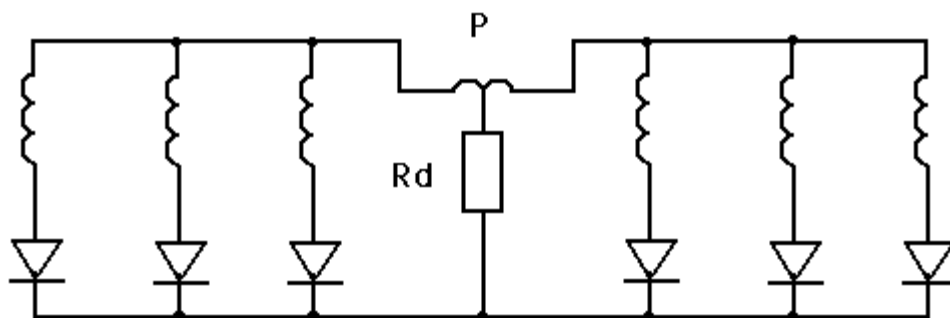


Рис. 9.1. Трехфазная мостовая схема (схема Ларионова)



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 вентильях, питающих место КЗ:

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

где U_2 – фазное напряжение анодной цепи, x_2 – индуктивное сопротивление цепи коммутации.

Для схемы с уравнительным реактором $n = 6$

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

Для трехфазной мостовой схемы $n = 3$

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

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

$$Id_{kyd} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \frac{S_{HH}}{X_*};$$

ток в мостовой схеме:

$$Id_{kmdkM} = \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \frac{S_{HH}}{X_*}.$$

С учетом активных сопротивлений

$$Id_{kyd} = 2,7 \frac{U_2}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}};$$

$$I_{dkm} = 1,35 \frac{U_2}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}};$$

установившийся ток КЗ имеет пульсирующий характер. Максимальное значение этого тока: $I_{dkm} = \frac{\pi}{3} I_{dk}$.

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 R_d).

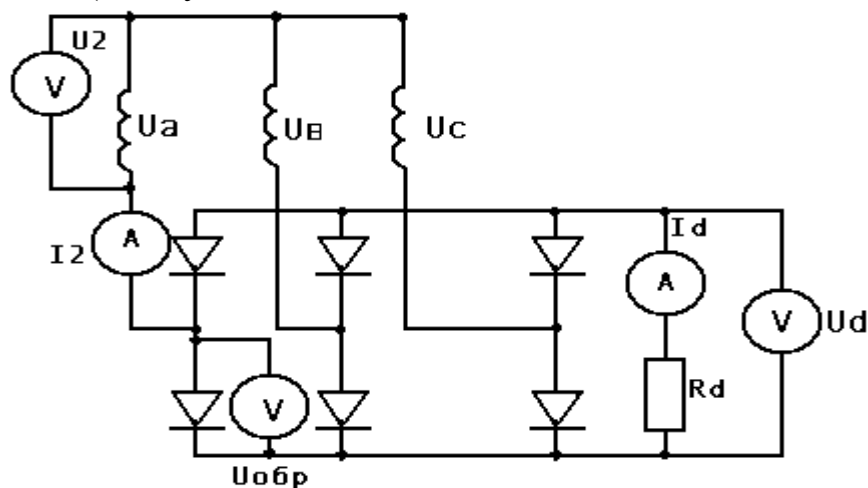


Рис. 9.3 Мостовая схема

3.2. Схема с уравнительным реактором

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

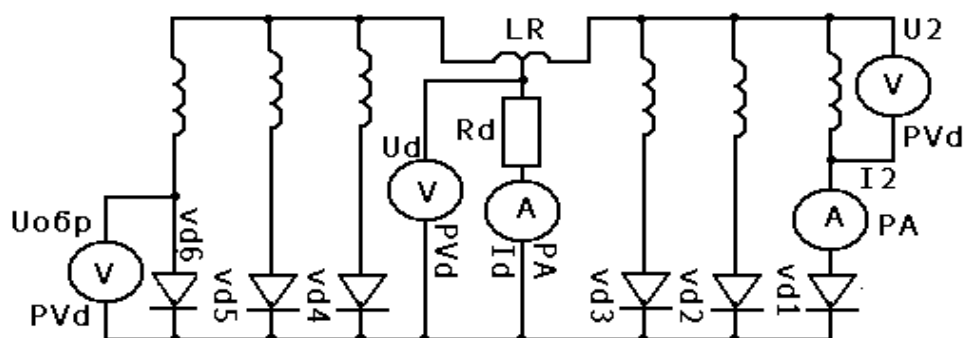


Рис. 9.4 Схема с уравнительным реактором

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 вентиля по току и обратному напряжению. Сравнить условия работы вентиля 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)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

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

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 электрических 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 компетен- ций	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 частей 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 занимают сопротивления на ближайшей части поля коммутационного с нужными номиналами. После того, как проставлены номера всех сопротивлений, проставляются но-

мера 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 отличаться 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.

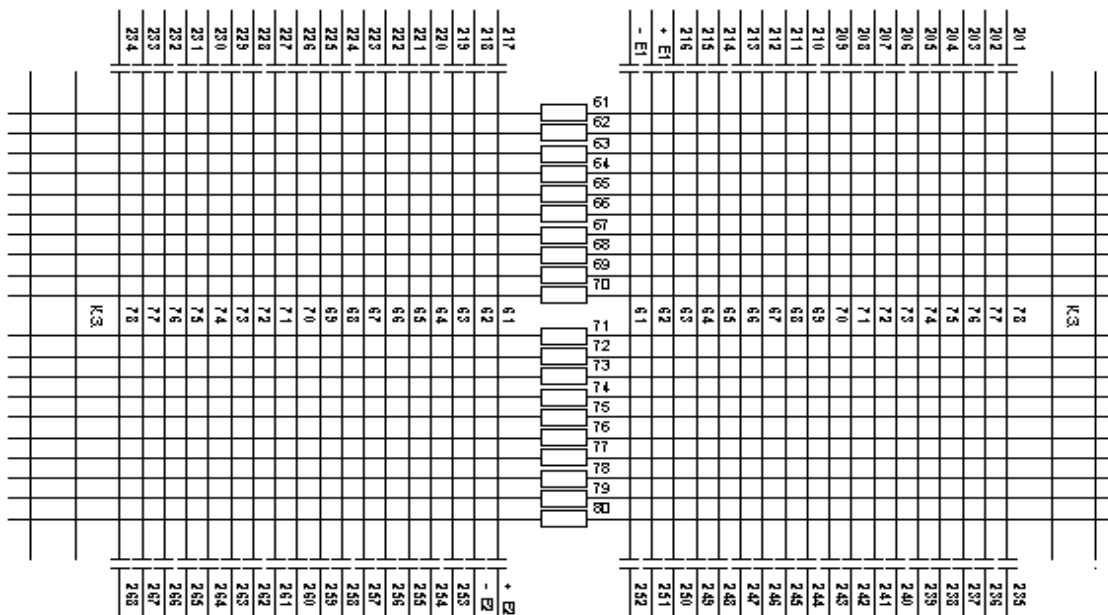


Рис. 10.2. Коммутационное поле модели с набранной расчетной схемой

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.

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

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.
$U_{\text{л}}, \text{кВ}$	$U_{\text{ф}}, \text{кВ}$	$U_{\text{м}}, \text{кВ}$	M_u
115	66,5	33,25 13,30 6,65	$2 \cdot 10^3$ $5 \cdot 10^3$ $10 \cdot 10^3$
230	133,0	26,6 13,3 6,25	$5 \cdot 10^3$ $10 \cdot 10^3$ $20 \cdot 10^3$
330	191,0	19,1 9,95	$10 \cdot 10^3$ $20 \cdot 10^3$
500	289,9	28,9 14,45	$10 \cdot 10^3$ $20 \cdot 10^3$
750	434	21,7 8,64	$20 \cdot 10^3$ $50 \cdot 10^3$

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

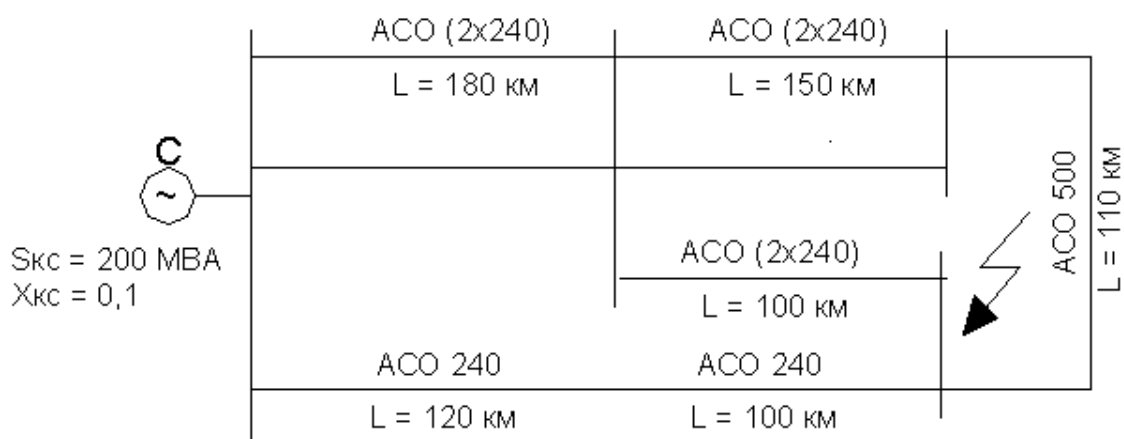


Схема 1

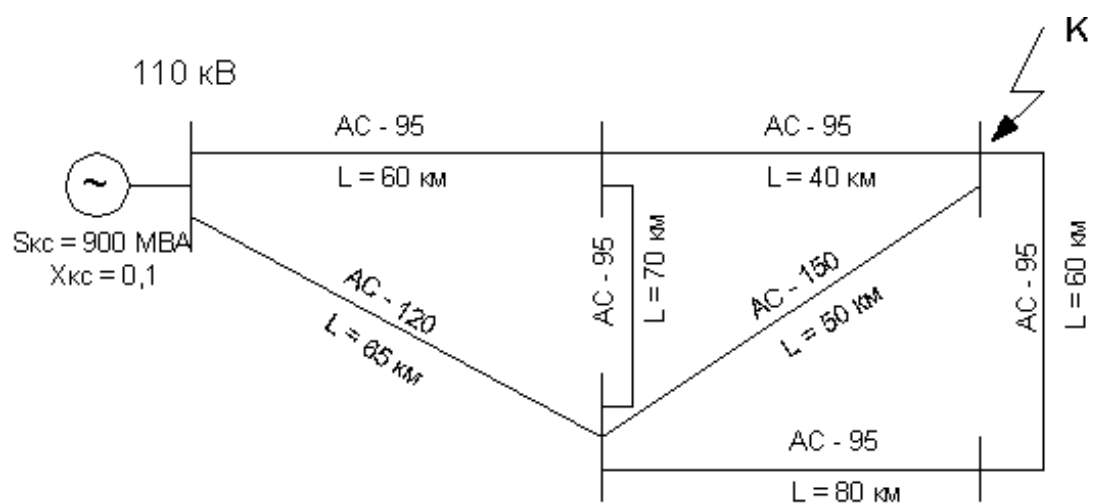


Схема 2

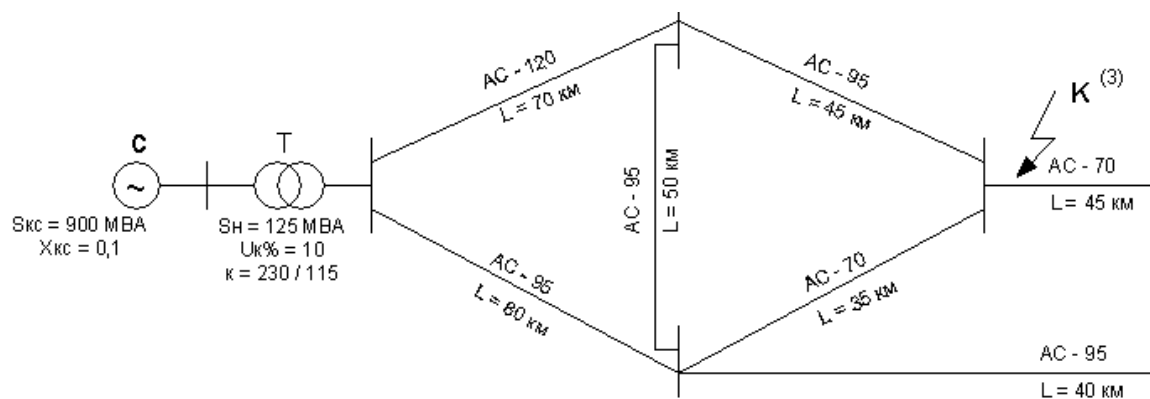


Схема 3

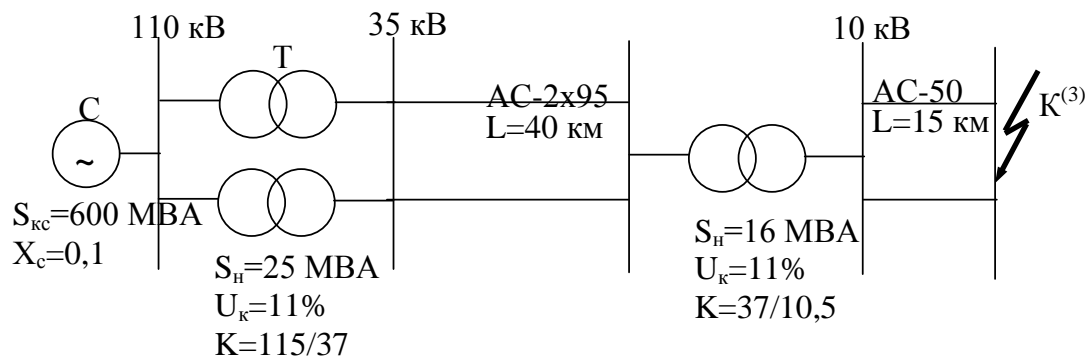


Схема 4

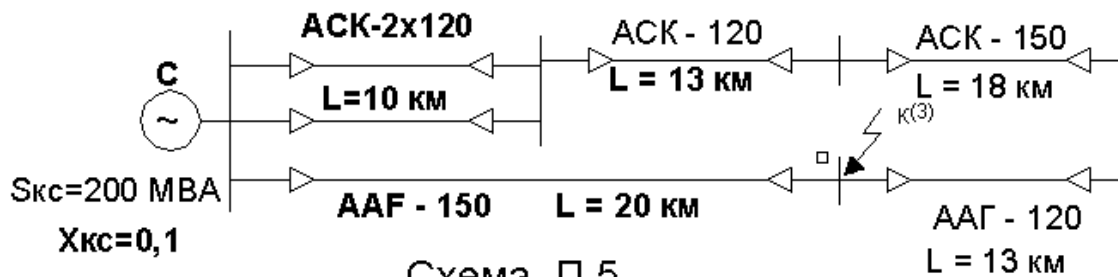


Схема П.5

Схема 5

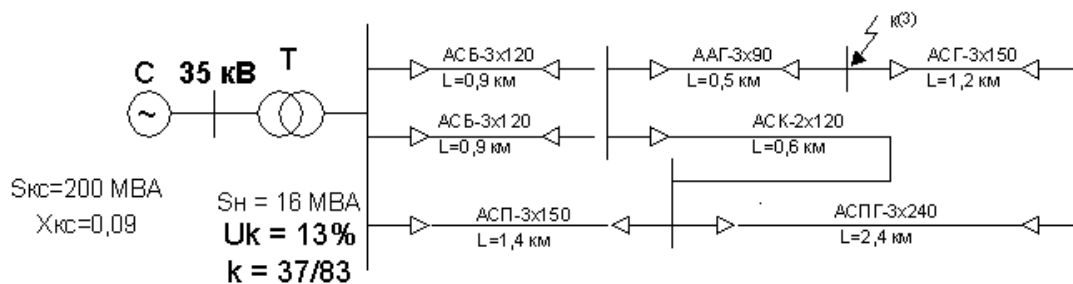


Схема 6

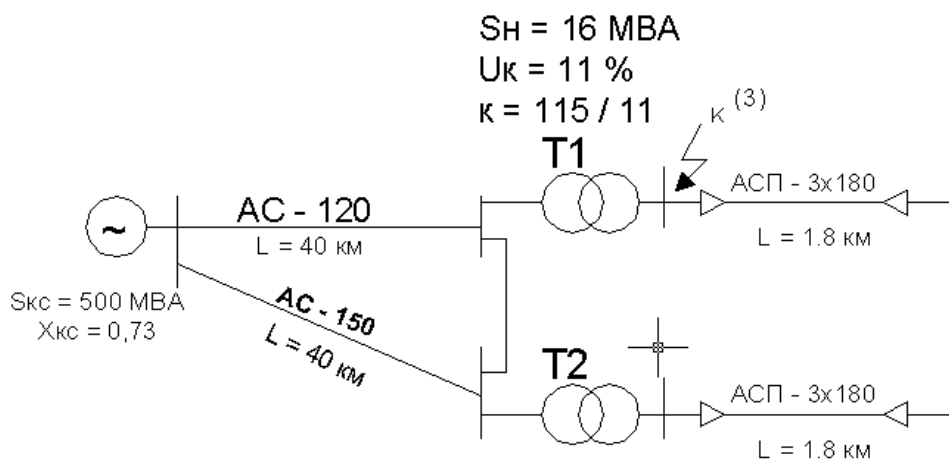


Схема 7