

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра электротехники и электроэнергетики

ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к лабораторным работам

Составители:
Г. П. Колесник
А. С. Целищев
В. И. Афонин

Владимир 2010

УДК 621.311

ББК 22.332

П27

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
приборостроения и информационно-измерительных технологий

Владимирского государственного университета

В. С. Грибакин

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Переходные электромагнитные процессы при поперечной и
П27 продольной несимметрии в электроэнергетических системах :
метод. указания к лаб. работам / Владим. гос. ун-т ; сост.:
Г. П. Колесник, А. С. Целищев, В. И. Афонин. – Владимир : Изд-
во Владим. гос. ун-та, 2010. – 64 с.

Содержат описание пяти лабораторных работ, в каждой из которых при-
ведены цель работы, объект и средства исследования, домашнее задание, мето-
дические указания, контрольные вопросы, и рекомендательный библиографиче-
ский список.

Составлены в соответствии с Государственным образовательным стандар-
том для студентов третьих-четвертых курсов всех форм обучения специальности
140211 – электроснабжение, изучающих дисциплину «Переходные процессы в
электроэнергетических системах».

Табл. 17. Ил. 17. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.311

ББК 22.332

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении лабораторных работ студенты приобретают навыки проведения эксперимента, совершенствуют работу с измерительными приборами, учатся читать электрические и собирать соответствующие им монтажные схемы, обрабатывать результаты эксперимента.

Перед выполнением курса лабораторных работ по переходным электромагнитным процессам в электроэнергетических системах каждый студент обязан изучить правила техники безопасности и расписаться в журнале, который находится в лаборатории. Лабораторные работы выполняются бригадами, состоящими из двух-трех студентов. Во время выполнения работы каждая бригада должна иметь бланк отчета с письменными ответами в соответствии с требованиями разд. 1.2 к каждой лабораторной работе и со всеми необходимыми рисунками, графиками и таблицами.

Перед выполнением лабораторной работы каждый студент должен получить у преподавателя допуск к работе, который включает в себя проверку выполнения домашней подготовки. Студентам, допущенным к занятиям, дается разрешение на сборку схемы. Студенты, не подготовившиеся к занятиям, к выполнению работы не допускаются. Если студент имеет задолженность по двум незащищенным работам, то к выполнению следующей он также не допускается.

После выполнения лабораторной работы бригада студентов подписывает у преподавателя результаты опытов, затем разбирает схему и приводит стенд в порядок. Студенты, выполнившие, оформившие и защитившие работу в день выполнения, предъявляют один отчет на бригаду. При защите в последующие дни отчет оформляется каждым членом бригады.

Отчеты по лабораторным работам должны быть выполнены аккуратно на листах формата А4 писчей бумаги в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.4-84. Все электрические схемы, графики и таблицы должны быть выполнены при помощи чертежных инструментов или на компьютере. Причем, все графики выполняют только на миллиметровой бумаге (или на листах формата А4 с отображением координатной сетки). Обозначения в электрических схемах должны соответствовать ГОСТ 2.105-95; 2.702-75; ЕСКД: ГОСТ 2.747-68; 1494-77; 19880-74.

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием кафедры, учебной группы, фамилии, имени, отчества студента, названия, номера и даты выполнения лабораторной работы;*
- задание; схему соединений;*
- письменные ответы на каждый вопрос раздела «Подготовка к работе»; расчетные формулы с необходимыми вычислениями;*
- таблицы измеренных и вычисленных величин;*
- графики и диаграммы; краткие выводы.*

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель работы: изучение методов анализа несимметричных коротких замыканий (КЗ) в трехфазной электрической цепи. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид поперечной несимметрии; уметь рассчитывать параметры симметричных составляющих токов и напряжений и отображать их графически в виде векторных диаграмм; приобрести навыки экспериментального исследования параметров режимов коротких замыканий.

1.1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазная симметричная система напряжений промышленной частоты 220/127 В, снимаемая со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора Y_0/Y_0 .

Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами *A, B, C, O* и расположены на панели № 2 стенда ЛСОЭ-5. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами *A, B, C, O* панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов и напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр		0÷250 В	1
3	Амперметр		0,5÷1 А	2
4	Амперметр		2,5÷5А	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

1.2. Подготовка к работе

1. Доказать, что в четырехпроводной трехфазной системе при замыкании фазы A на землю угол сдвига фаз между векторами напряжений особых фаз \dot{U}_B и \dot{U}_C определяется отношением линейного и фазного напряжений. Доказать, что аналогичные выражения можно получить и для остальных видов поперечной несимметрии.

2. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для каждого возможного вида несимметричного КЗ с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих измерительных приборов и балластных резисторов в линейных проводах для ограничения тока КЗ на уровне 0,5 А.

3. Ознакомиться с принципом действия прибора для непосредственного измерения тока КЗ в сети 0,4 кВ и изобразить его функциональную схему.

1.3. Рабочее задание

1. Собрать схему для исследования параметров режима однофазного короткого замыкания (*шифр вида короткого замыкания* ($K^{(1)}$)). После проверки схемы преподавателем включить питание

стенда и трехфазного источника. Выполнить операции по имитации заданного вида короткого замыкания, считая выводы вторичной обмотки разделительного трансформатора генераторным концом (выводы A, B, C, O на панели № 2 стенда), а выводы токоограничивающих резисторов шинами нагрузки. Показания всех приборов записать в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№ п/п	Вид КЗ	Значения измеренных токов и напряжений							
		I_A, A	I_B, A	I_C, A	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_{BC}, В$	I_3, A
1	(1)								
2	(2)								
3	(1.1)								

2. Повторить действия, в соответствии с п. 1, для случаев двухфазного короткого замыкания (*шифр вида короткого замыкания* ($K^{(2)}$)) и двухфазного короткого замыкания на землю (*шифр вида короткого замыкания* ($K^{(1.1)}$)). Показания всех приборов записать в табл. 1.2.

3. Оформить отчет по лабораторной работе, при этом провести все необходимые расчеты с учетом данных табл. 1.2, по приведённой ниже методике построить векторные диаграммы напряжений и токов для каждого вида КЗ и определить симметричные составляющие токов и напряжений несимметричной системы исследуемых напряжений.

4. Рассчитать аналитически составляющие токов КЗ на стороне 0,4 кВ с учетом параметров используемого оборудования.

1.4. Методические указания

Метод симметричных составляющих

В трёхфазной электрической сети номинальным напряжением 35 кВ и выше с эффективно заземлённой нейтралью возможны следующие виды несимметричных коротких замыканий (КЗ), схемы которых приведены на рис. 1.1: двухфазное (2), однофазное (1), двухфазное на землю (1.1) (понятие эффективно заземлённая нейтраль можно распространить на сети 3 – 35 кВ с заземлением нейтрали через не-

большое сопротивление – дугогасящую катушку или активное сопротивление). Возникновение поперечной несимметрии приводит к существенному искажению систем векторов токов и напряжений (изменение модуля и аргумента каждого вектора). Наиболее строго расчёт перечисленных видов коротких замыканий может быть проведен на основе метода, предложенного Фортестью, и заключающегося в разложении искаженной системы векторов A , B , и C на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей [1,2].

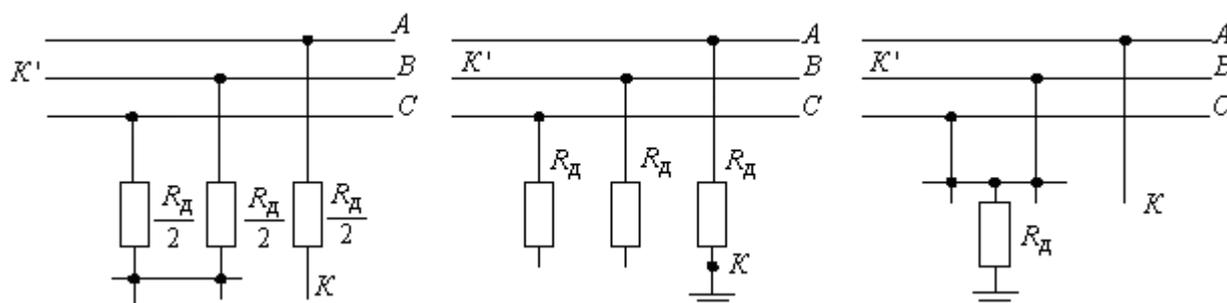


Рис.1.1. Виды несимметричных коротких замыканий в электрических сетях с учетом сопротивления электрической дуги

Три комплекса (или вектора), отображающих гармонически изменяющиеся величины, обозначенные буквами A , B и C , образуют симметричную **систему прямой последовательности** тогда и только тогда, если

$$A_1 = a B_1 = a^2 C_1, \quad \text{или} \quad B_1 = a^2 A_1; \quad C_1 = a A_1,$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота.

Эти же три вектора могут образовать и другую симметричную систему, называемую **системой обратной последовательности**, если

$$B_2 = a A_2, \quad C_2 = a^2 A_2.$$

Третью симметричную систему, образованную этими векторами, называют **системой нулевой последовательности**:

$$A_0 = B_0 = C_0.$$

Суммируя одноименные векторы трех разных симметричных последовательностей с учетом записанных выше соотношений, получим исходную несимметричную систему:

$$\begin{array}{ll}
 A = A_0 + A_1 + A_2; & A = A_0 + A_1 + A_2; \\
 B = B_0 + B_1 + B_2; & \text{или} \quad B = A_0 + a^2 A_1 + a A_2; \\
 C = C_0 + C_1 + C_2; & C = A_0 + a A_1 + a^2 A_2.
 \end{array}$$

Определитель этой системы отличен от нуля, поэтому решение с учетом показателя степени оператора поворота

$$a^3 = 1 \quad \text{и} \quad 1 + a + a^2 = 0$$

будет

$$A_0 = (A + B + C)/3; \quad A_1 = (A + aB + a^2C)/3; \quad A_2 = (A + a^2B + aC)/3.$$

Например, для цепи с несимметричными фазными напряжениями $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ можно записать:

$$\begin{array}{ll}
 \dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0; & \dot{U}_0 = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)/3; \\
 \dot{U}_B = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0; & \rightarrow \quad \dot{U}_1 = (\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C)/3; \\
 \dot{U}_C = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0. & \dot{U}_2 = (\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C)/3.
 \end{array}$$

Таким образом, источник несимметричной системы напряжений (генератор) может быть представлен в виде трех последовательно включенных источников в каждой фазе, как это показано на рис. 1.2. В случае линейности всех параметров к такой цепи с несимметричным источником при анализе может быть применен принцип наложения. При этом расчет цепи с симметричными параметрами сводится к трем операциям (в силу ортогональности векторов разных последовательностей):

$$1) \dot{I}_1 = \dot{U}_1 / \underline{Z}_1; \quad 2) \dot{I}_2 = \dot{U}_2 / \underline{Z}_2; \quad 3) \dot{I}_0 = \dot{U}_0 / \underline{Z}_0,$$

используя которые по значениям токов симметричных составляющих вычисляются линейные токи несимметричной системы:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2.$$

В общем случае сопротивления прямой \underline{Z}_1 , обратной \underline{Z}_2 и нулевой \underline{Z}_0 последовательностей различны. Эти различия обусловлены наличием переменных потокосцеплений и условием протекания тока нулевой последовательности по схеме «три провода – земля». Известно, что переменные потокосцепления появляются при наличии в системе различного рода вращающихся электрических машин.

Сопротивления прямой и обратной последовательности без вращающихся машин одинаковы и равны фазному сопротивлению:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_\phi.$$

Сопротивление нулевой последовательности при отсутствии трансформаторов и вращающихся машин определяется по формуле

$$\underline{Z}_0 = 3\underline{Z}_N + \underline{Z}_\phi,$$

где \underline{Z}_N – сопротивление нейтрального провода.

Если известны симметричные составляющие напряжений и токов, то мощность, отдаваемая такой системой, может быть определена в силу ортогональности токов и напряжений отдельных последовательностей симметричных составляющих суммированием мощностей отдельных последовательностей:

$$\tilde{S} = \dot{U}_A^* I_A + \dot{U}_B^* I_B + \dot{U}_C^* I_C = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 + \tilde{S}_0,$$

где $\tilde{S}_1 = \dot{U}_1^* I_1 + \dot{U}_2^* I_2 + \dot{U}_0^* I_0$.

Следовательно, мощность взаимодействия токов одной последовательности и напряжений другой последовательности равна нулю. Этим характеризуется ортогональность разложения на симметричные составляющие, например:

$$\dot{U}_1^* I_0 = a^2 \dot{U}_1^* I_0 + a \dot{U}_1^* I_0 = \dot{U}_1^* I_0 (1 + a^2 + a) = 0.$$

В случае несимметрии фазных напряжений и сопротивлений ЭДС любой симметричной составляющей обуславливает протекание токов всех трех составляющих. Уравнения такой цепи имеют вид

$$\dot{E}_k = \underline{Z}_{kl} \dot{I}_l \quad \text{è} \quad \dot{I}_l = \underline{Y}_{kl} \dot{E}_k,$$

где \underline{Z}_{kl} и \underline{Y}_{kl} – передаточные сопротивления и проводимость одной из симметричных составляющих относительно другой.

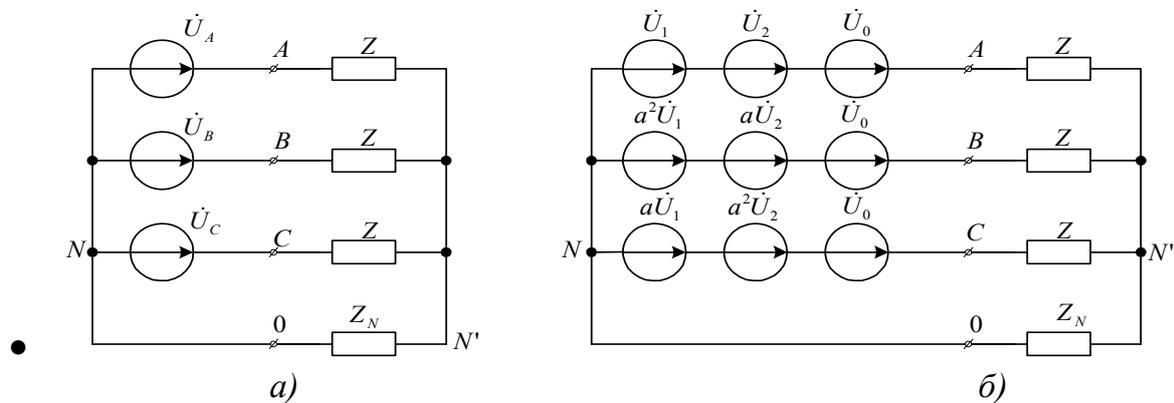


Рис. 1.2. Генератор с несимметричной системой напряжений (а) и его представление источниками симметричных составляющих (б)

Построение векторных диаграмм

Векторные диаграммы токов и напряжений строятся по результатам расчета симметричных составляющих на основе экспериментальных данных. Поскольку при несимметричных режимах фазный угол между фазными напряжениями отличается от 120° , то сначала определяется угол между векторами напряжений особых фаз (КЗ типа ($K^{(1)}$)) или угол между векторами токов короткозамкнутых фаз в остальных случаях. Например, при замыкании фазы A на землю угол φ_1 между векторами напряжений \dot{U}_B и \dot{U}_C определяется по выражению

$$\varphi_1 = 2 \arcsin \frac{U_{BC}}{2U_C}.$$

Угол φ_2 между векторами токов \dot{I}_B и \dot{I}_C при двухфазном КЗ на землю находится по формуле

$$\varphi_2 = 2 \arccos \frac{I_3}{2I_C}.$$

Определение симметричных составляющих токов и напряжений

Симметричные составляющие токов или напряжений несимметричной системы определяются графоаналитическим методом с учетом экспериментальных данных из табл. 1.2 в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} 3\dot{U}_{A1} &= (\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C); & 3\dot{I}_{A1} &= (\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C); \\ 3\dot{U}_{A2} &= (\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C); & 3\dot{I}_{A2} &= (\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C); \\ \dot{U}_0 &= (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C). & 3\dot{I}_0 &= (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C), \end{aligned}$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – векторы токов или напряжений фаз;

$a = e^{j120^\circ}; a^2 = e^{j240^\circ}$ – операторы, умножением на которые осуществляется поворот вектора соответственно на угол 120 или 240° против часовой стрелки.

Порядок графических построений, необходимых для нахождения симметричных составляющих, показан на рис. 1.3 на примере вектор-

ной диаграммы напряжений при однофазном КЗ. Векторы напряжений фаз B и C располагаем с учетом угла φ_1 симметрично относительно вертикальной оси в третьем и четвертом квадрантах комплексной

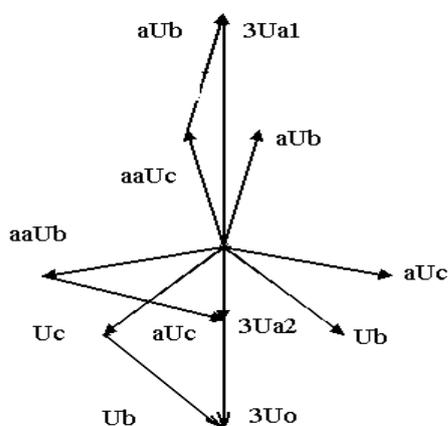


Рис. 1.3. Определение симметричных составляющих несимметричной системы напряжений

плоскости. Затем строим вектор $a\dot{U}_C$, опережающий вектор \dot{U}_C на угол 120° , и вектор $a^2\dot{U}_B$, опережающий вектор \dot{U}_B на угол 240° . Учитывая, что при замыкании фазы A на землю вектор \dot{U}_A равен нулю, геометрическим суммированием векторов $a\dot{U}_C$ и $a^2\dot{U}_B$ определим утроенное значение вектора \dot{U}_{A2} , то есть $3\dot{U}_{A2}$. Аналогично, построив векторы $a\dot{U}_B$ и $a^2\dot{U}_C$,

при \dot{U}_A равном нулю определим утроенное значение вектора \dot{U}_{A1} , то есть $3\dot{U}_{A1}$. Геометрическое сложение векторов \dot{U}_B и \dot{U}_C даст утроенное значение вектора нулевой последовательности, то есть $3\dot{U}_0$.

Путём аналогичных операций для действующих значений линейных токов фаз A , B и C из табл. 1.2 определяем симметричные составляющие несимметричной системы токов. Результаты расчётов действующих значений симметричных составляющих токов I_{A1} , I_{A2} , I_0 и напряжений U_{A1} , U_{A2} , U_0 сводятся в табл. 1.3. Векторные диаграммы напряжений и токов, построенные с учетом данных табл. 1.2 показаны на рис. 1.4.

Таблица 1.3

№ п/п	Вид КЗ	I_{A1}, A	I_{A2}, A	I_0, A	U_{A1}, B	U_{A2}, B	U_0, B
1	(1)						
2	(2)						
3	(1.1)						

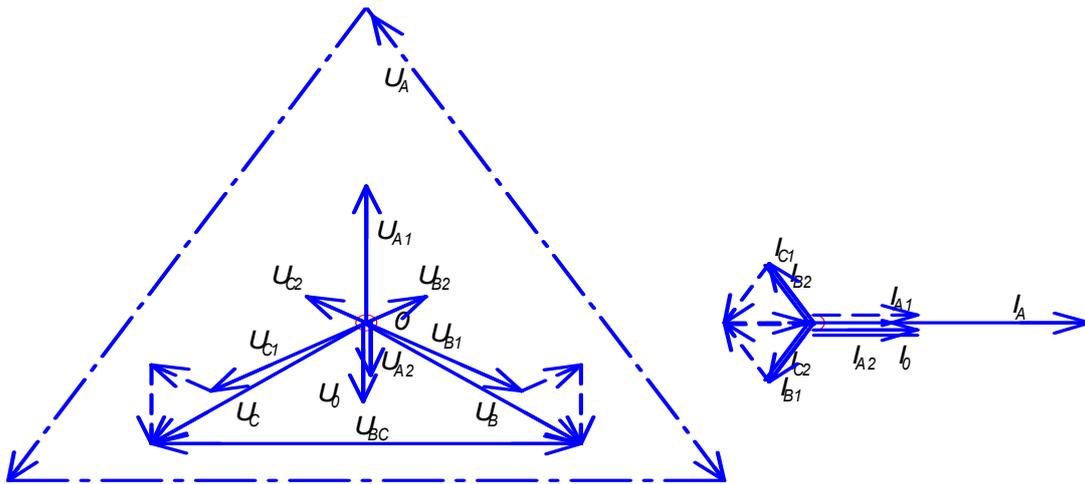


Рис. 1.4. Примеры построения векторных диаграмм напряжений и токов через симметричные составляющие (по данным табл. 1.3)

Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В

Электрические установки напряжением до 1000 В характеризуются большой электрической удаленностью относительно источников питания, поэтому можно считать, что при коротком замыкании за понижающим трансформатором напряжение в точке сети, где он присоединен, практически остается неизменным и равным своему номинальному значению.

Для повышения достоверности расчета тока короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В необходимо учитывать все сопротивления короткозамкнутой цепи: активные и индуктивные сопротивления проводников, сопротивления сборных шин и присоединения к ним, сопротивления трансформаторов тока, сопротивления контактных соединений – болтовых соединений шин, зажимов и разъёмных контактов аппаратов, а также контакта в месте происшедшего соединения.

Ввиду трудности определения точных и достоверных сопротивлений контактных соединений принято («Указания по проектированию силового электрооборудования промышленных предприятий», 1966 г.) переходные сопротивления учитывать совокупно, вводя в короткозамкнутую цепь активное сопротивление, величина которого в зависимости от места короткого замыкания оценивается в пределах

0,015 – 0,03 Ом. Нижний предел соответствует КЗ около распределительного щита подстанции, а верхний – при КЗ непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов.

Для установок с повышенной надежностью расчет токов короткого замыкания обычно делают без учета упомянутых переходных сопротивлений, но с учетом активных и индуктивных сопротивлений всех основных элементов цепи, характеристики которых приведены в табл. П10 [1].

Сопротивление нулевой последовательности ориентировочно находят в следующих пределах:

$$R_0 = (5 \div 14,7) R_{\Delta} \text{ и } R_0 = (7,5 \div 9,4) R_{\Delta}.$$

Расчет обычно ведут в именованных единицах. В качестве средних номинальных напряжений U_{cp} для соответствующих ступеней трансформации рекомендуется принимать $U_{\text{cp}} = 690; 525; 400; 230; 127 \text{ В}$.

Для проверки аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания проводят расчет трехфазного короткого замыкания (дающего наибольшее значение тока КЗ).

Для настройки защиты от замыканий на землю (в соответствии с требованиями техники безопасности) проводят также расчет токов при однофазном коротком замыкании, чтобы определить возможно наименьшую величину тока при этом виде замыкания.

Начальное значение периодической слагающей тока:
- трехфазного КЗ:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{\text{cp}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{U_{\text{cp}} (В)}{\sqrt{3} Z_{\Sigma} (\text{миллиом})}, \text{ кА};$$

- однофазного КЗ:

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{cp}}}{\sqrt{3} \sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{cp}} (В)}{Z^{(1)} (\text{миллиом})}, \text{ кА}.$$

При большой величине активного сопротивления и значительной продолжительности процесса КЗ (0,2 с и более) может уже сказаться тепловой спад тока.

Наличие трансформаторов тока в двух фазах создает местную продольную несимметрию трехфазной цепи. Для проверки этих трансформаторов тока по условиям короткого замыкания можно исходить из величины тока, которая получается при двухфазном коротком замыкании между фазами, где есть и где нет трансформатора тока:

$$I_K^{(2)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{ТТ})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{ТТ})^2}},$$

где $R_{ТТ}$ и $X_{ТТ}$ – сопротивления трансформатора тока.

1.5. Порядок оформления отчёта

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения, выводы, ответы на приведённые ниже вопросы.

1.6. Контрольные вопросы

1. Какие виды короткого замыкания приводят к несимметричному режиму работы трёхфазной системы?

2. Как изменятся построенные Вами векторные диаграммы напряжений, если замыкания будут происходить через переходные активные сопротивления R ?

3. Каким методом рассчитываются однофазные, двухфазные, двухфазные КЗ на землю? В чём состоит суть данного метода?

4. Приведите граничные условия для каждого вида несимметричного КЗ.

5. Сформулируйте правило эквивалентности прямой последовательности.

6. При каком виде КЗ будет наблюдаться наибольшая степень ε несимметрии напряжений, характеризуемая отношением $-\frac{U_{A2}}{U_{A1}}$?

7. При каком виде КЗ будет иметь место наибольшее смещение нейтрали, характеризуемое отношением $\frac{U_o}{U_{A1}}$?

8. Как изменяются векторные диаграммы по мере удаления от места несимметричного замыкания и переходе через трансформатор?
9. Как использовать полученные данные для выбора выключателя по отключающей способности?
10. Объясните принцип работы электронного измерителя тока короткого замыкания.
11. В чем смысл фазных углов φ_1 и φ_2 ?
12. В каком случае ток короткого замыкания будет иметь максимальное значение? Почему?
13. В чём особенности простого замыкания на землю в распределительных сетях?
14. Какие нежелательные явления происходят в неповрежденных фазах при возникновении несимметричных КЗ? Почему?
15. С какой целью в распределительной сети устанавливаются дугогасящие катушки?
16. Как влияют изменения параметров проводников на значение тока КЗ?
17. Каковы особенности расчета тока КЗ в установках напряжением до 1000 В?

Лабораторная работа № 2

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель работы: изучение методов расчёта токов и напряжений в месте несимметричного КЗ на основе комплексных схем замещений. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид коротких замыканий; уметь рассчитывать параметры симметричных составляющих токов и напряжений и отображать их графически в виде векторных диаграмм; приобрести навыки экспериментального исследования параметров режимов коротких замыканий.

2.1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазная симметричная система напряжений промышленной частоты 220/127 В, снимаемая со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора Y_0/Y_0 . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами *A*, *B*, *C*, *O* и расположены на панели № 2 стенда. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами *A*, *B*, *C*, *O* панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

2.2. Подготовка к работе

1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 335 – 337].

2. Для заданного преподавателем варианта по исходным данным табл. 2.2 рассчитать результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Таблица 2.2

Вариант	S_G , МВА	x_d'' , о.е.	X_2 , о.е.	U_{cp} , кВ	l , км	$U_k\%$, о.е.	S_T , МВА	$x_{уд}$, ом/км	$x_{уд.о}$, ом/км
1	20	0,12	0,2	37	54	10,5	63	0,4	1,2
2	60	0,1	0,15	37	52	11	40	0,41	1,22
3	40	0,2	0,25	115	53	12	63	0,42	1,23
4	20	0,11	0,16	115	54	10,5	40	0,4	1,2
5	60	0,125	0,17	230	55	11	40	0,41	1,22
6	40	0,131	0,18	230	61	12	25	0,42	1,24
7	20	0,132	0,18	37	62	10,5	25	0,4	1,2
8	40	0,121	0,17	37	63	11	40	0,41	1,23
9	60	0,131	0,18	115	41	12	63	0,42	1,24
10	40	0,132	0,18	115	42	10,5	16	0,4	1,22
11	20	0,11	0,15	230	43	4	63	0,4	1,22
12	60	0,105	0,14	230	81	12	40	0,42	1,24
13	40	0,106	0,15	37	32	10,5	16	0,4	1,1
14	20	0,107	0,16	37	33	11	25	0,41	1,22
15	60	0,109	0,15	115	45	12	63	0,42	1,24

Примечания: S_G , S_T – номинальные мощности генератора G и трансформатора T ; x_d'' – сверхпереходная реактивность генератора G ; X_2 – реактивность обратной последовательности генератора G ; U_{cp} – средне-номинальное напряжение линии электропередачи; l – длина линии; $x_{уд}$, $x_{уд.о}$ – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательностей ЛЭП.

3. С учетом расчетов п. 2.2 изобразить комплексные электрические схемы замещения для рассматриваемых видов КЗ, предусмотрев в них включение приборов для измерения необходимых для последующих расчетов токов и напряжений.

4. Обосновать возможность замены цепи переменного тока произвольной конфигурации с чисто реактивными элементами цепью постоянного тока с чисто активными элементами.

5. Провести расчёт результирующих реактивных сопротивлений прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей по следующей методике:

– вначале определяются реактивные сопротивления отдельных элементов простейшей системы по формулам:

1. Для генератора G : $x_{Г1} = x_d'' \frac{U_{cp}^2}{S_{Г}}$, Ом; $x_{Г2} = x_2 \frac{U_{cp}^2}{S_{Г}}$, Ом.

2. Для трансформатора: $x_{Т1} = x_{Т2} = x_{Т0} = \frac{U_k \% U_{cp}^2}{100 S_{Т}}$, Ом.

3. Для линии электропередачи W :

$$x_{л1} = x_{л2} = x_{уд} \cdot l, \text{ Ом}; \quad x_{л0} = x_{уд.0} \cdot l, \text{ Ом};$$

– затем рассчитываются результирующие сопротивления реактивностей прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$x_{1\Sigma} = x_{Г1} + x_{Т1} + x_{л1}; \quad x_{2\Sigma} = x_{Г2} + x_{Т2} + x_{л2}; \quad x_{0\Sigma} = x_{Т0} + x_{л0}.$$

6. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий разд. 2.2, рисунками и таблицами разд. 2.3. При необходимости привести расчетные формулы.

2.3. Рабочее задание

1. Измерить мультиметром (или иным прибором) сопротивления резистивных элементов на сменном блоке стенда и подобрать два из трех с максимально возможной точностью в соответствии с расчетом. В случае больших отличий сопротивлений провести дополнительное масштабирование по отношению двух расчетных элементов. Третий элемент подобрать на магазине сопротивлений, увеличив его значение на дополнительный коэффициент масштабирования.

2. Собрать электрическую схему опыта на основании комплексной схемы замещения для двухфазного КЗ на землю из подобранных резистивных элементов, сопротивления которых равны расчетным реактивным сопротивлениям для данного вида КЗ. В качестве источника питания использовать регулируемый источник постоянного напряжения.

3. После проверки схемы преподавателем установить автотрансформатором напряжение $E_{1\Sigma}$ так, чтобы стрелки всех приборов отклонялись за середину шкалы. Записать показания приборов в табл. 2.3. При использовании магазина сопротивлений в качестве одного из резистивных элементов ток через этот элемент не должен превышать 100 мА.

4. Повторить действия, описанные в пп. 2 и 3 для случаев двухфазного и однофазного КЗ. Результаты измерений свести в табл. 2.3.

5. По данным табл. 2.3 выполнить аналитический расчёт симметричных составляющих и определить погрешность измерений. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

6. По данным табл. 2.3 выполнить аналитический расчёт симметричных составляющих и определить погрешность измерений. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

7. В отчёте необходимо привести сравнение результатов, полученных экспериментальным путем, с аналитическими расчётами.

Таблица 2.3

№ п/п	Вид КЗ	Величина / прибор					
		I_{A1}, A	I_{A2}, A	I_0, A	U_{A1}, A	U_{A2}, A	U_0, A
1	Двухфазное на землю						
2	Двухфазное						
3	Однофазное						

2.4. Методические указания

Составление схемы замещения

Расчётная схема замещения любого симметричного трёхфазного режима или процесса является схемой прямой последовательности. Схема обратной последовательности аналогична схеме прямой последовательности. Различие в том, что в схему прямой последовательности вводят генераторы и нагрузки соответствующими реактивностями и ЭДС, а в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей принимают равными нулю. Считают, что выполняется условие постоянства реактивностей обратной последовательности и их независимость от вида и условий возникшей несимметрии, а также продолжительности переходного процесса.

Началом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей; это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности.

Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца; ими являются точки, между которыми расположена данная продольная несимметрия. К концу или между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникших в месте несимметрии.

Схема нулевой последовательности заметно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как ток нулевой последовательности по существу однофазный ток, протекающий по линии «три фазы – земля». Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.

В зависимости от вида несимметрии напряжение нулевой последовательности прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия) или последовательно, в расщелку фазных проводов (продольная несимметрия), как это показано на рис. 2.1.

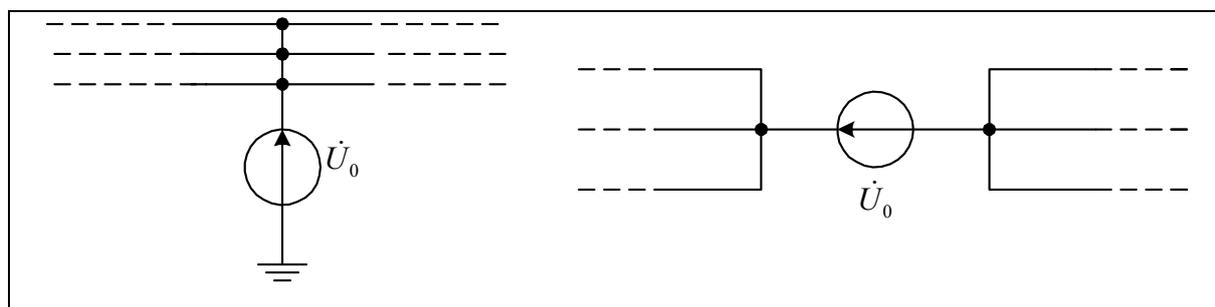


Рис. 2.1. Введение в схему напряжения нулевой последовательности в точках поперечной и продольной несимметрии

Далее, исходя из вида несимметрии, выявляют возможные пути протекания токов нулевой последовательности в электрически связанной цепи. Следует помнить, что сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величины, так как схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а их три.

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

где возникла несимметрия. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии). При незаземленной нейтрали системы начало схемы теряет смысл.

Обязательный этап расчета несимметричного режима – определение результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла несимметрия. При этом из схемы прямой последовательности находят также результирующую ЭДС относительно той же точки. Необходимые преобразования проводят с применением принципа наложения. Однако при этом необходимо помнить о принципиальных различиях в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметриях. В качестве примера рассмотрим схему рис. 2.2, а. При поперечной несимметрии в точке М результирующую ЭДС и сопротивления простейшей электроэнергетической системы, где 1 – реактивность генератора; 2 – реактивность трансформатора; 5, 6 – реактивности трансформатора и нагрузки приемной стороны; 7, 10 – элементы схемы замещения, можно определить в схеме прямой последовательности (рис. 2.2, б) путем определения эквивалентного сопротивления относительно зажимов источника U_1 .

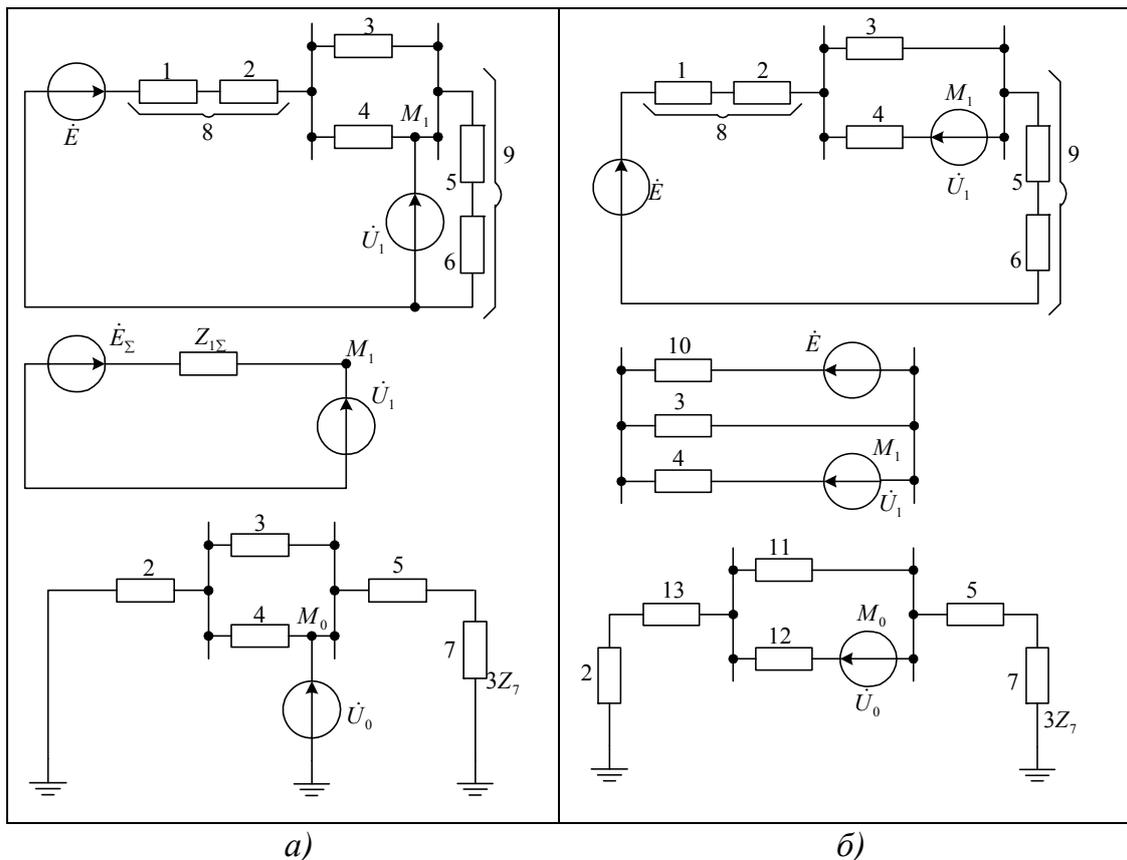


Рис. 2.2. Преобразование схем прямой и нулевой последовательностей при поперечной (а) и продольной (б) несимметрии

Эквивалентные преобразования для схемы обратной последовательности аналогичны за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников. Схему нулевой последовательности преобразовывают путем последовательного и параллельного сложения ветвей с учетом взаимоиндукции между линиями электропередачи 3 и 4.

При продольной несимметрии напряжение прямой последовательности вводится в рассечку элемента 4 в точке M_1 . При преобразовании сначала суммируются последовательно включенные элементы 8 и 9, затем рассматриваются последующие схемы замещения. Схема обратной последовательности аналогична прямой, однако в ней отсутствует ЭДС источника. В схему нулевой последовательности двухцепная линия электропередачи введена трехлучевой схемой замещения с элементами 11, 12 и 13 с целью учета взаимоиндукции между цепями. Результирующее сопротивление относительно зажимов источника U_0 :

$$Z_2 = Z_{12} + Z_{11} // (Z_2 + Z_{13} + Z_5 + Z_7).$$

Установленные соотношения между симметричными составляющими напряжений позволяют вместо трех схем замещения использовать одну комплексную схему замещения для соответствующего вида короткого замыкания. При составлении комплексных схем замещения в общем случае принимают, что в месте замыкания имеется сопротивление дуги R_d и схема каждой последовательности характеризуется полным сопротивлением (Z_1, Z_2, Z_0) , соответствующим особой фазе (рис. 2.3), или комплексной схемой замещения в операторной форме (рис. 2.4).

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений проводится следующим образом:

1. Определяется масштабный коэффициент системы

$$m = \frac{U_{\text{cp}} E''}{\sqrt{3} E_{1\Sigma}},$$

где U_{cp} – среднее напряжение сети, данное значение согласно варианту берётся из табл. 2.2;

$E'' = 1,08$ – значение сверхпереходной ЭДС в относительных единицах при номинальных условиях в начальный момент времени (используется только в практических расчетах);

$E_{I\Sigma}$ – суммарное напряжение прямой последовательности определяется по показанию вольтметра (напряжение на зажимах источника питания);

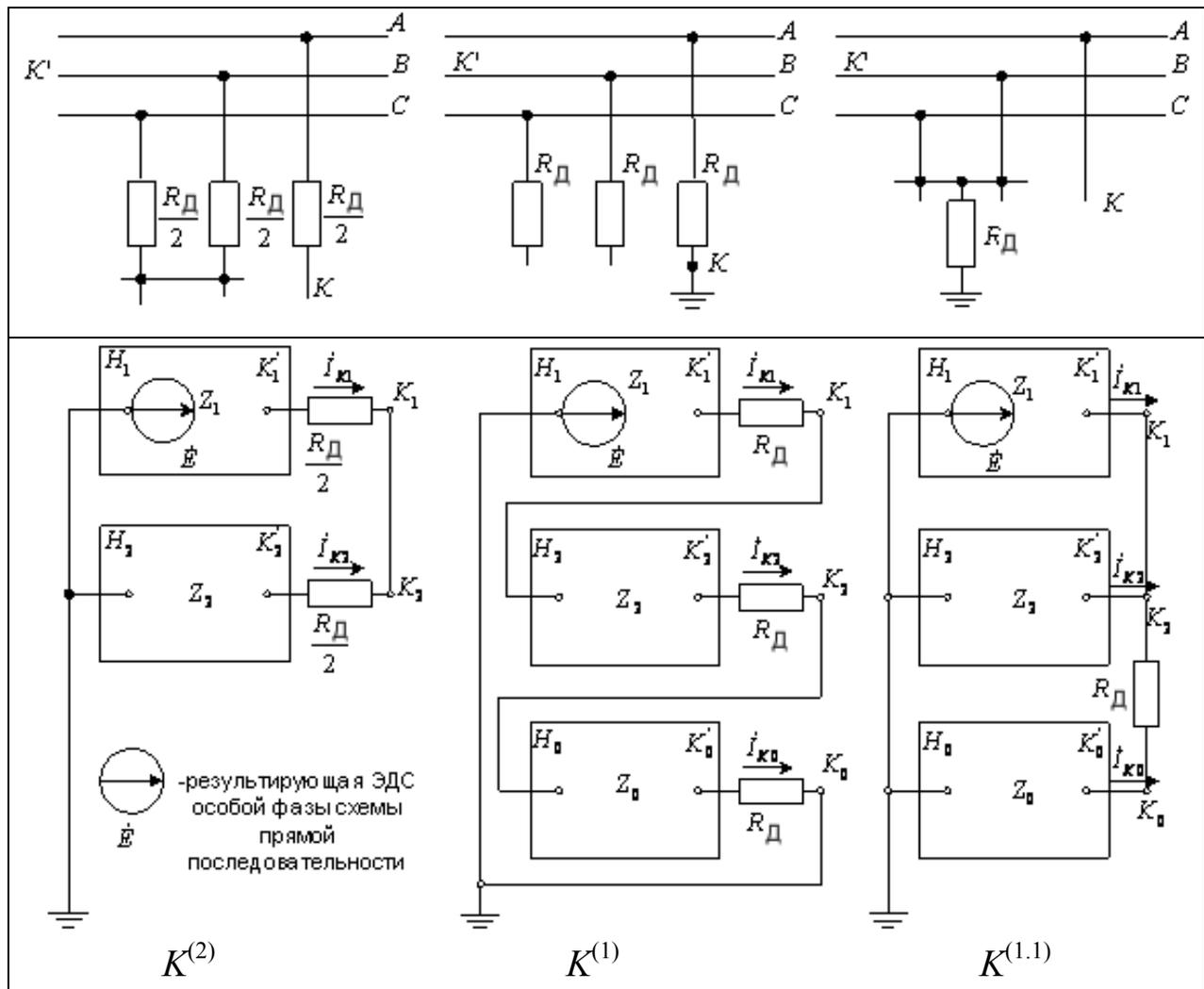


Рис. 2.3. Комплексные схемы замещения соответствующих видов КЗ

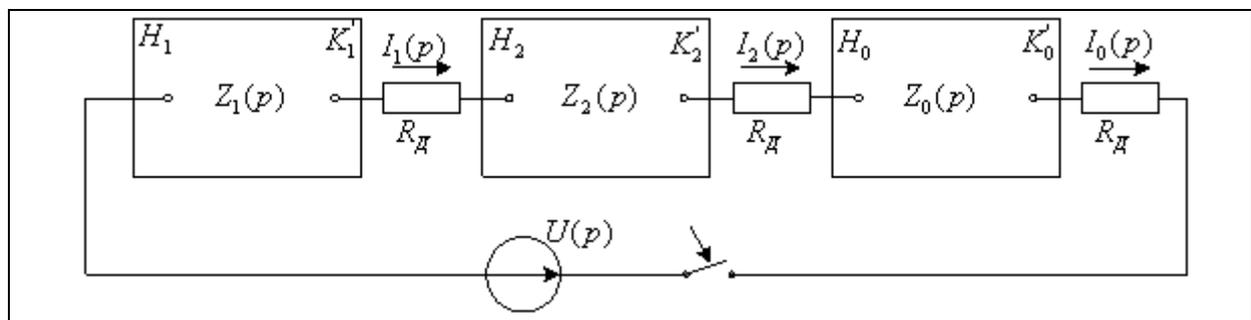


Рис. 2.4. Комплексные схемы замещения в операторной форме для однофазного замыкания через дугу

2. Рассчитываются симметричные составляющие токов и напряжений для каждого вида КЗ по результатам измерений на установке, моделирующей заданный вид короткого замыкания в простейшей системе:

$$I_{\kappa A_1}^{(M)} = m I_{A_1}, \quad \text{кА};$$

$$U_{\kappa A_1}^{(M)} = m U_{A_1}, \quad \text{кВ};$$

$$I_{\kappa A_2}^{(M)} = m I_{A_2}, \quad \text{кА};$$

$$U_{\kappa A_2}^{(M)} = m U_{A_2}, \quad \text{кВ};$$

$$I_{\kappa 0}^{(M)} = m I_0, \quad \text{кА};$$

$$U_{\kappa 0}^{(M)} = m U_0, \quad \text{кВ},$$

где I_{A1} – ток прямой последовательности;

I_{A2} – ток обратной последовательности;

I_{A0} – ток нулевой последовательности.

Значения токов симметричных составляющих I_{A1} , I_{A2} , I_{A0} берутся согласно варианту из табл. 2.3. Верхний индекс «М» свидетельствует об использовании результатов измерений, полученных на модельной установке.

3. Определяется величина добавочного сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$:

- для однофазного КЗ:

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma};$$

- для двухфазного КЗ:

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma};$$

- для двухфазного КЗ на землю:

$$x_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{x_{0\Sigma} \cdot x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}}.$$

4. Затем для каждого вида КЗ производится аналитический расчёт тока прямой последовательности (верхний индекс (a)):

$$I_{\kappa A_1}^{(a)} = \frac{U_{\text{ср}} E''}{\sqrt{3} (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \quad \text{кА}.$$

5. Ток обратной последовательности для двухфазного и однофазного КЗ рассчитывается по формуле

$$I_{\kappa A_2}^{(a)} = I_{\kappa A_1}^{(a)}, \text{ кА} .$$

6. Для двухфазного КЗ на землю ток обратной последовательности рассчитывается по формуле

$$I_{\kappa A_2}^{(a)} = I_{\kappa A_1}^{(a)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}}, \text{ кА} .$$

7. Затем определяется ток нулевой последовательности:

- для двухфазного КЗ на землю:

$$I_{\kappa 0}^{(a)} = I_{\kappa A_1}^{(a)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}}, \text{ кА} ;$$

- для двухфазного КЗ:

$$I_{\kappa 0}^{(a)} = 0 ;$$

- для однофазного КЗ:

$$I_{\kappa 0}^{(a)} = I_{\kappa A_1}^{(a)}, \text{ кА} .$$

8. Рассчитываются симметричные составляющие напряжений:

- для двухфазного КЗ:

$$U_{\kappa A_1}^{(a)} = U_{\kappa A_2}^{(a)} = x_{2\Sigma} I_{\kappa A_1}^{(a)}, \text{ кВ} ;$$

- для двухфазного КЗ на землю:

$$U_{\kappa A_1}^{(a)} = U_{\kappa A_2}^{(a)} = U_{\kappa 0}^{(a)} = x_{2\Sigma} I_{\kappa A_2}^{(a)}, \text{ кВ} ;$$

- для однофазного КЗ:

$$U_{\kappa A_1}^{(a)} = (x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}) I_{\kappa A_1}^{(a)}, \text{ кВ} ;$$

$$U_{\kappa A_2}^{(a)} = x_{2\Sigma} I_{\kappa A_1}^{(a)}, \text{ кВ} ,$$

$$U_{\kappa 0}^{(a)} = x_{0\Sigma} I_{\kappa A_1}^{(a)}, \text{ кВ} . ;$$

9. Для каждого вида КЗ рассчитываются погрешности определения токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\Delta I_i = \frac{|I_{\kappa i}^{(M)} - I_{\kappa i}^{(a)}|}{I_{\kappa i}^{(a)}} 100 \% ; \quad \Delta U_i = \frac{|U_{\kappa i}^{(M)} - U_{\kappa i}^{(a)}|}{U_{\kappa i}^{(a)}} 100 \% ,$$

где $i = 1, 2, 0$ – номер соответствующей последовательности.

10. Результаты расчётов сводятся в табл. 2.4 и 2.5.

11. По данным табл. 2.4 и 2.5 строятся векторные диаграммы, общий вид которых показан на рис. 2.5.

Таблица 2.4

№ п/п	Вид КЗ	$I_{кА1}^{(M)}$, кА	$I_{кА1}^{(a)}$, кА	ΔI_1 , %	$I_{кА2}^{(M)}$, кА	$I_{кА2}^{(a)}$, кА	ΔI_2 , %	$I_{к0}^{(M)}$, кА	$I_{к0}^{(a)}$, кА	ΔI_0 , %
1	Двухфазное на землю									
2	Двухфазное									
3	Однофазное									

Таблица 2.5

№ п/п	Вид КЗ	$U_{кА1}^{(M)}$, кВ	$U_{кА1}^{(a)}$, кВ	ΔU_1 , %	$U_{кА2}^{(M)}$, кВ	$U_{кА2}^{(a)}$, кВ	ΔU_2 , %	$U_{к0}^{(M)}$, кВ	$U_{к0}^{(a)}$, кВ	ΔU_0 , %
1	Двухфазное на землю									
2	Двухфазное									
3	Однофазное									

2.5. Порядок оформления отчёта

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы. Кроме того, студент должен знать ответы на приведённые ниже вопросы.

2.6. Контрольные вопросы

1. Граничные условия и их физический смысл при поперечной несимметрии.
2. В чем смысл комплексной схемы замещения?
3. В чем отличие обычной схемы замещения от комплексной?
4. В чем смысл масштабного коэффициента?
5. Какими параметрами моделируются элементы реальной электроэнергетической системы при экспериментальных измерениях токов короткого замыкания?
6. В чем отличие параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей?
7. В чем смысл начала и конца схемы замещения последовательности?
8. Как влияют вращающиеся части электромеханических устройств на значение реактивностей различных последовательностей?
9. В чем смысл добавочной реактивности $x_{\Delta}^{(n)}$?

10. Объясните причины возникновения погрешностей при аналитическом расчете и расчетах по данным модельной установки?

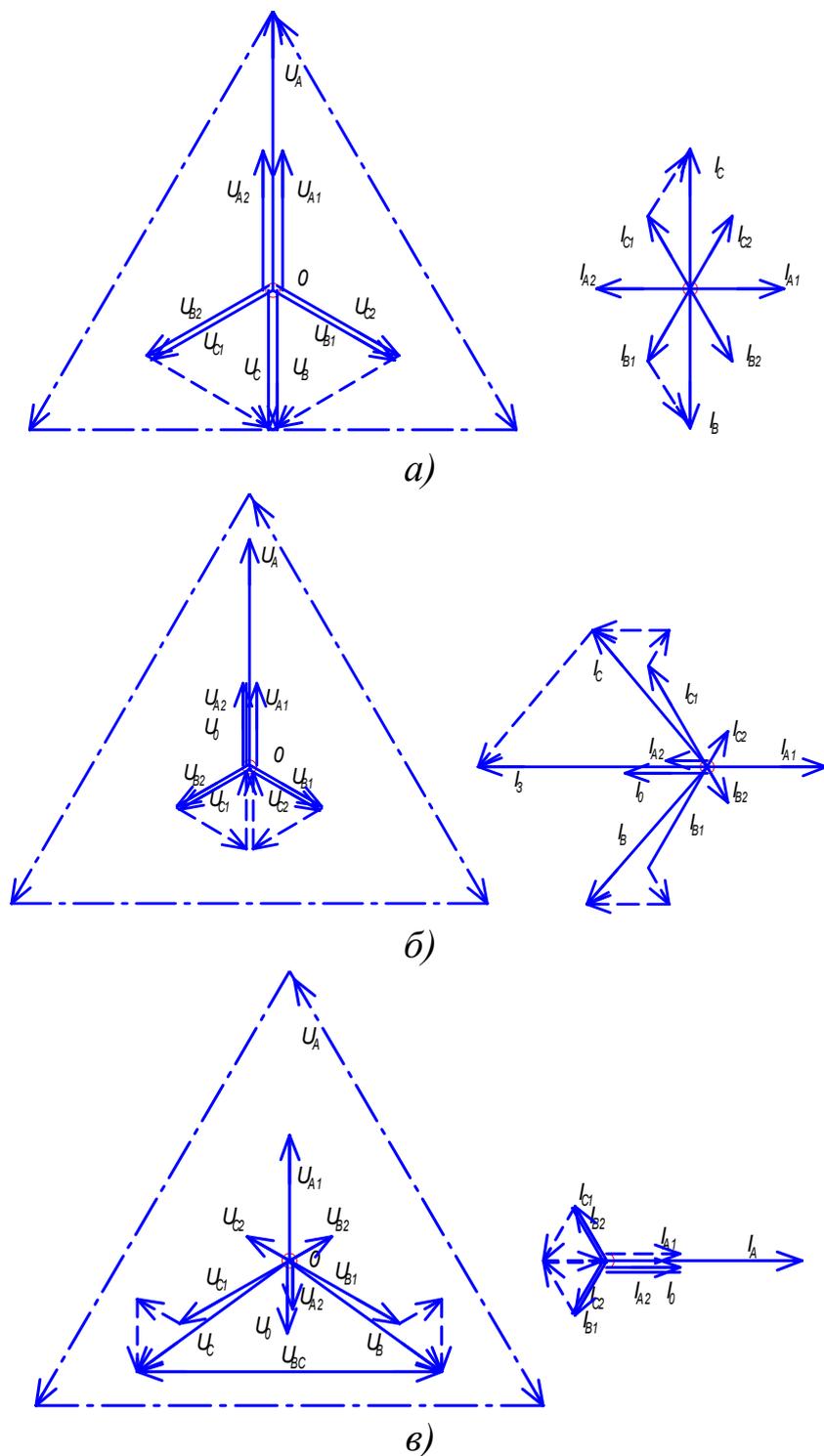


Рис. 2.5. Векторные диаграммы токов и напряжений при поперечной несимметрии: а – двухфазное КЗ; б – двухфазное КЗ на землю; в – однофазное КЗ

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель работы: изучение и экспериментальное исследование метода расчёта токов и напряжений при обрыве фаз на основе комплексных схем замещения. В результате проведения работы студенты должны **знать** основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид несимметричного режима; **уметь** рассчитывать параметры симметричных составляющих токов и напряжений и отображать их графически в виде векторных диаграмм; **приобрести навыки** экспериментального исследования параметров несимметричных режимов.

3.1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазная симметричная система напряжений промышленной частоты 220/127 В, снимаемая со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора Y_0/Y_0 . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами A, B, C, O и расположены на панели № 2 стенда. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами A, B, C, O панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр		0÷250 В	1
3	Амперметр		0,5÷1 А	2
4	Амперметр		2,5÷5А	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

3.2. Подготовка к работе

1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой по теме лабораторной работы [1, с. 401 – 404].

2. По исходным данным табл. 3.2 для заданного преподавателем варианта по формулам, приведенным в разд. 3.5, рассчитать реактивности каждого элемента системы и результирующие реактивные сопротивления прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей применительно к электрической системе, схема которой показана на рис. 3.1.

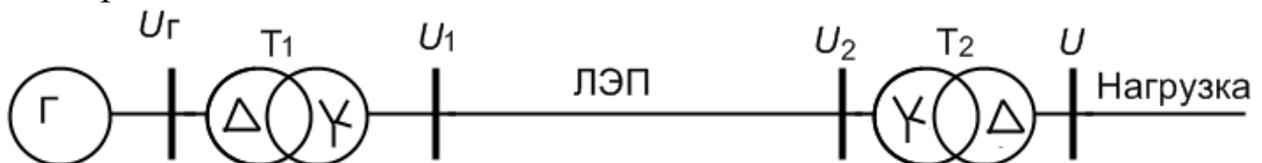


Рис. 3.1. Схема простейшей электрической системы

3. С учетом результатов расчета п. 2 изобразить комплексные электрические схемы замещения для рассматриваемых случаев обрыва проводов линии электропередачи (с учетом источника суммарной ЭДС прямой последовательности и суммарных реактивностей всех симметричных последовательностей) и соответствующие им электромонтажные схемы, предусмотрев в них включение приборов для измерения необходимых для последующих расчетов токов и напряжений.

4. Обосновать возможность замены цепи переменного тока произвольной конфигурации с чисто реактивными элементами и заданным значением тока цепью постоянного тока с чисто активными элементами и таким же значением тока.

5. Ознакомиться с принципом действия лабораторных приборов для измерения сопротивлений активных и реактивных элементов прямыми и косвенными методами.

6. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий разд. 3.2, рисунками и таблицами к разд. 3.3. При необходимости привести расчетные формулы.

Таблица 3.2

Вариант	Генератор			Т1		Линия W				Т2		Нагрузка
	S_G , МВА	x_d'' , о.е.	x_2 , о.е.	S_{T1} , МВА	U_{K1} , %	U_{cp} , кВ	l , км	$x_{уд}$, Ом/км	$x_{уд.0}$, Ом/км	S_{T2} , МВА	U_{K2} , %	
1	20	0,12	0,2	25	10,5	37	55	0,4	1,2	25	11	20
2	60	0,1	0,15	63	10,5	37	50	0,41	1,22	63	14	60
3	40	0,2	0,25	40	11	115	54	0,43	1,25	40	17	35
4	20	0,11	0,16	25	11	37	60	0,42	1,24	25	10,5	20
5	60	0,125	0,17	63	12	230	65	0,4	1,2	63	17	60
6	40	0,131	0,18	40	11	115	67	0,4	1,2	40	6	35
7	20	0,13	0,16	25	10,5	37	51	0,41	1,22	25	11	20
8	40	0,15	0,19	63	11	115	47	0,42	1,24	63	17	60
9	60	0,131	0,17	63	12	230	43	0,4	1,2	63	17	60
10	40	0,111	0,18	40	11	115	40	0,41	1,22	40	11	35
11	20	0,11	0,14	25	10,5	37	81	0,43	1,25	25	10,5	20
12	60	0,105	0,17	63	12	230	80	0,4	1,2	63	6	60
13	40	0,19	0,15	63	10,5	115	35	0,43	1,26	63	10,5	60
14	20	0,13	0,16	25	10,5	37	45	0,41	1,22	25	17	20
15	60	0,2	0,25	63	12	230	40	0,4	1,2	40	11	30

Примечание: S_G , S_{T1} , S_{T2} – номинальные мощности генераторов и трансформаторов; x_d'' – сверхпереходная реактивность генератора; x_2 – реактивность обратной последовательности генератора; U_{K1} , U_{K2} – напряжение короткого замыкания трансформаторов; l – длина линии; U_{cp} – напряжение линии; $x_{уд}$, $x_{уд.0}$ – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательностей ЛЭП; S_H – мощность нагрузки.

3.3. Рабочее задание

1. Измерить мультиметром сопротивления резистивных элементов на сменном блоке стенда и подобрать два из трех с максимальной возможной точностью в соответствии с расчетом. В случае больших отличий сопротивлений провести дополнительное масштабирование по отношению двух расчетных элементов. Третий элемент подобрать на магазине сопротивлений, увеличив его значение на дополнительный коэффициент масштабирования.

2. Собрать электромонтажную схему опыта на основании комплексной электрической схемы замещения для случая обрыва одной из фаз в начале линии из подобранных резистивных элементов, сопротивления которых равны расчетным реактивным сопротивлениям для данного вида повреждения.

3. После проверки схемы преподавателем установить автотрансформатором напряжение $E_{1\Sigma}$ так, чтобы стрелки всех приборов отклонялись за середину шкалы. Записать показания приборов в табл. 3.3. При использовании магазина сопротивлений в качестве одного из резистивных элементов комплексной схемы замещения ток через этот элемент не должен превышать 100 мА.

4. Повторить действия, описанные в пп. 2 и 3, для случая обрыва двух фаз. Результаты измерений свести в табл. 3.3.

5. Выполнить аналитический расчёт симметричных составляющих токов и определить погрешность измерений.

6. Построить векторные диаграммы токов при обрыве одной и двух фаз.

Таблица 3.3

№	Вид повреждения	Значения измеренных величин		
		I_1, A	I_2, A	I_0, A
1	Обрыв фазы			
2	Обрыв двух фаз			

Обработка результатов измерений и анализ погрешностей

Обработка результатов измерения производится в следующей последовательности:

– определяется масштабный коэффициент системы:

$$m = \frac{U_{\text{cp}} E''}{\sqrt{3} E_{1\Sigma}},$$

где U_{cp} – среднее напряжение сети, данное значение согласно варианту берётся из табл. 3.2;

$E'' = 1,08$ – значение сверхпереходной ЭДС в относительных единицах при номинальных условиях в начальный момент времени (используется только в практических расчетах);

$E_{1\Sigma}$ – суммарное напряжение прямой последовательности, определяется по показанию вольтметра (напряжение на зажимах источника питания);

– на основании экспериментальных замеров токов прямой I_1 , обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей для каждого вида повреждения рассчитываются действительные значения симметричных составляющих:

$$I_{LA_1}^{(M)} = m I_1, \quad \text{кА};$$

$$I_{LA_2}^{(M)} = m I_2, \quad \text{кА};$$

$$I_{L0}^{(M)} = m I_0, \quad \text{кА},$$

где I_1, I_2, I_0 – показания амперметров в схеме опыта в амперах;

– вычисляется значение добавочного сопротивления:

• при обрыве одной фазы:

$$x_{\Delta}^{(1)} = \frac{x_{0\Sigma} x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}},$$

• при обрыве двух фаз:

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}.$$

Для каждого вида несимметрии выполняется аналитический расчёт тока прямой последовательности:

$$I_{\kappa A_1}^{(a)} = \frac{U_{\text{cp}} E''}{\sqrt{3} (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \quad \text{кА},$$

где n принимается равным 1, 2.

Затем определяются расчетные значения токов обратной и нулевой последовательностей при разрыве одной фазы:

$$I_{LA_2}^{(a)} = -\frac{x_{\Delta}^{(1)}}{x_{2\Sigma}} I_{LA_1}^{(a)}, \quad \text{кА},$$

$$I_{L0}^{(a)} = -\frac{x_{\Delta}^{(1)}}{x_{0\Sigma}} I_{LA_1}^{(a)}, \quad \text{кА}.$$

Симметричные составляющие тока при обрыве двух фаз находятся из равенства:

$$I_{LA_0}^{(a)} = I_{LA_2}^{(a)} = I_{LA_1}^{(a)}, \quad \text{кА}.$$

Для каждого вида несимметрии рассчитываются погрешности в определении токов прямой, обратной, нулевой последовательностей:

$$\Delta I_i = \frac{|I_{LAi}^{(M)} - I_{LAi}^{(a)}|}{I_{LAi}^{(a)}} 100 \%,$$

где $i = 1, 2, 0$ – номер соответствующий симметричной последовательности.

Результаты расчётов сводятся в табл. 3.4.

Таблица 3.4

№ п/п	Вид повреждения	$I_{LA1}^{(M)}$	$I_{LA1}^{(a)}$	ΔI_1	$I_{LA2}^{(M)}$	$I_{LA2}^{(a)}$	ΔI_2	$I_{L0}^{(M)}$	$I_{L0}^{(a)}$	ΔI_0
1	Обрыв одной фазы									
2	Обрыв двух фаз									

3.4. Методические указания

Методика построения векторных диаграмм

На основе аналитических расчётов симметричных составляющих необходимо построить векторные диаграммы токов при обрыве одной и двух фаз. Порядок их построения показан на рис. 3.2.

На основе построенных диаграмм следует определить токи, протекающие в неповреждённых фазах.

Основные положения теории продольной несимметрии

Продольная несимметрия в электрических системах (ЭС) может возникать вследствие неравенства фазных сопротивлений отдельных элементов, а также при обрывах и отключениях одной или двух фаз [1].

В условиях эксплуатации фазное отключение производится не только в аварийных условиях, но и в целях проведения ремонтных, профилактических, испытательных работ. Такой режим ЭС связан с дополнительными потерями мощности, опасными перегревами двигателей и генераторов. Поэтому возникает необходимость в количественной оценке величин токов и напряжений.

Анализ процессов при продольной несимметрии проводится на основе метода симметричных составляющих. При этом предполагают, что повреждение имеет местный, сосредоточенный характер, а вся система продолжает оставаться конструктивно симметричной.

Для получения расчетных выражений в общем виде можно продольную несимметрию в какой-либо точке трехфазной системы представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений, причем последние могут быть связаны между собой взаимной индукцией, различной для каждой пары фаз. Однако из-за громоздкости выражений и их малой наглядности значительно проще, как и при поперечной несимметрии, проводить решение для каждого вида продольной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

Основные уравнения падений напряжений в схемах каждой последовательности, составленные для симметричной части системы при чисто индуктивной цепи, имеют вид (для фазы А):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{LA_1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - jX_{L1\Sigma} \dot{I}_{LA_1}; & \Delta \dot{U}_{LA_2} &= 0 - jX_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA_{21}}; \\ \Delta \dot{U}_{L0} &= 0 - jX_{L0\Sigma} \dot{I}_{L0},\end{aligned}$$

где $\Delta \dot{U}_{LA_1}$, $\Delta \dot{U}_{LA_2}$, $\Delta \dot{U}_{L0}$ – симметричные составляющие падения напряжения фазы А на несимметричном участке системы;

$X_{L1\Sigma}$, $X_{L2\Sigma}$, $X_{L0\Sigma}$ – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Суммарные сопротивления прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей определяются, исходя из расчёта сопротивлений отдельных элементов схемы замещения ЭС.

Реактивные сопротивления прямой x_1 , обратной x_2 и нулевой x_0 последовательностей отдельных элементов рассчитываются по формулам:

- для генератора, G:

$$\begin{aligned}x_{Г1} &= x'' d \frac{U_{CP}^2}{S_{Г}} \text{ [Ом];} \\ x_2 &= \frac{U_{CP}^2}{S_{Г}}, \text{ [Ом];}\end{aligned}$$

- для трансформаторов Т1, Т2:

$$x_{Т1}^{(i)} = x_{Т2}^{(i)} = x_{Т0}^{(i)} = \frac{U_{Ki} \% U_{CP}^2}{100 \cdot S_{Ti}} \text{ [Ом]}, \quad i = 1, 2;$$

- для линии электропередачи, W :

$$x_{л1} = x_{л2} = x_{уд} \cdot l \text{ [Ом];}$$

$$x_{л0} = x_{уд.0} \cdot l \text{ [Ом];}$$

- для нагрузки:

$$x_{Н1} = x_{Н2} = 0,35 \frac{U_{CP}^2}{S_H} \text{ [Ом].}$$

Результирующие сопротивления каждой последовательности вычисляются по выражениям:

$$\begin{aligned} x_{1\Sigma} &= x_{Г1} + x_{Г1}^{(1)} + x_{л1} + x_{Г1}^{(2)} + x_{Н1}; \\ x_{2\Sigma} &= x_{Г2} + x_{Г2}^{(1)} + x_{л2} + x_{Г2}^{(2)} + x_{Н2}; \\ x_{0\Sigma} &= x_{Г0}^{(1)} + x_{л0} + x_{Г0}^{(2)}. \end{aligned}$$

Основные расчетные соотношения для случая продольной несимметрии приведены в табл. 3.5.

Схема разрыва фазы A и векторные диаграммы для этого случая приведены на рис. 3.2.

Таблица 3.5

Вид несимметрии	Граничные условия	Основные расчетные соотношения	Фазные величины
Разрыв одной фазы (A)	$\dot{I}_{LA} = 0;$ $\Delta \dot{U}_{LB} = 0;$ $\Delta \dot{U}_{LC} = 0$	$\dot{I}_{LA_1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{\Delta L}^{(1)})};$ $\dot{I}_{LA_2} = \frac{-X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA_1};$ $\dot{I}_{L0} = \frac{-X_{L2\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA_1}$	$\dot{I}_{LB}^{(1)} = \left(a^2 - \frac{X_{L2\Sigma} + aX_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \right) \dot{I}_{LA_1}^{(1)};$ $\dot{I}_{LC}^{(1)} = \left(a - \frac{X_{L2\Sigma} + a^2 X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \right) \dot{I}_{LA_1}^{(1)}$
Разрыв двух фаз	$\dot{I}_{LB} = 0;$ $\dot{I}_{LC} = 0;$ $\Delta \dot{U}_{LA} = 0$	$\dot{I}_{LA_1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{\Delta L}^{(2)})};$ <p style="text-align: center;">где</p> $X_{\Delta L}^{(2)} = X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}$ $\dot{I}_{LA} = 3\dot{I}_{LA_1}$	$\Delta \dot{U}_{LA_1} = -(\Delta \dot{U}_{LA_2} + \Delta \dot{U}_{L0}) =$ $= jX_{\Delta L}^{(2)} \dot{I}_{LA_1};$ $\Delta \dot{U}_{LA_2} = -jX_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA_2} =$ $= -jX_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA_1};$ $\Delta \dot{U}_{L0} = -jX_{L0\Sigma} \dot{I}_{L0} =$ $= -jX_{L0\Sigma} \dot{I}_{LA_1}$

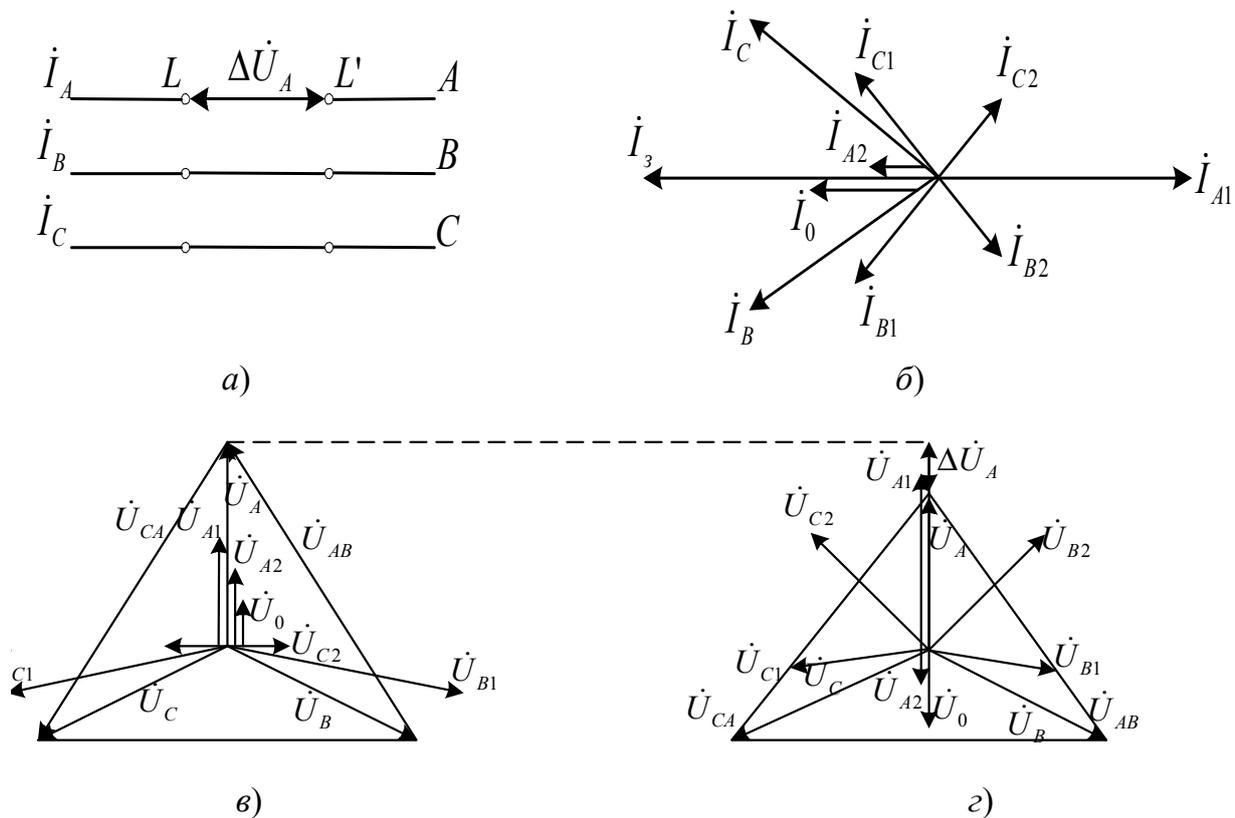


Рис. 3.2. Разрыв одной фазы трехфазной цепи: а – схема разрыва одной фазы; б – векторная диаграмма токов; в – векторная диаграмма напряжений в точке L; г – векторная диаграмма напряжений в точке L'

Схема обрыва двух фаз и векторные диаграммы для этого случая приведены на рис. 3.3.

На основании изложенного можно составить для каждого вида несимметрии комплексную схему замещения, соединив соответственным образом между собой схемы отдельных последовательностей и введя сопротивление, обуславливающее данную несимметрию. Такие схемы показаны на рис. 3.4.

Комплексные схемы замещения удобны при использовании расчетных моделей, при построении эпюра отдельных последовательностей. Если известен режим предшествующей разрыву одной или двух фаз, то определение токов и напряжений после разрыва удобно вести, используя принцип наложения. Неполнофазный (с оборванной фазой) режим можно представить как результат аварийного режима, определяемого при условии, что в месте разрыва введен идеальный источник тока ($-I_{L\Delta 0}$) с током, равным исходному току предшествующего режима, и все ЭДС из схемы удалены.

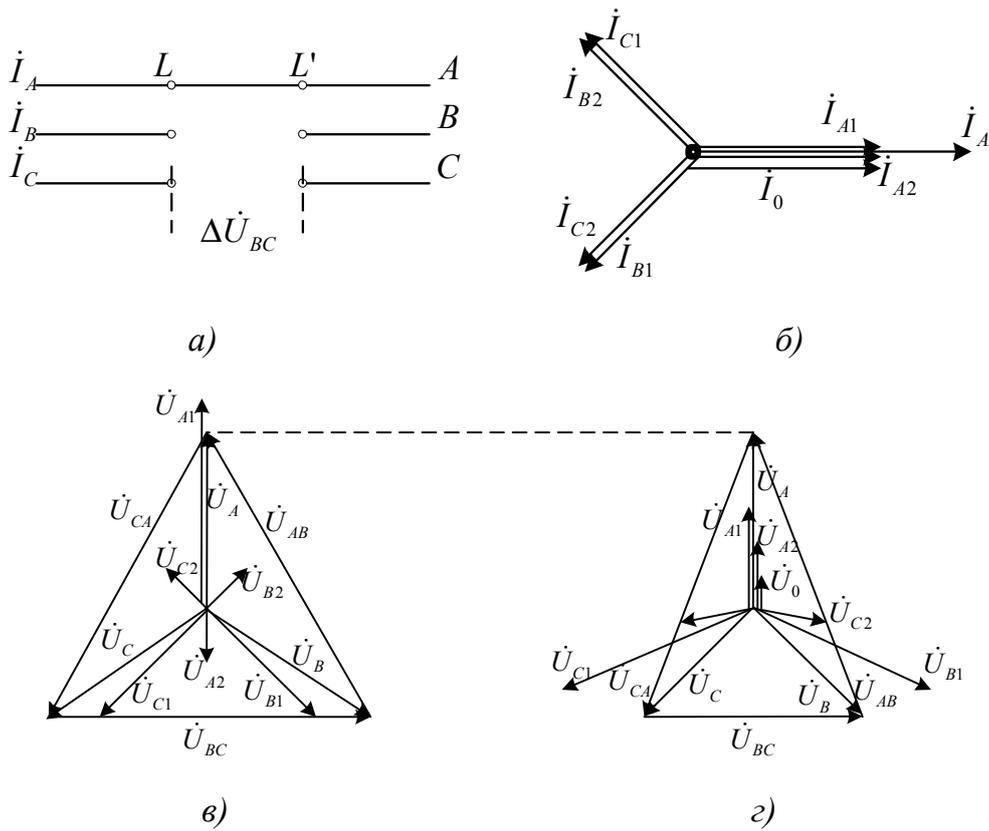


Рис. 3.3. Разрыв двух фаз трехфазной цепи: а – схема обрыва; б – векторная диаграмма токов; в – векторная диаграмма напряжений в точке L; г – векторная диаграмма напряжений в точке L'

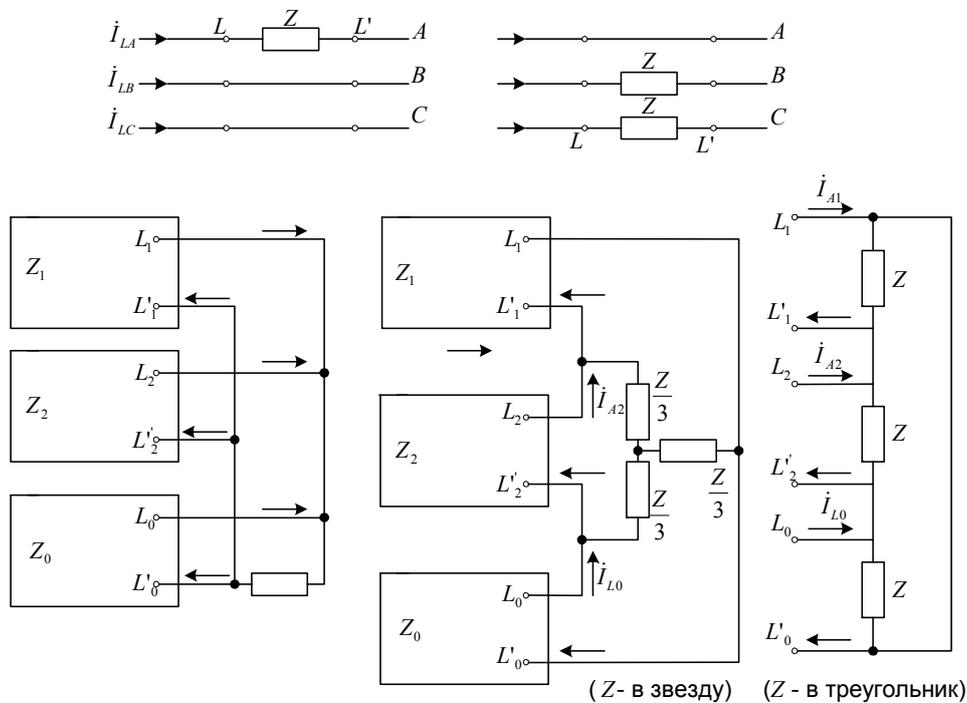


Рис. 3.4. Комплексные схемы замещения при обрыве проводов ЛЭП

3.5. Порядок оформления отчёта

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, выводы, ответы на приведённые ниже вопросы.

3.6. Контрольные вопросы

1. Как записываются граничные условия при различных однократных продольных несимметриях?
2. Как составляются комплексные схемы замещения при продольной несимметрии?
3. Как определяются приращения напряжений при продольной несимметрии?
4. Как учитывается неодновременность расхождения контактов выключателей при анализе продольной несимметрии?
5. Как вводятся в схему замещения напряжения прямой и нулевой последовательностей?
6. Чем отличаются схемы различных последовательностей при обрывах фаз от схем при несимметричных коротких замыканиях?
7. Как определяются симметричные составляющие падений напряжений при обрыве одной фазы?
8. В каких соотношениях находятся симметричные составляющие падений напряжений при обрыве двух фаз?
9. Как влияет наличие заземляющих тросов на сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи?
10. Каково различие расчётов продольной и поперечной несимметрии?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Цель работы: изучение и экспериментальное исследование переходных процессов трехфазного трансформатора по характеристикам холостого хода и короткого замыкания. В результате проведения

работы студенты должны **знать** основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора; **уметь** рассчитывать величину и кратность сверхтока включения; время переходного процесса включения; величину и кратность ударного тока внезапного короткого замыкания; **приобрести навыки** экспериментального исследования параметров переходных процессов трехфазного трансформатора.

4.1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазный трансформатор, подключаемый к напряжению промышленной частоты 220/127 В, снимаемого со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора Y_0/Y_0 . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами *A, B, C, O* и расположены на панели № 2 стенда. Включение трехфазного источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами *A, B, C, O* панели № 2. При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в таблице.

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

4.2. Подготовка к работе

1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 401 – 404].
2. Ознакомиться с устройством и номинальными данными трансформатора.
3. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов холостого хода и короткого замыкания исследуемого трансформатора. В схемах предусмотреть включение измерительных приборов для измерения токов и напряжений. Выбрать контрольные точки для снятия осциллограмм. Составить таблицу для записи экспериментальных данных.
4. Изобразить схемы замещения двухобмоточного трансформатора для напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей и привести формулы расчета параметров этих схем замещения.
5. Изобразить векторную диаграмму двухобмоточного трансформатора для активно-индуктивной нагрузки и записать основные уравнения трансформатора в переходном и установившемся режимах.
6. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий разд. 4.2, рисунками и таблицами к разд. 4.3. При необходимости привести расчетные формулы.

4.3. Рабочее задание

1. Собрать электромонтажную схему для проведения опыта холостого хода, используя оборудование и приборы, расположенные на лабораторном стенде. После проверки схемы преподавателем включить питание стенда и трехфазного источника.
2. Провести опыт снятия характеристики холостого хода трансформатора. Показания приборов свести в таблицу.
3. Провести опыт снятия характеристики короткого замыкания трансформатора. Показания приборов свести в таблицу.
4. Снять осциллограммы в выбранных контрольных точках:
 - тока включения;
 - тока внезапного короткого замыкания.

5. По осциллограммам п. 4 определить:

- значение и кратность сверхтока включения (по сравнению с установившимся током холостого хода), а также время переходного процесса включения;

- значение и кратность ударного тока (сверхтока) внезапного короткого замыкания (по сравнению с номинальным током), а также время переходного процесса внезапного короткого замыкания.

4.4. Методические указания

Переходные процессы в трансформаторах

Переходные процессы в трансформаторах возникают при всяком внезапном изменении режима их работы: присоединении трансформатора к сети (включение), отсоединение трансформатора от сети (отключение), резком изменении нагрузки, коротком замыкании первичной или вторичной цепи, изменении напряжения или частоты питающей сети.

Переходные процессы могут сопровождаться рядом опасных для трансформатора эффектов: недопустимыми механическими усилиями между обмотками (нарушение механической стойкости), неравномерным распределением напряжений между отдельными частями обмоток, недопустимым нагревом обмоток (электрическая и термическая стойкость). Таким образом, переходные процессы в значительной степени определяют требования к механической, электрической и термической прочности трансформаторов.

В зависимости от того, какой параметр – ток или напряжение – определяют в основном переходный режим трансформатора, различают две главные группы неустановившихся электромагнитных явлений: сверхтоки (экстратоки) и перенапряжения (волновые явления).

Перенапряжения характерны в основном для трансформаторов относительно большой мощности и связаны с волновыми процессами в электрических сетях или с атмосферными (грозовыми) явлениями.

Сверхтоки наиболее характерно проявляются в двух случаях:

1) при включении трансформатора на сеть вхолостую (без нагрузки);

2) при внезапном коротком замыкании вторичных цепей трансформатора.

В условиях эксплуатации токи включения (пусковые токи) необходимо учитывать при регулировке защитной аппаратуры и при оценке механических усилий, возникающих между витками первичной обмотки трансформатора. Токи короткого замыкания необходимо учитывать при оценке механической и термической прочности как первичной, так и вторичной обмотки и выборе выключателей по отключающей способности.

Включение трехфазного силового трансформатора в сеть на холостом ходу

Рассмотрим включение трехфазного трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке на сеть относительно большой мощности, напряжение которой синусоидально и не изменяется по амплитуде

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi).$$

Электромагнитные процессы в отдельных фазах трансформатора сдвинуты между собой на угол 120° , поэтому в симметричном режиме для каждой из фаз можно записать однотипные соотношения (схема замещения на фазу).

Выбираем для рассмотрения стержневой трансформатор, влиянием третьей и высших гармоник пренебрегаем. В соответствии со вторым законом Кирхгофа электромагнитное состояние первичной обмотки трансформатора можно отобразить уравнением

$$u_1 + e_1 = i_{10} r_1, \quad (4.1)$$

где $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$ – ЭДС первичной обмотки;

i_{10} – ток первичной обмотки при холостом ходе;

w_1, r_1 – число витков и активное сопротивление первичной обмотки;

Φ – магнитный поток самоиндукции.

В общем случае уравнение (4.1) является нелинейным. Поэтому рассмотрим его приближенное решение, предполагая, что магнито-

провод трансформатора не насыщен и между намагничивающим током и потоком существует линейная зависимость

$$\psi = w_1 \Phi = L_1 i_{10},$$

где ψ , L_1 – потокосцепление и индуктивность первичной обмотки.

Суммарная индуктивность L_1 включает в себя взаимную индуктивность первичной и вторичной обмоток и индуктивность рассеяния первичной цепи.

Из приведенного соотношения находим ток первичной обмотки при холостом ходе

$$i_{10} = \frac{w_1 \Phi}{L_1}.$$

Подставляя значения u_1 , e_1 и i_{10} в уравнение (4.1), получаем уравнение электромагнитного состояния трансформатора

$$\frac{w_1 r_1}{L_1} \Phi + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

или

$$\frac{I}{T_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4.2)$$

где $T_1 = \frac{L_1}{r_1}$ – постоянная времени первичной обмотки;

φ_0 – начальная фаза включения трансформатора.

Решение неоднородного дифференциального уравнения (4.2) определяется в виде двух слагаемых: частного решения уравнения (4.2) и общего решения однородного уравнения, соответствующего уравнению (4.2) (принужденная и свободная составляющие):

$$\Phi = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{св}},$$

где $\Phi_{\text{пр}}$ – мгновенное значение установившегося (принужденного) потока;

$\Phi_{\text{св}}$ – мгновенное значение переходного (свободного) потока.

Выражение для установившегося потока можно привести к виду

$$\Phi_{\text{пр}} = \Phi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_1) \approx -\Phi_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4.3)$$

где $\Phi_m = \frac{I_{10m} L_1}{w_1} = \frac{U_{1m} L_1}{w_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \approx \frac{U_{1m}}{w_1 \omega}$ – амплитуда потока самоиндукции (при $\omega L_1 \gg r_1$);

$\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$ (при $\omega L_1 \gg r_1$) – фазовый угол между током и напряжением.

В том, что (4.3) является решением исходного уравнения (4.2), можно убедиться простой проверкой, подставив (4.3) в (4.2). Свободный поток определяется решением уравнения

$$\frac{\Phi_{\text{св}}}{T_1} + \frac{d\Phi_{\text{св}}}{dt} = 0,$$

которое имеет вид

$$\Phi_{\text{св}} = C e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (4.4)$$

Постоянная интегрирования \dot{N} дается начальным условием: в момент включения $t = 0$ магнитный поток равен нулю или, в общем случае, остаточному потоку Φ_0 . Поток Φ_0 может иметь любой знак в зависимости от направления поля остаточного магнетизма. При $t = 0$ на основании уравнений (4.3) и (4.4) справедливо равенство

$$\Phi = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{св}} = -\Phi_m \cos \varphi_0 + C = \pm \Phi_0,$$

из которого получаем

$$C = \Phi_m \cos \varphi_0 \pm \Phi_0$$

и

$$\Phi_{\text{св}} = (\Phi_m \cos \varphi_0 \pm \Phi_0) e^{-\frac{t}{T_1}}.$$

Таким образом, изменение магнитного потока во времени описывается уравнением

$$\Phi = \Phi_m \left[e^{-\frac{t}{T_1}} \cos \varphi_0 - \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \pm \Phi_0 e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (4.5)$$

Наиболее благоприятными условиями включения (при $t = 0$) служат

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \text{ и } \Phi_0 = 0.$$

При этом согласно уравнению (4.5)

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin \omega t. \quad (4.6)$$

Уравнение (4.6) означает, что включение происходит без переходного процесса, в трансформаторе с первого момента устанавливается нормальный поток и сверхтоки не возникают.

Наиболее резко переходный процесс выявляется, если в момент включения ($t = 0$) угол $\varphi_0 = 0$, а поток Φ_0 противоположен по направлению потоку $\Phi_{пр}$. В этом случае согласно (4.5)

$$\Phi = -\Phi_m \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos \omega t \right) + \Phi_0 e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (4.7)$$

Анализ (4.7) показывает, что наибольшего значения поток Φ достигает приблизительно через половину периода после включения при $\omega t = \pi$ или $t = \frac{\pi}{\omega}$, когда

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} = \Phi_m \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_1}} \right) + \Phi_0 e^{-\frac{\pi}{\omega T_1}}. \quad (4.8)$$

При $r_1 \ll \omega L_1$ можно полагать:

$$e^{-\frac{\pi}{\omega T_1}} = e^{-\frac{\pi r_1}{\omega L_1}} \approx 1 \quad (4.9)$$

Поток Φ_0 может в отдельных случаях достигать относительно больших значений ($\Phi_0 < 0,5\Phi_m$).

Таким образом, в предельном случае на основании выражений (4.8) и (4.9) получим

$$\Phi_{\text{макс}} \approx 2\Phi_m + 0,5\Phi_m = 2,5\Phi_m.$$

При наличии остаточного намагничивания для создания потока $\Phi - \Phi_{\text{ост}}$ требуется намагничивающий ток i_{10} , величину которого можно определить по магнитной характеристике трансформатора.

На рис. 4.1, а приведены графики изменения во времени магнитного потока $\Phi = \Phi(t)$ и его периодической и аperiodической составляющих в соответствии с уравнением (4.7), причем

$$\Phi_{\text{ост}} = \Phi_0 e^{-\frac{t}{T_1}}.$$

На рис. 4.1, б показан графический способ определения намагничивающего тока $i_{10} = f(t)$ с помощью магнитной характеристики, построенной в квадранте I. В квадрантах II и III построен график временной зависимости $\Phi - \Phi_{\text{ост}} = f(t)$, полученный на основании рис. 4.1, а. В квадрантах III и IV построена временная зависимость тока холостого хода трансформатора $i_{10} = f(t)$, полученная при помощи перехода от мгновенных значений потока $\Phi - \Phi_{\text{ост}}$ к мгновенным значениям тока i_{10} .

Максимальное значение тока холостого хода $i_{10\text{макс}}$, соответствующее наибольшему значению потока $\Phi_{\text{макс}} - \Phi_{\text{ост}}$, достигается в момент времени $t = \pi/\omega$, то есть примерно через половину периода после момента включения. Максимальное значение тока холостого

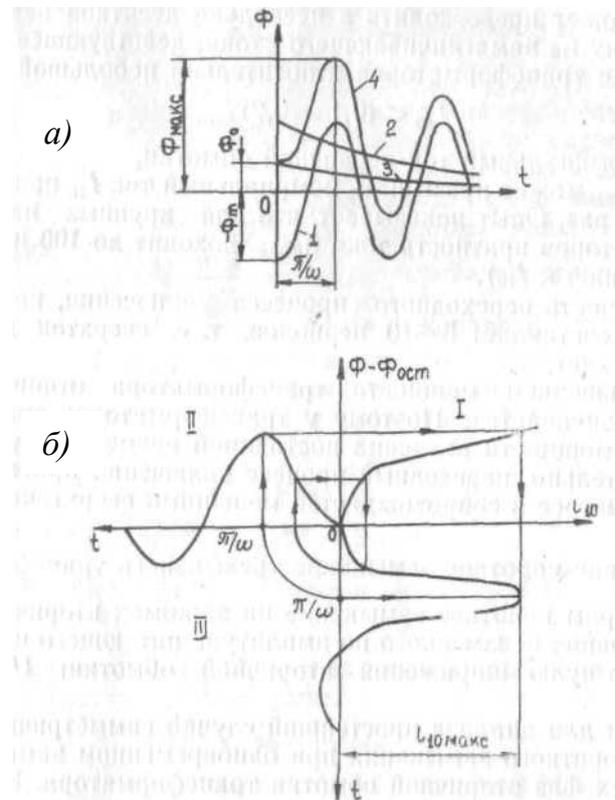


Рис. 4.1. Процесс включения трансформатора: а – графики магнитных потоков при включении: 1 – периодическая составляющая $\Phi_m \cos \omega t$; 2 – аperiodическая составляющая $\Phi_m e^{-\frac{t}{T_1}}$; 3 – остаточный поток $\Phi_{\text{ост}} = \Phi_0 e^{-\frac{t}{T_1}}$; 4 – результирующий поток $\Phi = \Phi(t)$; б – построение графика тока включения $i_{10} = f(t)$

хода $i_{10\text{макс}}$ называют сверхтоком включения. При индукции в магнитопроводе порядка 1,6 Тл он может превосходить в несколько десятков раз нормальную величину i_{10} намагничивающего тока, действующее значение которого для трансформаторов относительно небольшой мощности

$$i_{10} < (0,1 \div 0,2) i_{1н},$$

где $i_{1н}$ – номинальный ток первичной обмотки.

Максимальное значение тока холостого хода $i_{10\text{макс}}$ может превышать номинальный ток $i_{1н}$ приблизительно в 5 – 25 раз. Опыт показывает, что для крупных трансформаторов при насыщении магнитопровода кратность тока $i_{10\text{макс}}$ доходит до 100 и более раз (по отношению к i_{10}).

Длительность переходного процесса включения, как правило, невелика и составляет 5 – 10 периодов, то есть сверхток достаточно быстро затухает.

С уменьшением мощности трансформатора отношение r_1/L_1 обычно увеличивается. Поэтому у трансформаторов сравнительно небольшой мощности значение постоянной времени T уменьшается, следовательно, переходный процесс включения протекает быстрее и сопровождается меньшими сверхтоками.

Внезапное короткое замыкание трехфазного силового трансформатора

Рассмотрим короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки при условиях неизменного по амплитуде питающего напряжения и равенства нулю напряжения вторичной обмотки: $U_{1m} = \text{const}; u_2 = 0$.

Выберем для анализа простейший случай симметричного (трехфазного металлического) короткого замыкания при одновременном замыкании накоротко всех фаз вторичной обмотки трансформатора. Как известно, при коротком замыкании током холостого хода можно пренебречь, так как он очень мал по сравнению

с током в первичной обмотке или приведенным током вторичной обмотки (реактивность ветви намагничивания значительно больше реактивности короткого замыкания). В этом случае схема замещения каждой фазы трансформатора представляет собой электрическую цепь с общим активным сопротивлением $r_k = r_1 + r'_2$ и общим индуктивным сопротивлением

$$x_k = x_1 + x'_2 = \omega L_{10} + \omega L'_{20},$$

где r'_2, x'_2 – приведенные к первичной обмотке активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

L_{10}, L'_{20} – индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Поскольку потоки рассеяния трансформатора замыкаются, проходя главным образом в немагнитной среде, то индуктивность рассеяния трансформатора можно считать неизменной величиной

$$L_k = L_{10} + L'_{20} = \text{const}.$$

Следовательно, при коротком замыкании для каждой фазы приведенного трехфазного трансформатора в соответствии со схемой замещения по 2-му закону Кирхгофа справедливо соотношение

$$u_1 + e_k = i_k r_k, \quad (4.10)$$

где $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_k)$ – напряжение на первичной обмотке;

φ_k – начальная фаза напряжения (в момент короткого замыкания), аналогичная фазе включения φ_0 при холостом ходе;

$e_k = -L_k \frac{di_k}{dt}$ – ЭДС приведенного трансформатора при коротком замыкании;

$i_k = i_{1k} = i'_{2k}$ – ток короткого замыкания приведенного трансформатора.

Подставляя значения u_1 и e_k в уравнение (4.10) и деля его на L_k , получим

$$\frac{1}{T_k} i_k + \frac{di_k}{dt} = \frac{U_{1m}}{L_k} \sin(\omega t + \varphi_k), \quad (4.11)$$

где $T_k = \frac{L_k}{r_k}$ – постоянная времени приведенного трансформатора.

Решение уравнения (4.11) по аналогии с решением уравнения (4.2) представляется в виде суммы:

$$i_k = i_{k.пр} + i_{k.св}, \quad (4.12)$$

где $i_{k.пр}$, $i_{k.св}$ – мгновенные значения установившегося и переходного токов короткого замыкания.

Установившийся (принужденный) ток определяется по формуле

$$i_{k.пр} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi) \cong -\frac{U_{1m}}{z_k} \cos(\omega t + \varphi_k), \quad (4.13)$$

где $z_k = \sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}$ – полное (кажущееся) сопротивление короткого замыкания;

$\varphi = \frac{\pi}{2}$ (при $\omega L_k \gg r_k$) – фазовый угол между током и напряжением при установившемся режиме короткого замыкания.

Путем проверки нетрудно убедиться, что (4.13) является частным решением уравнения (4.11).

Решение уравнения

$$\frac{1}{T_k} i_{k.св} + \frac{di_{k.св}}{dt} = 0$$

дает свободный (переходный) ток

$$i_{k.св} = A e^{-t/T_k}. \quad (4.14)$$

Постоянная интегрирования A определяется из начальных условий (при $t = 0$) в момент времени короткого замыкания.

Ток короткого замыкания при $t = 0$ равен приведенному току i'_2 нагрузки трансформатора в момент короткого замыкания:

$$\lim_{t \rightarrow 0} i_k = \lim_{t \rightarrow 0} i_{k.пр} + \lim_{t \rightarrow 0} i_{k.св} = \lim_{t \rightarrow 0} i'_2 = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2),$$

где φ_2 – фазовый угол тока нагрузки в момент короткого замыкания.

На основании выражений (4.13) и (4.14)

$$\lim_{t \rightarrow 0} i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi) + A \cong -\frac{U_{1m}}{z_k} \cos(\varphi_k) + A = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2),$$

откуда:

$$A = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) - \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi) \cong I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{U_{1m}}{z_k} \cos(\varphi_k).$$

Таким образом, общее решение уравнения (4.11) имеет вид

$$i_k = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi) + \left[I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi) \right] e^{-t/T_k}. \quad (4.15)$$

Ток короткого замыкания обычно во много раз превосходит ток нагрузки, поэтому для облегчения анализа уравнения (4.15) пренебрежем током нагрузки, то есть рассмотрим внезапное короткое замыкание при холостом ходе трансформатора, когда приведенный ток нагрузки

$$i'_2 = I'_{2m} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi) = 0.$$

В этом случае переходный процесс трансформатора описывается уравнением

$$i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \left| e^{-t/T_k} \cos \varphi_k - \cos(\omega t + \varphi_k) \right|, \quad (4.16)$$

которое получается из выражения (4.15), если принять $\varphi = \frac{\pi}{2}$, что, как правило, соответствует действительности и нарушается только для трансформаторов очень малой мощности.

Анализ уравнения (4.16) показывает, что характер переходного процесса определяется величиной начальной фазы напряжения φ_k .

Рассмотрим два предельных случая.

1. В момент времени $t = 0$ угол $\varphi_k = \frac{\pi}{2}$. При этом напряжение сети проходит через максимум ($u_1 = U_{1m}$). В этом случае свободный ток не возникает:

$$i_{k.св} = \frac{U_{1m}}{z_k} e^{-t/T_k} \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Следовательно, в трансформаторе сразу наступает режим установившегося короткого замыкания с амплитудой тока $I_{km} = \frac{U_{1m}}{z_k}$.

2. Неблагоприятный случай, который необходимо учитывать при проектировании трансформаторов, – короткое замыкание в момент, когда $\varphi_k = 0$, то есть когда в момент нарушения режима (при $t = 0$) напряжение сети проходит через нуль $u_1 = 0$. Согласно уравнению (4.16) при этом ток короткого замыкания достигает наибольшего значения через половину периода напряжения питающей сети (при $t = \pi/\omega$):

$$i_{k.\text{макс}} = \frac{U_{1m}}{z_k} (e^{-\pi/T_k \omega} - \cos \pi) = I_{km} (1 + e^{-\pi/T_k \omega}). \quad (4.17)$$

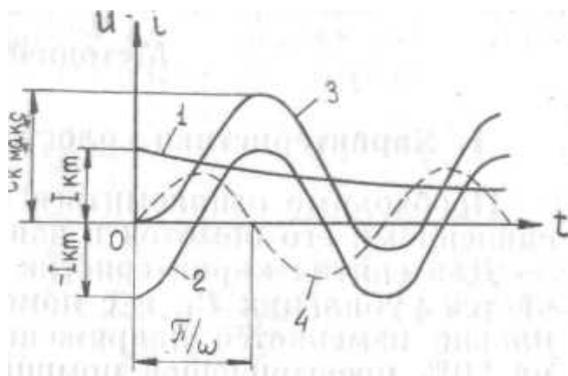


Рис. 4.2. Изменение тока внезапно-
го уравнения короткого замыкания
при холостом ходе в момент

$$\varphi_k = 0; u_1 = 0:$$

$$1 - i_{k.\text{св}} = I_{km} e^{-t/T_k};$$

$$2 - i_{k.\text{пр}} = -I_{km} \cos \omega t;$$

$$3 - i_k = f(t); 4 - u_1 = U_{1m} \sin(\omega t)$$

Изменение тока короткого замыкания во времени в соответствии с уравнением (4.16) при $\varphi_k = 0$ графически показано на рис. 4.2.

Пренебрегая активным сопротивлением первичной обмотки трансформатора (при $r_k \ll \omega L_k$), можно полагать

$$e^{-\pi/T_k \omega} = e^{-\pi r_k / L_k \omega} \cong 1,$$

тогда согласно (4.17) в самом неблагоприятном случае наибольшая величина тока короткого замыкания (ударный ток короткого замыкания) составляет

$$i_{k.\text{макс}} = 2I_{km}.$$

Для трансформаторов сравнительно малой мощности, для которых несправедливо неравенство ($\omega L_k \gg r_k$), ударный ток меньше:

$$i_{k.\text{макс}} \approx (1,2 \div 1,3) I_{km}.$$

Если короткое замыкание трансформатора происходит при номинальном напряжении на зажимах его первичной обмотки, то максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания может в десятки раз превосходить величину номинального тока, в особенности для трансформаторов с небольшими напряжениями короткого замыкания.

Во избежание повреждения обмоток трансформатора опыт внезапного короткого замыкания проводится при пониженном напряжении.

Переходный процесс при коротком замыкании быстро затухает. Для трансформаторов сравнительно большой мощности он заканчивается практически в течение шести-семи периодов, для трансформаторов малой мощности – приблизительно в течение одного-двух периодов. Это объясняется тем, что с уменьшением мощности активное сопротивление обмоток трансформатора возрастает, а индуктивное – уменьшается. Несмотря на кратковременность процесса, неустановившийся ток короткого замыкания представляет большую опасность для трансформатора с точки зрения электродинамических усилий в обмотках, которые пропорциональны квадрату тока. Эти усилия могут привести к повреждению обмоток и изоляции трансформатора.

Установившийся ток короткого замыкания представляет опасность для термической прочности трансформатора. Он может вызвать недопустимый нагрев обмотки, который также приведет к повреждению электрической изоляции. В связи с этим короткое замыкание надо как можно скорее отключать.

4.5. Порядок оформления отчёта

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения, выводы, ответы на приведённые ниже вопросы.

Построение характеристик холостого хода и короткого замыкания

Характеристики холостого хода $I_{10} = f(U_1)$ и короткого замыкания $I_{1к} = f(U_1)$ следует строить на одном чертеже, с помощью которого определяется величина установившегося тока короткого замыкания $I_{1к} = I_{1н}$ при $U_1 < U_{1н}$. Эта величина используется для определения масштаба осциллограммы тока внезапного короткого замыкания. По характеристике холостого хода определяется масштаб осциллограммы тока включения (при номинальном напряжении первичной обмотки).

Обработка осциллограмм

Среди осциллограмм переходного процесса включения выбирается кривая с наиболее характерным броском тока, приближенно предполагается, что она соответствует включению трансформатора в момент времени, когда $\varphi_0 = 0$.

По характеристике холостого хода определяется установившийся ток I_{10} , соответствующий напряжению сети U_1 . На осциллограмме измеряется амплитуда установившегося тока светового следа.

Для определения масштаба осциллограммы необходимо от действующего значения тока на характеристике перейти к амплитудному: $I_{10i} = I_{10} \sqrt{2}$.

По осциллограмме определяют ток $i_{10 \text{ макс}}$ (в миллиметрах) и, деля его на масштаб тока, находят величину сверхтока включения (в амперах).

Кратность сверхтока включения составляет

$$k_{i0} = \frac{i_{10 \text{ макс}}}{I_{10m}}$$

Подсчитав количество периодов N от $t = 0$ до достижения установившегося тока, определяют время переходного процесса:

$$t_n = \frac{N}{f} \text{ сек,}$$

где f – частота трансформатора.

Аналогично поступают при определении величины и кратности сверхтока короткого замыкания. Масштаб установившегося тока на осциллограмме определяется с помощью характеристик холостого хода и короткого замыкания по току I_{1k} , соответствующему напряжению $U_1 < U_{1н}$, при котором получается номинальное значение тока.

Приведение токов короткого замыкания к номинальному значению напряжения в простейшем случае производят путем пропорционального пересчета:

$$i_{1k} = \frac{i_{1k} \times U_{1н}}{U_1}; \quad i_{1k} = \frac{i_{1k \text{ макс}}}{I_{1hm}}$$

4.6. Контрольные вопросы

1. Что подразумевается под понятием «переходный процесс», в чём состоит физическая суть переходного процесса?
2. Закон коммутации.
3. Какие методы расчёта переходных процессов вы знаете? Применимы ли они для расчёта переходных процессов в трёхфазных силовых трансформаторах? Что лежит в основе всех методов расчёта переходных процессов?
4. Какие виды переходных процессов возникают в трёхфазных силовых трансформаторах? Какие из них наиболее часто возникают при эксплуатации силового трансформатора?
5. Как влияет короткозамкнутый контур на переходный процесс в магнитносвязанной электрической цепи?
6. Какую особенность имеют переходные процессы в неподвижных магнитносвязанных цепях?
7. При каких условиях можно не учитывать ток намагничивания трансформатора?
8. Чем вызван бросок тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора в электрическую сеть?
9. Как влияет нелинейность характеристики намагничивания ферромагнитного материала на форму кривой тока намагничивания катушки с ферромагнитным сердечником?

Лабораторная работа № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение и экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора. В результате проведения работы студенты должны знать основ-

ные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора, и условия трансформации токов нулевой последовательности; **уметь** рассчитывать значения полного сопротивления нулевой последовательности и его активной и реактивной составляющих; **приобрести навыки** экспериментального исследования параметров сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора.

5.1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазный трансформатор, подключаемый к регулируемому однофазному источнику напряжения промышленной частоты в сети 220/127 В, снимаемого со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВА. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора Y_0/Y_0 . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами *A*, *B*, *C*, *O* и расположены на панели № 2 стенда. Здесь же расположен источник регулируемого напряжения 0 – 240В. Включение регулируемого источника производится путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами 0 – 240В панели № 2. При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение регулируемого источника осуществляется нажатием красной кнопки. Измерение токов, напряжений и мощности осуществляется амперметрами, вольтметрами и ваттметром, параметры которых приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	Электро- динамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

5.2. Подготовка к работе

1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 285 – 289].

3. Составить электрическую принципиальную и электромонтажную схемы опытов измерения сопротивления нулевой последовательности исследуемого трансформатора. При этом первичную обмотку трехфазного трансформатора, соединенную по схеме разомкнутого треугольника, запитать от регулируемого однофазного источника, а вторичную трехфазную обмотку сначала соединить в треугольник, а затем в звезду с заземленной нейтралью. В качестве нагрузки трансформатора использовать резистивные элементы стенда сопротивлением 430 Ом, соединенные в звезду с нулевым проводом. В схемах предусмотреть включение измерительных приборов для измерения токов, напряжений и мощности. Предусмотреть измерение активной мощности по схеме двух ваттметров и по схеме трех ваттметров. Составить таблицу для записи экспериментальных данных.

4. Изобразить схемы замещения двухобмоточного трехфазного трансформатора для напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей и привести формулы расчета параметров этих схем замещения.

5. Провести аналитический расчёт результирующих реактивных сопротивлений прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей трансформатора по паспортным данным:

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T0} = \frac{U_k(\%) U_{cp}^2(\text{кВ})}{100 S_T(\text{МВ} \cdot \text{А})}, \text{ Ом.}$$

6. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий разд. 5.2, рисунками и таблицами к разд. 5.3. При необходимости привести расчетные формулы.

5.3. Рабочее задание

1. Собрать электромонтажную схему опыта измерения сопротивления нулевой последовательности исследуемого трансформатора – при соединении первичной обмотки в разомкнутый треугольник, а вторичной обмотки трансформатора – в треугольник, используя оборудование и приборы, расположенные на лабораторном стенде. После проверки схемы преподавателем включить питание стенда и регулируемого источника. Измерить напряжение, ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 5.2.

$$U_0 = \frac{U_{0A} + U_{0B} + U_{0C}}{3}; \quad I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}; \quad P_0 = \frac{P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}}{3}.$$

2. Соединить вторичную обмотку трансформатора в звезду с изолированной нейтралью, после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение, ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 5.2.

3. Соединить вторичную обмотку трансформатора в звезду с заземлённой нейтралью, после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение, ток и мощность вторичной обмотки в каждой фазе, вычислить среднее значение, результаты измерений занести в табл. 5.2.

4. На основании полученных данных по формулам определить сопротивления нулевой последовательности трансформатора Z_0 , R_0 , X_0 (см. разд. 5.4) при соединении вторичной обмотки в треугольник, в звезду с изолированной нейтралью, в звезду с заземлённой нейтралью. Результаты расчета записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Схема соединения вторичной обмотки	Экспериментальные данные			Расчетные данные		
	U_0 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	Z_0 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом
Треугольник Δ						
Звезда с изолированной нейтралью Y						
Звезда с заземлённой нейтралью Y_0						

5.4. Методические указания

Схема нулевой последовательности

Схема нулевой последовательности заметно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, протекающим по линии «три фазы – земля». Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия), или последовательно, в рассечку фазных проводов (продольная несимметрия), как это показано на рис. 5.1.

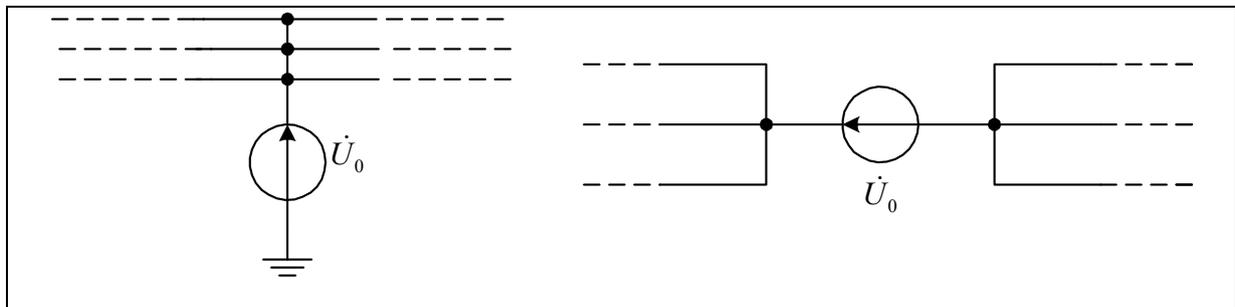


Рис. 5.1. Введение в схему напряжения нулевой последовательности в точках поперечной и продольной несимметрии

Далее, исходя из вида несимметрии, выявляют возможные пути протекания токов нулевой последовательности в электрически связанной цепи. Следует помнить, что сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной, (так как схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а их три).

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом – точку, где возникла несимметрия. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии). При незаземленной нейтрали системы начало схемы теряет смысл.

Обязательным этапом расчета несимметричного режима является определение результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла несимметрия. При этом из схемы прямой последовательности находят также результирующую ЭДС относительно той же точки. Необходимые преобразования проводят с применением принципа наложения. Однако при этом необходимо помнить о принципиальных различиях в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметриях (см. метод. указания к лаб. работе № 2). Конечное значение реактивности нулевой последовательности имеют только трансформаторы, входная обмотка которых для нулевой последовательности соединена звездой с нулевым проводом. Во всех остальных схемах соединения реактивность X_0 стремится к бесконечности.

Основные варианты соединения обмоток двух- и трехобмоточных трансформаторов, при которых приложенное к обмотке I напряжение нулевой последовательности вызывает в одной или в обеих обмотках ток той же последовательности, приведены на рис. 5.2. Здесь же показаны схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности.

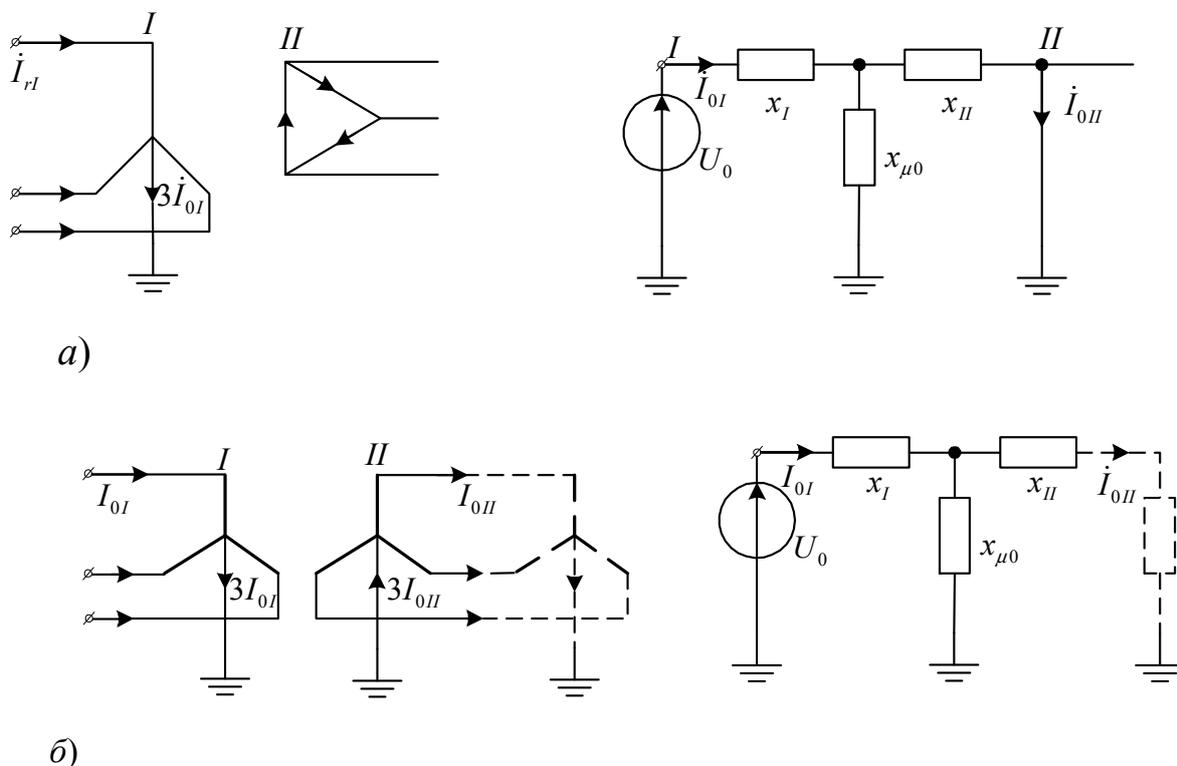


Рис. 5.2. (Начало). Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов и их схемы замещения для токов нулевой последовательности: а – Y_0/Δ ; б – Y_0/Y_0 ; в – Y_0/Y ; г – $Y_0/\Delta/Y$; д – $Y_0/\Delta/Y_0$; е – $Y_0/\Delta/\Delta$

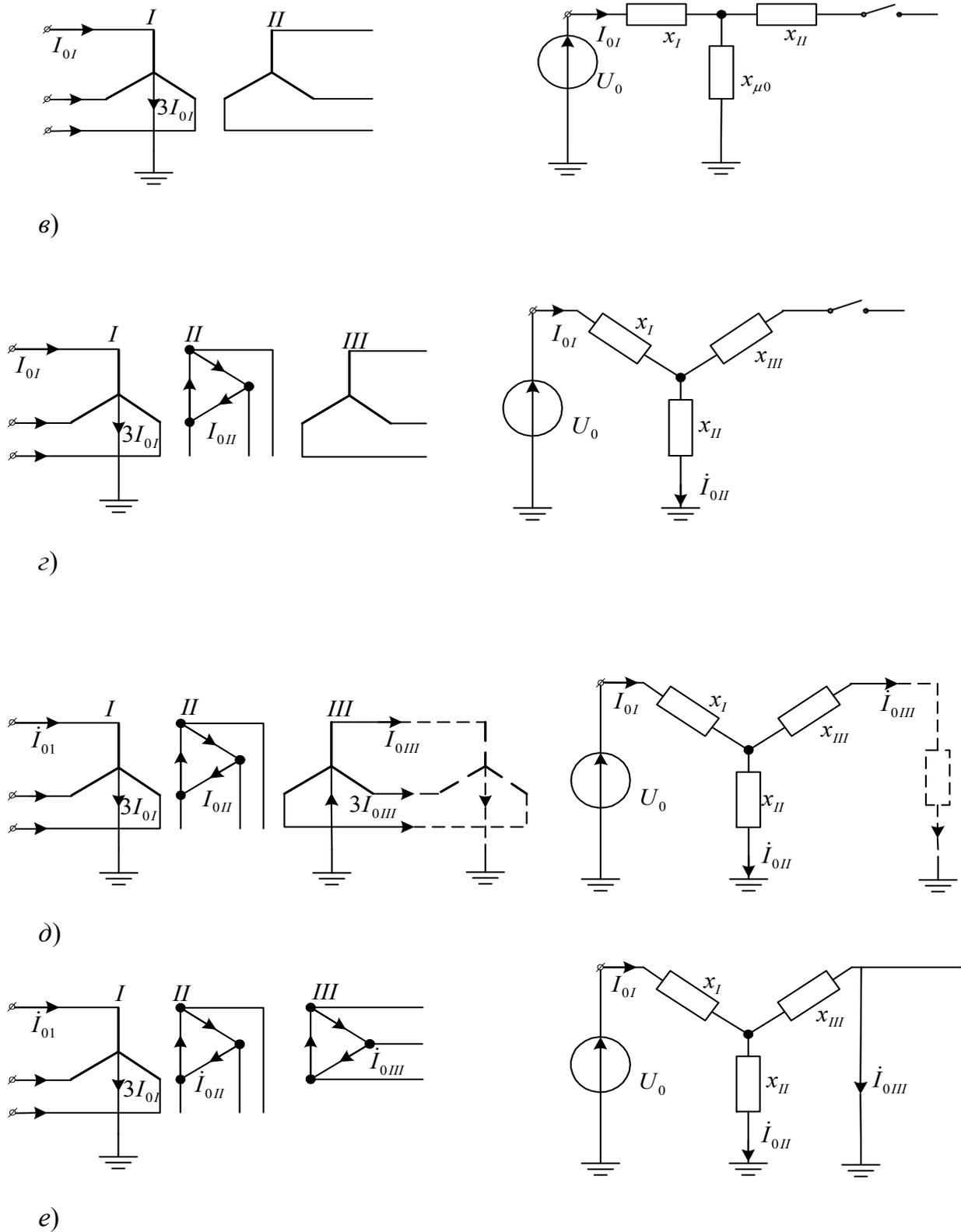


Рис. 5.2. (Окончание)

Оценку реактивности нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов можно провести по данным табл. 5.3.

Таблица 5.3

Тип трансформатора и соединение его обмоток	X_0
1. Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ	X_1
2. Трёхфазная группа из однофазных трансформаторов, трёхфазный четырех-или пятистержневой трансформатор: с соединением обмоток Y_0/Y с соединением обмоток Y_0/Y_0	∞ X_1
3. Трёхфазный трехстержневой трансформатор: с соединением обмоток Y_0/Y с соединением обмоток Y_0/Y_0	$X_1 + X_{\mu 0}$ По рис. 5.2

Таким образом, на основании измеренных значений токов, напряжений и мощностей можно рассчитать полное Z_0 , активное R_0 и реактивное X_0 сопротивления нулевой последовательности:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{k_{\text{ТТ}} 3I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

где $k_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока в измерительной части амперметра.

5.5. Порядок оформления отчёта

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

5.6. Контрольные вопросы

1. Для определения значений каких величин строится схема замещения нулевой последовательности?
2. Зачем рассчитывается сопротивление схемы нулевой последовательности?
3. Токи однофазного КЗ меньше или больше токов трёхфазного и двухфазного КЗ, для определения каких параметров энергосистемы они рассчитываются?

4. Какие нежелательные явления происходят в неповрежденных фазах при возникновении однофазных КЗ? Почему?

5. Как влияет схема соединения вторичной обмотки на величину сопротивления нулевой последовательности?

6. Каким группам соединения обмоток трансформатора соответствуют исследуемые в лабораторной работе схемы соединения вторичной обмотки трансформатора: Y_0/Δ , Y_0/Y , Y_0/Y_0 ? Какие группы соединения обмоток трансформатора применяются в российской энергосистеме? Почему?

7. Какая из схем соединения вторичной обмотки трансформатора более предпочтительнее в энергосистеме с точки зрения эксплуатации и четкого срабатывания защит?

8. Как влияет конструкция магнитопровода на величину полного сопротивления нулевой последовательности Z_0 ?

9. Почему в трансформаторах с соединением обмоток Y_0/Δ сопротивление намагничивания нулевой последовательности $x_{\mu 0}$ не учитывается?

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ульянов, С.А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 480 с.
2. *Крючков, М.П.* Переходные процессы в электрических системах. Практические методы расчета токов короткого замыкания / М.П. Крючков. – М. : Моск. энерг. ин-т, 1993. – 120 с.
3. *Зуев, Э.Н.* Математическое описание элементов электрической системы / Э.Н. Зуев, В.А. Строев. – М. : МЭИ, 1983. – 84 с.
4. *Колесник, Г.П.* Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие / Г.П. Колесник ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2004. – 128 с. – ISBN 978-5-89368-849-8.
5. Расчет токов при коротких замыканиях и устойчивости систем электроснабжения по практическим критериям: метод. указания к курсовой и расчетно-граф. работе / сост. Г.П. Колесник; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2005. – 86 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Исследование несимметричных коротких замыканий в электрических системах.....	5
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Анализ и исследование комплексных схем замещения при поперечной несимметрии в электрических системах.....	16
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Исследование комплексных схем замещения при продольной несимметрии в электрических системах	29
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Исследование переходных процессов в трехфазном силовом трансформаторе	39
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора	55
Рекомендательный библиографический список.....	64