



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный  
технический университет**

---

**Кафедра «Электрические станции»**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

*Лабораторный практикум*

**Часть 1**

**Минск  
БНТУ  
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Электрические станции»

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Лабораторный практикум  
для студентов специальностей  
1-43 01 01 «Электрические станции»,  
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,  
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

В 2 частях

Часть 1

## СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики  
и энергетического оборудования*

Минск  
БНТУ  
2017

УДК 621.311.018.782.3(076.5)

ББК 31.27я7

Э 45

Составители:

*Н. Н. Бобко, В. А. Булат, Е. В. Булойчик, А. Г. Губанович*

Рецензенты:

*В. Л. Радюк, В. М. Збродыга*

Э 45 **Электромагнитные** переходные процессы в электроэнергетических системах: лабораторный практикум для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»: в 2 ч. Ч. 1: Схемы замещения / сост.: Н. Н. Бобко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – 51 с.

ISBN 978-985-550-652-3 (Ч. 1).

Лабораторный практикум предназначен для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы». Каждая лабораторная работа содержит теоретические сведения, указания о порядке и методике выполнения работы, сведения о содержании отчета, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

УДК 621.311.018.782.3(076.5)

ББК 31.27я7

ISBN 978-985-550-652-3 (Ч. 1)

ISBN 978-985-550-653-0

© Белорусский национальный  
технический университет, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий лабораторный практикум по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» подготовлен в соответствии с рабочими программами дисциплин для электротехнических специальностей вузов применительно к лаборатории переходных процессов кафедры «Электрические станции» БНТУ. В него включены лабораторные работы по следующим разделам курса: «Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии трехфазной цепи», «Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной системы» и «Электромагнитные переходные процессы при особых условиях».

Большинство лабораторных работ, включенных в данный практикум, поставлены с использованием персональной ЭВМ. Отдельные работы поставлены на стендах, оборудованных соответствующим набором регулируемых элементов цепей и измерительных средств.

Выполнение каждой лабораторной работы предполагается фронтальным методом (вся подгруппа выполняет одну и ту же работу одновременно) непосредственно после изучения соответствующей темы или раздела курса на лекции. Наличие на стенде регулируемых элементов позволяет задавать каждой бригаде студентов свой индивидуальный вариант исходных данных к работе.

Программа лабораторных работ построена по принципу «расчет-эксперимент», т. е. данные предварительных теоретических расчетов трехфазных электрических цепей должны проверяться соответствующими измерениями на стендах и расчетами и исследованиями на ЭВМ. Такая методика выполнения работ развивает у студентов творческое мышление и способствует более глубокому усвоению материала.

Объем каждой лабораторной работы рассчитан в среднем на 4 часа, из которых 2 часа отводится на самостоятельную подготовку к работе и выполнение ее расчетной части и 2 часа – на выполнение экспериментальных исследований непосредственно в лаборатории.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Электрические станции» и рецензентам за ряд ценных замечаний, сделанных при подготовке настоящего практикума.

Авторы выражают благодарность за оказанную помощь в наборе и оформлении рукописи студентке группы 10601112 Баран А. Г.

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»**

1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности.

2. Каждая лабораторная работа имеет свой стенд, установленный на лабораторном столе. Для питания стендов используются напряжения  $\sim 220$  В и  $\sim 110$  В. Напряжения на стенды подаются от щитков, установленных на стенах лаборатории, с помощью разъемов. На каждом стенде имеется контактор, управляемый тумблером. Контактors обеспечивают оперативную подачу и съем напряжения со схемы стенда. Напряжения, используемые в лаборатории, являются опасными для жизни, поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо быть предельно собранными, внимательными и осторожными.

3. Перед сборкой электрической цепи необходимо убедиться, что ее элементы не находятся под напряжением. На столах и стендах не должно быть посторонних предметов (портфелей, книг, чертежей и т. п.).

4. При сборке электрической цепи рекомендуется избегать излишнего перекрещивания проводов и соединения нескольких проводов одним зажимом. В первую очередь следует собирать токовые цепи, затем цепи напряжения.

5. Перед включением источника питания на регулируемых элементах должны быть установлены заданные параметры, а регулятор ЛАТРа должен находиться в нулевом положении.

6. Включение цепи под напряжение производится только после проверки ее преподавателем или лаборантом.

7. Любые изменения в структуре цепи производятся только при отключенном источнике питания. Измененная цепь должна быть проверена преподавателем или лаборантом.

8. Запрещается выполнение лабораторных работ при отсутствии преподавателя или лаборанта.

9. При выполнении работы нельзя прикасаться к открытым токоведущим элементам цепи, а также к трубам и радиаторам отопительной системы.

10. При обнаружении неисправностей, которые могут вызвать поражение электрическим током или порчу оборудования, следует немедленно отключить источник питания и поставить в известность преподавателя или лаборанта.

11. При несчастном случае следует немедленно отключить источник питания и поставить в известность преподавателя.

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Выполнение лабораторной работы осуществляется в три этапа.

Первый этап – подготовка к работе – выполняется во время, предусмотренное для самостоятельной работы. На этом этапе студент обязан:

- изучить инструкцию к работе, уяснить цель и программу работы;
- изучить теоретический материал к работе по рекомендуемой литературе и конспекту лекций и быть готовым ответить на контрольные вопросы;
- выполнить расчетную часть задания: произвести расчет цепи и определить требуемые в задании величины;
- оформить расчетную часть отчета по работе: заполнить титульный лист, зарисовать требуемые схемы цепей и таблицы, внести расчетные данные в соответствующие графы таблиц, построить по результатам расчета требуемые заданием диаграммы.

Без оформленного отчета студент не допускается к выполнению экспериментальной части работы.

Второй этап работы – экспериментальная часть – выполняется непосредственно в лаборатории в течение первого часа занятий.

Получив разрешение (допуск) преподавателя, рабочая бригада (2–4 студента) собирает исследуемую электрическую схему и проводит необходимые измерения.

Результаты измерений обрабатываются и вносятся непосредственно в таблицы отчета для сравнения их с соответствующими данными расчета.

При выполнении экспериментальной части работы следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в лаборатории.

По окончании экспериментальных исследований рабочая бригада приступает к третьему этапу работы – анализу результатов, который

выполняется на втором часу занятий непосредственно в лаборатории. Студенты обязаны провести анализ результатов работы, сопоставить результаты измерений с расчетными данными, в письменной форме сделать выводы по работе.

Полностью оформленный отчет в конце занятия представляется преподавателю для утверждения. При защите отчета студенту могут быть заданы контрольные вопросы.

Без защиты отчета по выполненной работе студент не допускается к выполнению очередной лабораторной работы.

Отчет по лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель работы; схемы исследуемых цепей; таблицу исходных данных к работе с указанием в ней номера варианта задания; таблицы результатов расчетов и измерений, предусмотренные заданием диаграммы; выводы по работе. Содержание отчета приводится в инструкции к работе.

Отчет пишется от руки разборчивым почерком на бумаге формата А4 или в тетради.

В отчете должны применяться электротехнические термины, установленные ГОСТом 26522–85 «Короткие замыкания в электроустановках. Основные понятия. Термины и определения», а также общепринятые в научно-технической литературе.

При оформлении отчета подлежат обязательному применению единицы Международной системы СИ, а также десятичные кратные и дольные от них (ГОСТ 6.417–81).

Точность обработки результатов измерений должна согласовываться с точностью самих измерений. Рекомендуется придерживаться следующего правила: ошибка вычислений должна быть на порядок меньше погрешности измерения. Результаты расчета должны содержать не менее трех значащих десятичных цифр мантиссы числа.

Графический материал отчета (таблицы, схемы, диаграммы) выполняется карандашом или пастой в виде эскизов либо распечатывается на принтере.

Элементы на схемах изображают условными графическими обозначениями, установленными в стандартах ЕСКД. Каждый элемент схемы должен иметь графическое и буквенно-цифровое позиционное обозначение по ГОСТу 2.710–86.

## Лабораторная работа № 1

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

### Цель работы

Определение токов короткого замыкания (КЗ) и остаточных напряжений для установившегося режима трехфазного КЗ в различных точках схемы.

### Краткие теоретические сведения

Большинство повреждений в электрических системах приводит к КЗ фаз между собой и на землю.

Коротким замыканием называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в сетях с глухо- и эффективно заземленными нейтральными также замыкание одной или двух фаз на землю.

КЗ возникают при нарушении изоляции электрических цепей. Причины таких нарушений различны: старение и вследствие этого пробой изоляции, набросы на провода линий электропередачи, обрывы проводов с падением на землю, механические повреждения изоляции кабельных линий при земляных работах, удары молнии в линии электропередачи, ошибки персонала при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой, включение их на ошибочно оставленное заземление и т. д.).

В трехфазных электроустановках возникают трехфазные и двухфазные КЗ. Кроме того, в трехфазных сетях с глухо- и эффективно заземленными нейтральными дополнительно могут возникать также однофазные и двухфазные КЗ на землю (замыкание двух фаз между собой с одновременным соединением их с землей). При трехфазном КЗ все фазы электрической сети оказываются в одинаковых условиях, поэтому его называют симметричным.

КЗ являются наиболее опасным и тяжелым видом повреждения. При КЗ электродвижущая сила (ЭДС) источника питания (генератора) замыкается «накоротко» через относительно малое сопротив-

ление генераторов, трансформаторов и линий. Поэтому в контуре замкнутой «накоротко» ЭДС возникает большой ток  $I_K$ , называемый *током короткого замыкания*.

При КЗ, вследствие увеличения тока, возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети. Наибольшее снижение напряжения происходит в месте КЗ и в непосредственной близости от него. В точках сети, удаленных от места повреждения, напряжение снижается в меньшей степени.

Происходящие в результате КЗ увеличение тока и снижение напряжения приводят к ряду опасных последствий:

1. Ток КЗ  $I_K$  выделяет в активном сопротивлении  $R$  цепи, по которой он протекает в течение времени  $t$ , тепло  $Q = kI_K^2 Rt$ . Это тепло и пламя электрической дуги в месте повреждения производят большие разрушения, размеры которых тем больше, чем больше ток  $I_K$  и время  $t$ . Проходя по неповрежденному оборудованию и линиям электропередачи, ток КЗ  $I_K$  нагревает их выше допустимого предела, что может вызвать повреждения изоляции и токоведущих частей.

2. Понижение напряжения при КЗ нарушает работу потребителей.

Основными потребителями электроэнергии являются асинхронные электродвигатели. Момент вращения двигателей  $M_d$  пропорционален квадрату напряжения  $U$  на зажимах  $M_d = kU^2$ . Поэтому при глубоком снижении напряжения момент вращения электродвигателя может оказаться меньше момента сопротивления механизмов, что приводит к их остановке.

Нормальная работа осветительных установок, составляющих вторую значительную часть потребителей электроэнергии, при снижении напряжения также нарушается.

3. Наиболее тяжелым последствием снижения напряжения является нарушение устойчивости параллельной работы генераторов. Это может привести к системной аварии, т. е. прекращению питания всех ее потребителей.

Для уменьшения последствий КЗ необходимо как можно быстрее отключить поврежденный участок, что достигается с помощью быстродействующих выключателей и релейной защиты с мини-

мальной выдержкой времени. Немаловажную роль играет автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генераторов, позволяющее поддерживать напряжение в аварийном режиме на необходимом уровне. К мерам, уменьшающим опасность развития аварий, относится также правильный выбор аппаратов по условиям КЗ, применение токоограничивающих устройств и т. п.

Для осуществления указанных мероприятий необходимо уметь определить ток и остаточное напряжение на шинах при КЗ в различных точках схемы.

Ток КЗ определяется по закону Ома:

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}},$$

где  $E_{\Sigma}$  и  $x_{\Sigma}$  – соответственно результирующая ЭДС и сопротивление схемы относительно точки КЗ.

Величину остаточного напряжения в какой-либо точке схемы можно определить как падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению участка цепи ( $x_{\text{вн}}$ ) от точки КЗ до рассматриваемой точки:

$$U_{\text{ост}} = I_{\text{к}}^{(3)} x_{\text{вн}}.$$

В установившемся режиме КЗ нагрузка шунтирует поврежденную ветвь (рис. 1.1) и тем самым уменьшает внешнее сопротивление цепи статора генератора. Это приводит к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и соответственно уменьшению тока в месте КЗ. С увеличением удаленности КЗ влияние нагрузки сказывается сильнее. В то же время нагрузка, присоединенная непосредственно к точке КЗ, в установившемся режиме не играет никакой роли.

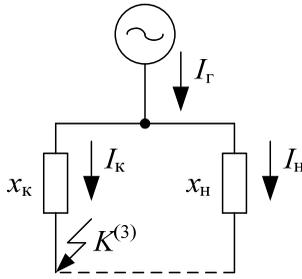


Рис. 1.1. Схема к оценке влияния нагрузки при трехфазном КЗ

Точный учет нагрузки сложен, поэтому для упрощения практических расчетов ее учитывают в виде относительного сопротивления, равного  $x_{*H} = 1,2$ , которое относится к полной мощности нагрузки. ЭДС нагрузки в установившемся режиме трехфазного КЗ принимается равной нулю,  $E_{*H} = 0$ .

### Методические указания к выполнению работы

Лабораторная работа выполняется с использованием программы Electronic Workbench.

В соответствии с заданным преподавателем вариантом исходных данных (табл. 1.1) составить схему замещения электрической сети (рис. 1.2) и рассчитать ее параметры. Расчет вести в относительных единицах.

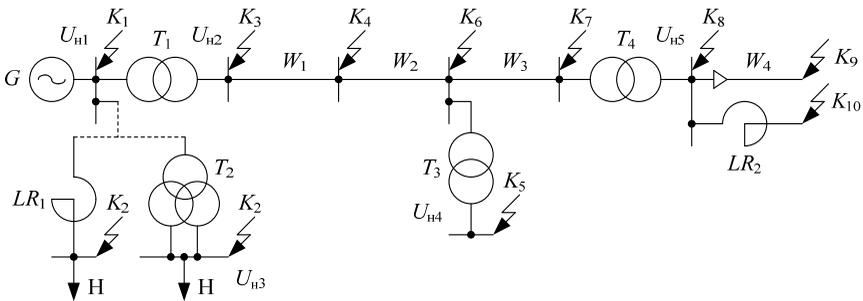


Рис. 1.2. Схема исследуемой электрической сети:  
 для вариантов 1–4 нагрузка Н подключена через реактор  $LR_1$ ,  
 для вариантов 5–8 нагрузка подключена через двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низкого напряжения  $T_2$

Таблица 1.1

## Варианты исходных данных

Вариант №		1	2	3	4	5	6	7	8
G	$S_{H_2}$ , MBA	40	78,75	125	137,5	188	258,3	235,3	353
	$E_{*∞}$	2,58	2,0	2,1	2,35	2,18	2,15	2,22	2,45
	$x_{*∞}$	2,65	1,92	1,91	2,04	1,71	1,68	1,84	2,11
T <sub>1</sub>	$S_{H_2}$ , MBA	40	80	125	200	200	250	250	400
	$U_{K_2}$ , %	10,5	11	10,5	11	11	10,5	10,5	11,5
T <sub>2</sub>	$S_{H_2}$ , MBA	–	–	–	–	25	40	32	64
	$U_{KBH-HH_2}$ , %	–	–	–	–	10,5	12,7	12,7	12,7
	$U_{KH1-HH_2}$ , %	–	–	–	–	15	20	20	20
T <sub>3</sub>	$S_{H_2}$ , MBA	25	63	40	80	125	100	32	160
	$U_{K_2}$ , %	10	10,5	10	10,5	10,5	10,5	10	11
T <sub>4</sub>	$S_{H_2}$ , MBA	16	32	25	40	10	25	63	80
	$U_{K_2}$ , %	10	10,5	10	10,5	8	10	11	10
LR <sub>1</sub>	$U_{H_2}$ , кВ	10	10	10	10	–	–	–	–
	$I_{H_2}$ , А	630	1000	630	1600	–	–	–	–
	$x_{D_2}$ , %	4,4	5,6	3,5	4,4	–	–	–	–
LR <sub>2</sub>	$U_{H_2}$ , кВ	10	10	10	10	10	10	10	10
	$I_{H_2}$ , А	400	1600	630	1000	2000	3200	2500	2150
	$x_{D_2}$ , %	5,5	3,8	5	6,5	4	6	6	5
H	$S_{H_2}$ , MBA	10	25	12	16	21	36	28	55
	$W_1$ , км	50	106	55	192	130	52	65	185
	$W_2$ , км	50	93	61	160	99	63	41	165
	$W_3$ , км	50	100	47	138	121	49	57	200
	$W_4$ , км	3	5	3,8	4	4,7	3,3	4,5	3,5
	$U_{H1}$ , кВ	6,3	6,3	10,5	10,5	18	15,75	15,75	20
	$U_{H2}$ , кВ	110	220	110	330	220	110	110	330
	$U_{H3}$ , кВ	10	10	6	10	6	6	10	6
	$U_{H4}$ , кВ	11	10	6	35	35	10	10	35
	$U_{H5}$ , кВ	6	10	11	10	10	11	6	10

Собрать схему замещения с рассчитанными параметрами в программе Electronic Workbench для заданной точки КЗ.

С помощью программных вольтметра и амперметра определить токи в различных ветвях схемы и остаточные напряжения на шинах. Результаты занести в табл. 1.2. В свойствах прибора на вкладке

«Value» в графе «Mode» необходимо выбрать «АС». Так как параметры схемы замещения рассчитываются в относительных единицах, то показания приборов также снимаются в о. е., однако следует учитывать приставки  $m - 10^{-3}$ ,  $\mu - 10^{-6}$ .

Таблица 1.2

Результаты выполнения работы

Значения токов и напряжений		Номера точек КЗ									
		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$
$I$	опытное, о. е.										
	действительное, кА										
	расчетное, кА										
$U$	опытное, о. е.										
	действительное, кВ										
	расчетное, кВ										

Определить действительные значения токов и напряжений. Результаты занести в табл. 1.2.

Произвести исследование качественного влияния нагрузки на величину тока в цепи генератора и в аварийной ветви при КЗ в заданной точке. С этой целью замеры в этих цепях произвести как при включенной нагрузке, так и при отключенной.

Определить расчетным путем значения токов в тех же ветвях и остаточные напряжения на шинах при КЗ в той же точке.

Результаты расчета занести в табл. 1.2. Построить эпюры распределения напряжения.

Сравнить результаты измерений с данными расчета и сделать заключение о степени их соответствия и о причинах возможного расхождения результатов.

**Пример**

Вариант № 1, точка  $K_3$  с учетом нагрузки.

Принимаем  $S_6 = 100$  МВА,  $U_{61} = 6,3$  кВ,  $U_{62} = 115$  кВ.

Тогда

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{61}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА},$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{62}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

Параметры схемы замещения (рис. 1.3):

$$E_1 = E_{*\infty} = 2,58,$$

$$E_2 = E_{*H} = 0,0,$$

$$x_1 = \frac{x_{*\infty} S_6}{S_H} = \frac{2,65 \cdot 100}{40} = 6,625,$$

$$x_2 = \frac{x_{*p\%} I_6 U_H}{100 I_H U_{cp.H}} = \frac{4,4 \cdot 9,16 \cdot 10}{100 \cdot 0,63 \cdot 6,3} = 1,015,$$

$$x_3 = \frac{x_{*H} S_6}{S_H} = \frac{1,2 \cdot 100}{10} = 12,0,$$

$$x_4 = \frac{U_K S_6}{100 S_H} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,263.$$

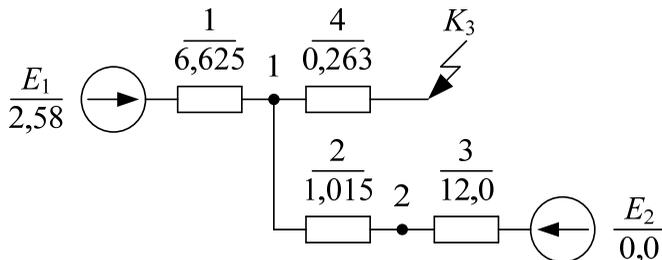


Рис. 1.3. Схема замещения

Аналитический расчет (рис. 1.4).

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1(x_2 + x_3) + E_2x_1}{x_2 + x_3 + x_1} = \frac{2,58 \cdot (1,015 + 12) + 0 \cdot 6,625}{1,015 + 12 + 6,625} = 1,71.$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = x_5 = \frac{x_1(x_2 + x_3)}{x_2 + x_3 + x_1} = \frac{6,625 \cdot (1,015 + 12)}{1,015 + 12 + 6,625} = 4,39.$$

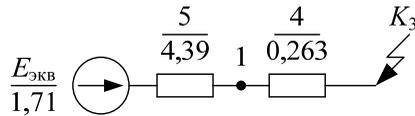


Рис. 1.4. Схема замещения после преобразований

Ток в точке короткого замыкания:

$$I_{*K_3} = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{x_5 + x_4} = \frac{1,71}{4,39 + 0,263} = 0,3675,$$

$$I_{K_3} = I_{*K_3} I_{\text{б}2} = 0,3675 \cdot 0,5 = 0,184 \text{ кА}.$$

Остаточное напряжение на шинах генератора:

$$U_{*\text{ост}1} = I_{*K_3} x_4 = 0,3675 \cdot 0,263 = 0,09665,$$

$$U_{\text{ост}1} = U_{*\text{ост}1} \frac{U_{\text{б}1}}{\sqrt{3}} = 0,09665 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 0,352 \text{ кВ}.$$

Ток в ветви генератора:

$$I_{*K_1} = \frac{E_1 - U_{*\text{ост}1}}{x_1} = \frac{2,58 - 0,09665}{6,625} = 0,3748,$$

$$I_{K_1} = I_{*K_1} I_{\text{б}1} = 0,3748 \cdot 9,16 = 3,433 \text{ кА}.$$

Ток в ветви нагрузки:

$$I_{*K_2} = I_{*K_1} - I_{*K_3} = 0,3748 - 0,3675 = 0,0073,$$

$$I_{K_2} = I_{*K_2} I_{61} = 0,0073 \cdot 9,16 = 0,067 \text{ кА.}$$

Результаты измерений в Electronic Workbench (рис. 1.5):

$$I_{*K_1} = 0,3748,$$

$$I_{K_1} = I_{*K_1} I_{61} = 0,3748 \cdot 9,16 = 3,433 \text{ кА,}$$

$$I_{*K_2} = 0,00745,$$

$$I_{K_2} = I_{*K_2} I_{61} = 0,00745 \cdot 9,16 = 0,0683 \text{ кА,}$$

$$I_{*K_3} = 0,3673,$$

$$I_{K_3} = I_{*K_3} I_{62} = 0,3673 \cdot 0,5 = 0,184 \text{ кА,}$$

$$U_{*ост1} = 0,09697,$$

$$U_{ост1} = U_{*ост1} \frac{U_{61}}{\sqrt{3}} = 0,09697 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 0,353 \text{ кВ.}$$

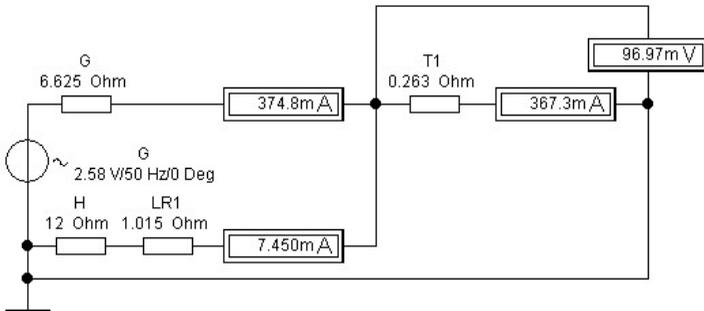


Рис. 1.5. Схема замещения в программе Electronic Workbench

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема исследуемой электрической сети.
3. Исходные данные для заданного варианта.
4. Результаты измерений и аналитического расчета токов и напряжений (табл. 1.2).
5. Аналитический расчет токов и остаточных напряжений установившегося режима трехфазного КЗ в заданной точке.
6. Эпюры распределения напряжения, построенные по результатам расчетов и замеров.
7. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Дать определение КЗ. Что понимают под металлическим КЗ?
2. Причины возникновения КЗ.
3. Каковы последствия КЗ?
4. Каково влияние нагрузки на величины токов в отдельных ветвях при установившемся режиме КЗ?
5. Как проявляется действие АРВ в установившемся режиме КЗ и какие режимы возможны у генератора с АРВ?
6. На чем основано составление приближенной схемы замещения?
7. Почему на результат расчета тока КЗ в относительных единицах не влияет выбор базисных условий?
8. Как наиболее просто определить величину установившегося тока в генераторе при КЗ на его выводах?
9. Какие методы преобразования схем замещения используются при расчете КЗ?

Литература: [1], с. 91–112; [2], с. 5–17.

## Лабораторная работа № 2

### ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТЕЙШЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

#### Цель работы

Изучение переходного процесса (величины тока и его изменения во времени) при КЗ в трехфазной цепи в зависимости от параметров цепи и тока предыдущего режима на персональной ЭВМ (ПЭВМ).

#### Краткие теоретические сведения

Простейшей трехфазной цепью называют симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активным и индуктивным сопротивлениями при отсутствии в ней трансформаторных связей. На рис. 2.1 приведена простейшая симметричная трехфазная цепь. В ней условно принято, что на одном ее участке имеется взаимная индукция между фазами  $M$ , а на другом она отсутствует. Цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения с неизменными амплитудой и частотой.

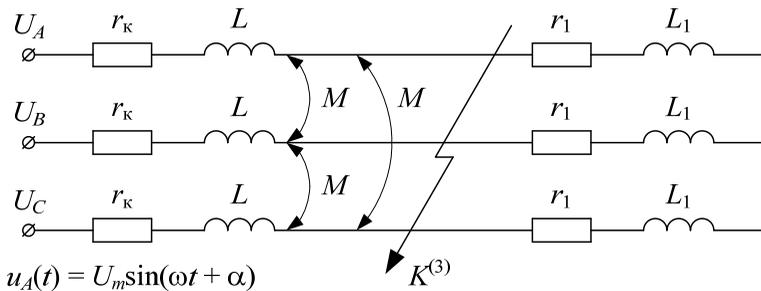


Рис. 2.1. Простейшая трехфазная электрическая цепь

До КЗ в цепи протекал ток нагрузки

$$i_H = I_{mH} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_H),$$

где  $I_{mH} = \frac{U_m}{z_H}$  – амплитудное значение периодической составляющей

тока нагрузки;

$U_m$  – амплитудное значение напряжения;

$z_H = \sqrt{r_H^2 + x_H^2}$  – полное сопротивление цепи;

$r_H = r_1 + r_k$  – активное сопротивление цепи;

$x_H = \omega(L_1 + L)$  – индуктивное сопротивление цепи;

$\alpha$  – фаза включения (начальная фаза) напряжения источника в момент  $t = 0$ ;

$\varphi_H = \arctg \frac{x_H}{r_H}$  – сдвиг фаз между напряжением и током той же

фазы.

Короткое замыкание делит цепь на две части: правую – с сопротивлениями  $r_1$  и  $x_1 = \omega L_1$  в каждой фазе, и левую – содержащую источник питания и сопротивления цепи КЗ  $r_k$  и  $x_k = \omega L_k$ .

Переходные процессы в обеих частях схемы при трехфазном КЗ протекают независимо.

Правая часть рассматриваемой цепи оказывается зашунтированной КЗ, и ток в ней будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасенная в индуктивности  $L_1$  энергия магнитного поля не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением  $r_1$ .

Дифференциальное уравнение равновесия в каждой фазе этой части имеет вид:

$$0 = i_j r_1 + L_1 \frac{di_j}{dt},$$

где  $j = A, B, C$ .

Его решение общеизвестно:

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{T_{a1}}}.$$

Оно показывает, что здесь имеется лишь свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T_{a1} = \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{\omega r_1}, \text{ с.}$$

Начальное значение свободного тока в каждой фазе зашунтированной части цепи равно предшествующему мгновенному значению тока, поскольку в цепи с индуктивностью не может произойти внезапного (скачком) изменения тока. В общем случае свободные токи в фазах различны (вследствие углового сдвига между токами фаз).

Из сказанного следует, что величина тока в правой части не превысит величины тока нормального режима.

Рассмотрим левую часть цепи, которая осталась присоединенной к источнику питания.

Дифференциальное уравнение равновесия для любой фазы, например, фазы  $A$ , описывающее переходный процесс этой цепи:

$$U_A = i_A r_k + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}.$$

Имея в виду, что  $i_B + i_C = -i_A$ , его можно представить (опуская индекс фазы) как

$$U = i r_k + L_k \frac{di}{dt},$$

где  $i$ ,  $U$  – соответственно мгновенные значения тока и напряжения рассматриваемой фазы;

$L_k = L - M$  – результирующая индуктивность фазы.

Решение этого уравнения дает выражение для мгновенного значения тока в любой момент времени  $t$  от начала КЗ:

$$i_{k,t} = I_{мп} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (2.1)$$

где  $I_{m\Pi} = \frac{U_m}{z_k}$  – амплитудное значение периодической составляющей тока;

$z_k$  – полное сопротивление присоединенного к источнику участка короткозамкнутой цепи;

$\varphi_k$  – угол сдвига между током и напряжением короткозамкнутой цепи;

$T_a$  – постоянная времени цепи КЗ.

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}, \text{ с.}$$

Как видно из (2.1), полный ток КЗ складывается из двух составляющих: вынужденной, обусловленной действием напряжения источника питания (первый член в правой части уравнения), и свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности  $L_k$  (второй член уравнения).

Вынужденная составляющая тока КЗ имеет периодический характер с частотой, равной частоте напряжения источника. Называют эту составляющую обычно периодическим током КЗ.

Свободная составляющая тока имеет аperiodический характер изменения, на основании чего эту составляющую называют также аperiodической составляющей тока КЗ.

Начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в каждой фазе определяется по выражению (2.1) для момента времени  $t=0$  ( $i_{a,0} = i_{k,0} - i_{п,0}$ ). Здесь  $i_{k,0}$  – начальное значение тока КЗ, которое, с учетом невозможности изменения тока скачком в цепи с индуктивностью, равно  $i_{н(0)}$  – току предшествующего режима в данной фазе к моменту  $t=0$ . Значение периодической составляющей тока при  $t=0$  определяется как

$$i_{п,0} = I_{m\Pi} \sin(\alpha - \varphi_k).$$

Таким образом, выражение для исследования переходного процесса в рассматриваемой фазе простейшей цепи можно записать в следующем виде:

$$i = I_{мп} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + [I_{мн} \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{мп} \sin(\alpha - \varphi_K)] e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (2.2)$$

Из (2.2) следует, что величина тока во время переходного процесса определяется не только временем  $t$ , фазой включения  $\alpha$ , углом  $\varphi_K$  и постоянной времени  $T_a$ , но также предшествующим режимом цепи.

Представляют определенный интерес условия возникновения максимально возможного значения полного тока КЗ и его аperiodической составляющей. При  $x_K \gg r_K$  и  $\varphi_K = 90^\circ$  следует, что максимальное значение тока  $i_{a,0}$  будет в случае, если напряжение в момент возникновения КЗ проходит через нулевое значение ( $\alpha = 0$ ) и тока в цепи до КЗ нет, т. е.  $i_H(0) = 0$ . При этом  $i_{a,0} = -I_{мп}$ .

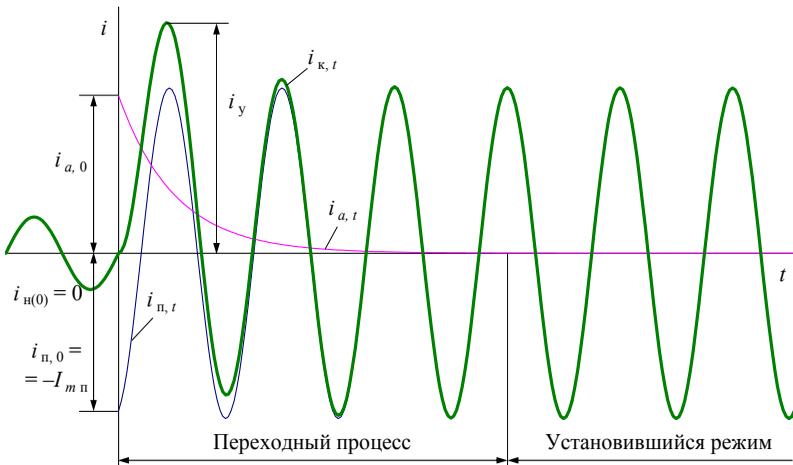


Рис. 2.2. Осциллограмма тока КЗ при наибольшей аperiodической слагающей

Кривая изменения тока при условии максимального значения аperiodической составляющей тока КЗ показана на рис. 2.2.

Максимальное мгновенное значение полного тока наступает обычно через 0,01 с после начала процесса КЗ (рис. 2.2). Оно носит название **ударного тока** и обозначается  $i_y$ . Ударный ток определяется из выражения (2.2) для  $i_{H(0)} = 0$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\varphi_K = 90^\circ$  и  $t = 0,01$  с.

$$i_y = I_{m\pi} + I_{m\pi} e^{-\frac{0,01}{T_a}} = I_{m\pi} k_y,$$

где

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$$

ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей; его величина находится в пределах  $1 < k_y < 2$ , что соответствует предельным значениям  $T_a$ , т. е.  $T_a = 0$  (при  $L_K = 0$ ) и  $T_a = \infty$  (при  $r_K = 0$ ).

Действующее значение тока для произвольного момента времени КЗ равно:

– периодической составляющей

$$I_{п,t} = \frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}};$$

– аperiodической составляющей

$$I_{a,t} = i_{a,t};$$

– полного тока КЗ

$$I_{к,t} = \sqrt{I_{п,t}^2 + I_{a,t}^2}.$$

Наиболее просто можно исследовать протекание переходного процесса в простейшей трехфазной цепи по выражению (2.2) на ПЭВМ. В этом случае имеется возможность проследить характер изменения и величину тока при различных начальных условиях  $I_{m\pi}$  и  $\varphi_H$ , различных значениях  $\varphi_K$ ,  $\alpha$ ,  $T_a$  и др.

## Техника безопасности

Все операции по включению и отключению ПЭВМ осуществлять под контролем преподавателя. При выполнении работы следует соблюдать «Инструкцию по технике безопасности при работе на персональных ЭВМ».

### Порядок выполнения работы

1. Изучить переходный процесс при внезапном КЗ в простейшей трехфазной цепи.
2. В соответствии с заданным преподавателем вариантом (табл. 2.1) в среде MathCAD с использованием программного модуля TKZ.xmcd, расположенного на рабочем столе компьютера в одноименной папке TKZ, произвести корректировку исходных данных, построить и проанализировать графики переходного процесса  $i_{к,t}$ ,  $i_{а,t}$  и  $i_{п,t}$ .

Таблица 2.1

#### Исходные данные

Номер варианта	$U_m$ , кВ	$\alpha$ , град	$z_H$ , Ом	$\varphi_H$ , град	$r_K$ , Ом	$L_K$ , Гн
1	110	0	100	0	1,0	0,08
2	110	45	200	-30	1,15	0,07
3	220	60	300	90	1,0	0,1
4	110	30	150	30	1,2	0,1
5	220	0	200	-90	1,0	0,09
6	220	15	250	0	1,2	0,08

3. По заданию преподавателя провести исследование зависимостей токов при различных значениях  $\varphi_K$ ,  $\alpha$ ,  $T_a$ .
4. Результаты исследования (один вариант зависимостей) вывести на печать.
5. Из графиков определить величины  $\varphi_K$  и  $T_a$  и занести их в табл. 2.2.
6. Определить расчетным путем величины  $\varphi_K$ ,  $I_{H(0)}$ ,  $T_a$ ,  $i_y$ ,  $I_{мп}$ . Результаты занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

## Результаты исследования

Величина	$\varphi_K$ , град	$T_d$ , с	$I_H(0)$ , кА	$I_{мп}$ , кА	$i_y$ , кА
Расчетные					
Опытные			–	–	–

## Содержание отчета

1. Цель работы, дифференциальные уравнения равновесия напряжений для фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ .
2. Распечатка программы исследования переходного процесса по заданному варианту вместе с графиком (одна на бригаду).
3. Расчетные и определенные из графика величины (табл. 2.2).
4. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Почему в момент возникновения КЗ в простейшей цепи мгновенное значение тока в каждой фазе остается неизменным, т. е. равным мгновенному значению тока предшествующего режима?
2. Во всех ли фазах трехфазной цепи начальные значения свободных составляющих токов при КЗ будут одинаковыми?
3. Как определяется начальное значение свободной составляющей тока?
4. В каких условиях полный ток КЗ в простейшей цепи будет иметь максимальное значение?
5. Что такое ударный ток?
6. От чего зависит величина ударного коэффициента и в каких пределах она находится?
7. Как влияет на характер протекания переходного процесса постоянная времени цепи и каков ее физический смысл?
8. Как из графика можно определить постоянную времени?
9. Действующие значения полного тока КЗ и его отдельных составляющих.

Литература: [1], с. 58–69.

## Лабораторная работа № 3

# ЗАМЫКАНИЕ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗОНАНСНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

### Цель работы

Исследование токов и напряжений в сетях с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью в нормальном режиме и режиме однофазного замыкания на землю.

### Краткие теоретические сведения

Нейтралями электроустановок называют общие точки обмотки генераторов или трансформаторов, соединенные в звезду. В зависимости от режима работы нейтрали электрические сети разделяют на четыре группы:

- 1) сети с эффективно заземленными нейтралями;
- 2) сети с глухозаземленными нейтралями;
- 3) сети с изолированными нейтралями;
- 4) сети с резонансно-заземленными нейтралями.

В Республике Беларусь к первой группе относятся сети напряжением 110 кВ и выше. Ко второй группе – сети напряжением 220, 380 и 660 В. В сетях этих групп однофазное замыкание на землю вызывает появление больших аварийных токов и поэтому требует немедленного отключения поврежденной цепи.

К третьей и четвертой группам относятся сети от 3 до 35 кВ, нейтрали генераторов и трансформаторов которых изолированы от земли или заземлены через дугогасящий реактор. В этих сетях сравнительно малые токи замыкания на землю не опасны для оборудования и релейная защита действует на сигнал, привлекая внимание обслуживающего персонала.

В связи с этим, в системах с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием.

Рассмотрим замыкание на землю фазы  $A$  в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока (рис. 3.1). Распределенные вдоль линии емкости фаз относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями в конце линии. Частичные емкости между фазами для простоты не показаны, так как их влияние на ток замыкания на землю очень мало. Для упрощения принимаем, что нагрузка сети отключена.

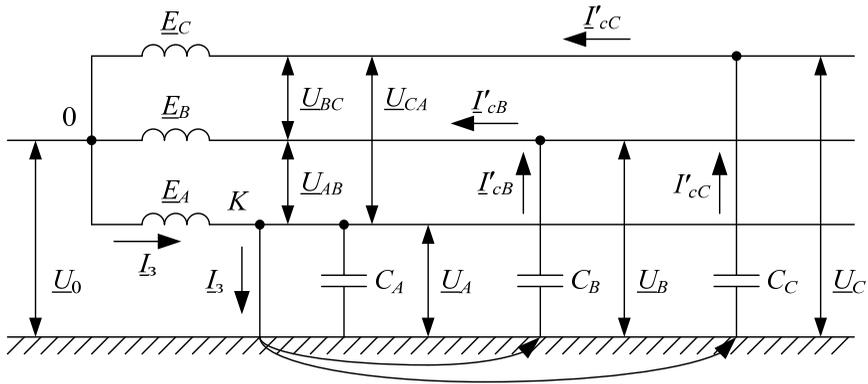


Рис. 3.1. Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью

В нормальном режиме напряжения фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  относительно земли равны соответствующим фазным напряжениям  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$ , которые в свою очередь равны ЭДС источника питания  $\underline{E}_A$ ,  $\underline{E}_B$ ,  $\underline{E}_C$ , поскольку нагрузка отключена. Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду (рис. 3.2,  $a$ ), а их сумма равна нулю, в результате чего напряжение в нейтрали  $0$  отсутствует, т. е.  $U_0 = 0$ .

Под действием фазных напряжений через емкости фаз относительно земли  $C_A$ ,  $C_B$  и  $C_C$  проходят токи, опережающие напряжения на  $90^\circ$ :

$$\underline{I}_{cA} = \frac{\underline{U}_A}{-jx_{cA}}; \quad \underline{I}_{cB} = \frac{\underline{U}_B}{-jx_{cB}}; \quad \underline{I}_{cC} = \frac{\underline{U}_C}{-jx_{cC}},$$

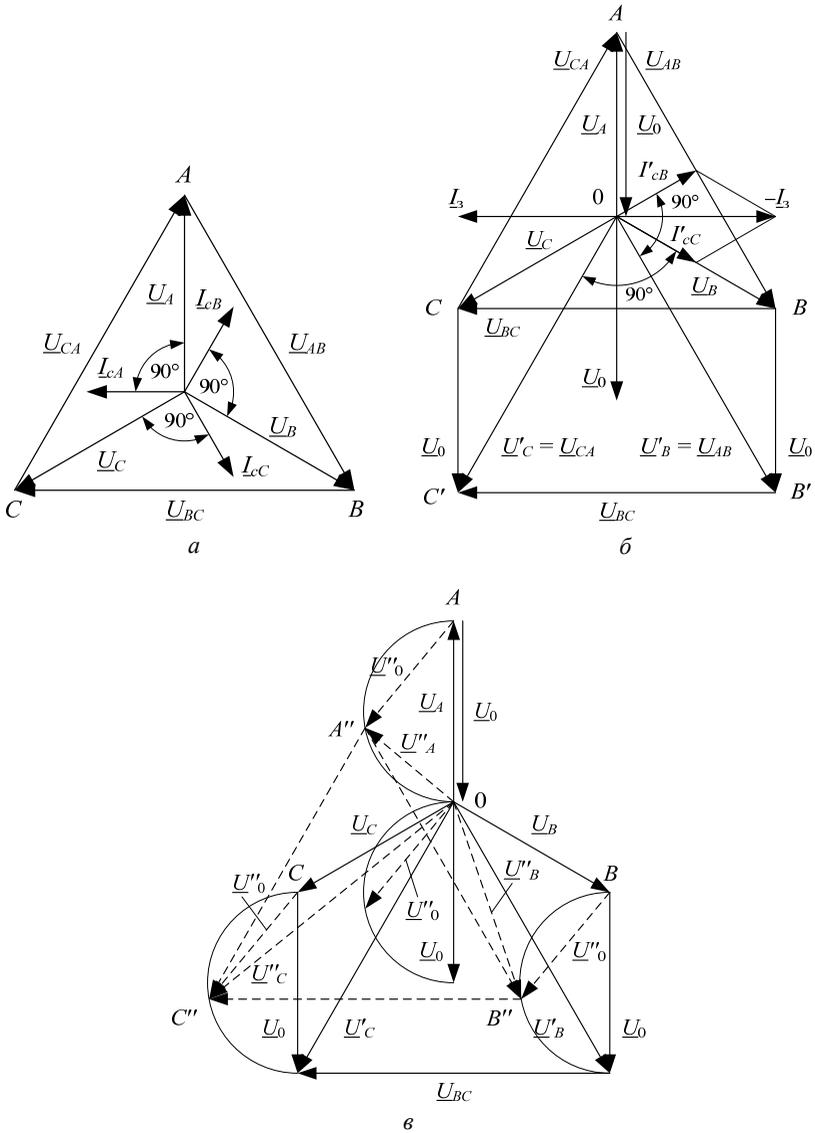


Рис. 3.2. Векторные диаграммы токов и напряжений при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью:  
*a* – в нормальном режиме; *б* – при металлическом замыкании на землю ( $r_d = 0$ );  
*в* – при замыкании на землю фазы *A* и  $r_d \neq 0$

где  $x_{cA}$ ,  $x_{cB}$ ,  $x_{cC}$  – соответствующие емкостные реактивные сопротивления фаз относительно земли:

$$x_{cA} = \frac{1}{\omega C_A}, \quad x_{cB} = \frac{1}{\omega C_B}, \quad x_{cC} = \frac{1}{\omega C_C}.$$

Сумма емкостных токов, проходящих по фазам в нормальном режиме, равна нулю, и поэтому  $I_0$  отсутствует (рис. 3.2, а).

При металлическом замыкании фазы  $A$  на землю (переходное сопротивление в месте замыкания  $r_d = 0$ ) ее напряжение снижается до нуля ( $U_A = 0$ ), так как в результате соединения с землей точка  $K$  приобретает потенциал земли.

Напряжение нейтрали  $\underline{U}_0$  по отношению к земле становится равным напряжению между точками  $K$  и  $O$  (рис. 3.1), т. е. напряжению, равному по величине и обратному по знаку фазному напряжению поврежденной фазы:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{k0} = -\underline{U}_{kA}.$$

Напряжения неповрежденных фаз  $B$  и  $C$  ( $U'_B$  и  $U'_C$ ) относительно земли повышается до междуфазного, т. е. в  $\sqrt{3}$  раз. Действительно, на рис. 3.1 видно, что напряжение фазы  $B$  относительно земли равно напряжению между проводом  $B$  и точкой  $K$ , следовательно,  $\underline{U}'_B = \underline{U}_{BA}$ . В этом случае к вектору напряжения фазы  $B$  необходимо добавить вектор напряжения нейтрали  $\underline{U}_0 = -\underline{U}_{KA}$  (рис. 3.2, б):

$$\underline{U}'_B = \underline{U}_B + \underline{U}_0 = \underline{U}_B - \underline{U}_{KA} = \underline{U}_{AB}.$$

Аналогично, напряжение фазы  $C$  по отношению к земле  $\underline{U}'_C = \underline{U}_{CA}$ .

На основе полученных выражений на рис. 3.2, б приведена векторная диаграмма напряжений.

Путь циркуляции тока замыкания на землю указан стрелками на рис. 3.1. Емкостной ток поврежденной фазы  $A$  будет равен нулю,

$\underline{I}_{cA} = 0$ , поскольку  $\underline{U}_A = 0$ . В двух других фазах под действием напряжения  $\underline{U}'_B$  и  $\underline{U}'_C$  появляются токи, опережающие на  $90^\circ$  повышенные напряжения на неповрежденных фазах:

$$\underline{I}'_{cB} = \frac{\underline{U}'_B}{-jx_{cB}}, \quad \underline{I}'_{cC} = \frac{\underline{U}'_C}{-jx_{cC}}.$$

Ток  $\underline{I}_3$  в месте повреждения равен геометрической сумме токов в фазах  $B$  и  $C$  и противоположен им по фазе, что видно из токораспределения на рис. 3.1 и векторной диаграммы рис. 3.2, б).

$$\begin{aligned} \underline{I}_3 &= -(\underline{I}'_{cB} + \underline{I}'_{cC}) = -\left(\frac{\underline{U}'_B}{-jx_{cB}} + \frac{\underline{U}'_C}{-jx_{cC}}\right) = \\ &= -\left(\frac{\underline{U}'_B \omega C_B}{-j} + \frac{\underline{U}'_C \omega C_C}{-j}\right) = -j(\underline{U}'_B \omega C_B + \underline{U}'_C \omega C_C) = \\ &= -j(\sqrt{3}\underline{U}_B \omega C_B + \sqrt{3}\underline{U}_C \omega C_C) = -j\sqrt{3}(\underline{U}_B \omega C_B + \underline{U}_C \omega C_C). \end{aligned}$$

Угол между векторами токов  $\underline{I}'_{cB}$  и  $\underline{I}'_{cC}$  равен  $60^\circ$  (рис. 3.2, б). Таким образом, модуль вектора тока замыкания на землю будет равен

$$|\underline{I}_3| = \sqrt{3}\sqrt{3}|\underline{U}_B \omega C_B| = 3|\underline{U}_C \omega C_C| = 3\underline{U}_\phi \omega C_\phi = 3\underline{U}_\phi \omega C_0 l, \quad (3.4)$$

где  $\underline{U}_\phi = U_B = U_C$  – напряжение фаз сети до замыкания на землю, кВ;

$C_\phi = C_B = C_C$  – емкости фаз сети по отношению к земле, мкФ;

$C_0$  – емкость 1 км фазы сети относительно земли, мкФ/км;

$l$  – длина фазы сети, км.

Таким образом, ток  $\underline{I}_3$  равен утроенному значению емкостного тока фазы на землю в нормальном режиме и зависит от напряжения сети и емкости фаз относительно земли. Емкость фаз относительно земли в воздушных линиях значительно меньше, чем в кабельных.

Упрощенно ток замыкания на землю можно определить:

– для воздушной линии

$$I_3 = \frac{U_{\text{л}} l}{350},$$

где  $U_{\text{л}}$  – линейное напряжение сети, кВ;

– для кабельной

$$I_3 = \frac{U_{\text{л}} l}{10}.$$

Ток замыкания на землю при наличии электрической дуги в месте повреждения может быть определен (электрическая дуга представляет собой активное сопротивление  $r_{\text{д}}$ ):

$$I_3 = \frac{3U_{\phi}}{3r_{\text{д}} - jx_C}.$$

При возникновении электрической дуги ( $r_{\text{д}} \neq 0$ ) и увеличении ее сопротивления конец вектора напряжения нейтрали  $\underline{U}''_0$  перемещается по полуокружности, опирающейся на вектор  $\underline{U}_0$  при  $r_{\text{д}} = 0$  (рис. 3.2, в). Концы векторов  $\underline{U}''_A$ ,  $\underline{U}''_B$ ,  $\underline{U}''_C$  скользят соответственно по аналогичным полуокружностям, пристроенным к концам векторов соответствующих фазных напряжений. На диаграмме (рис. 3.2, в) пунктиром показано положение векторов при отношении  $\frac{r_{\text{д}}}{3\omega C} = 1$ . Треугольник междуфазных напряжений ( $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$ ) остается неизменным и, следовательно, нарушение нормального состояния сети не влияет на работу присоединенных на линейное напряжение сети приемников электроэнергии.

Отношение максимального напряжения неповрежденного провода относительно земли в установившемся режиме замыкания фазы на землю к фазному номинальному напряжению называется коэффициентом заземления сети  $k_3$ . Для сетей с изолированной нейтралью его значение равно примерно  $\sqrt{3}$ .

Однофазное замыкание на землю через дугу более опасно, так как дуга может повредить оборудование и вызвать двух- или трехфазное КЗ (последнее часто наблюдается при однофазных замыканиях на землю одной из жил трехфазного кабеля). Особенно опасны дуги внутри машин и аппаратов, возникающие при однофазных замыканиях на заземленные корпуса.

При определенных условиях (увеличении тока замыкания) в месте замыкания на землю может возникать так называемая перемежающаяся дуга, т. е. дуга, которая периодически гаснет и зажигается вновь. Перемежающаяся дуга сопровождается возникновением перенапряжений на фазах относительно земли, которые могут достигать  $3,5U_{\text{ф}}$ . Эти перенапряжения распространяются на всю электрически связанную сеть, в результате чего возможны пробой изоляции, образование КЗ в частях установки с ослабленной изоляцией.

Наиболее вероятно возникновение перемежающихся дуг при емкостном токе замыкания на землю более 10–30 А в зависимости от напряжения, причем опасность дуговых перенапряжений для изоляции возрастает с увеличением напряжения сети. Допустимые значения тока замыкания нормируются ПУЭ и не должны превышать значений, приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Допустимые значения токов замыкания на землю

Напряжение сети, кВ	3–6	10	15–20	35
Емкостной ток замыкания на землю, А	30	20	15	10

В сетях 3–35 кВ для уменьшения тока замыкания на землю с целью удовлетворения вышеуказанных норм и предотвращения перенапряжений применяется заземление нейтралей через дугогасящие реакторы (ДР).

В нормальном режиме работы ток через реактор практически равен нулю, т. к. напряжение на нейтрали  $U_0 = 0$ . При замыкании на землю фазы  $A$  дугогасящий реактор оказывается под фазным

напряжением, и через место замыкания на землю протекает наряду с емкостным током  $I_C$  также индуктивный ток реактора  $I_L$  (рис. 3.3, *a*). Так как индуктивный и емкостной ток отличаются по фазе на угол  $180^\circ$  (рис. 3.3, *б*), то в месте замыкания на землю они компенсируют друг друга. Если  $I_C = I_L$  (резонанс), то через место замыкания на землю ток протекать не будет. Благодаря этому дуга в месте повреждения не возникает и устраняются связанные с нею опасные последствия.

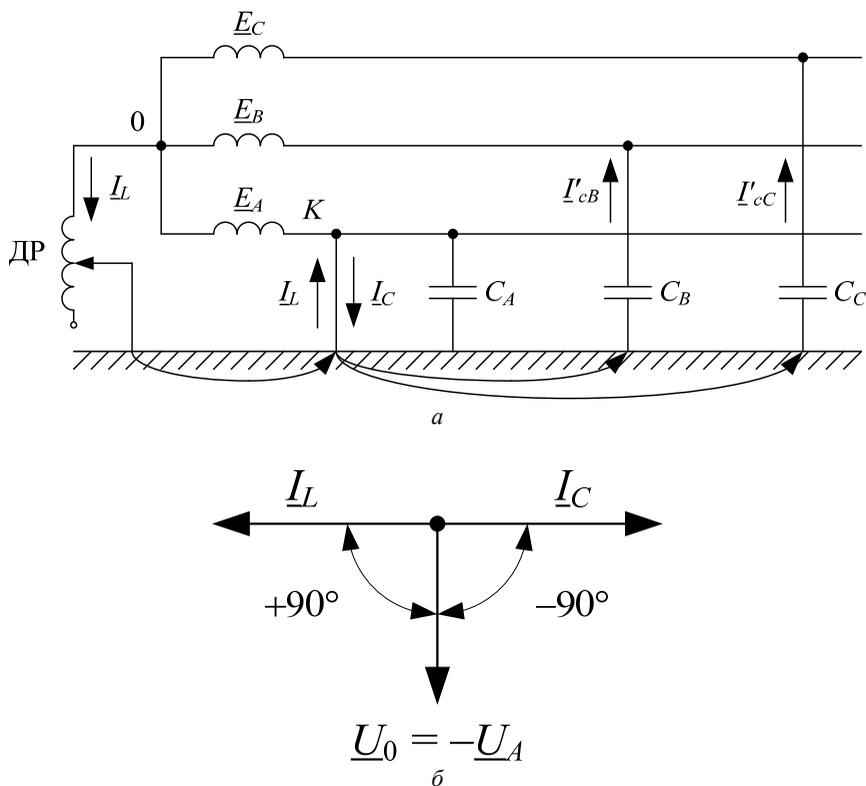


Рис. 3.3. Однофазное замыкание на землю в резонансно-заземленной сети:  
*a* – прохождение токов при замыкании на землю;  
*б* – векторная диаграмма токов в месте повреждения

В этом случае ток  $\underline{I}_3$  в месте повреждения равен

$$\underline{I}_3 = 3(I_L - I_C).$$

Индуктивность дугогасящего реактора выбирают таким образом, чтобы  $\underline{I}_3 = 0$ . Условием этого является равенство:

$$I_L = I_C, \quad \frac{U_\phi}{x_L} = \frac{3U_\phi}{x_C}, \quad 3\omega L = \frac{1}{\omega C_\phi}, \quad L = \frac{1}{3\omega^2 C_\phi}.$$

ДР выполняют с регулированием индуктивности для того, чтобы производить их настройку при изменениях в защищаемой сети.

Изменение индуктивности ДР может производиться ступенчато – переключением числа витков, или автоматически плавно – путем изменения воздушного зазора магнитопровода, а также путем подмагничивания магнитопровода постоянным током.

Таким образом, простое замыкание на землю не является КЗ и поэтому не сопровождается снижением линейных напряжений и появлением повышенных токов в сети.

Допустимая длительность работы с простым замыканием на землю определяется Правилами технической эксплуатации, и в большинстве случаев она не должна превышать двух часов. Последнее связано с тем, что напряжение неповрежденных фаз возрастает до линейного и имеется вероятность пробоя изоляции неповрежденных фаз, т. е. простое замыкание может перейти в двух- или трехфазное КЗ. Поэтому изоляция сетей с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью рассчитывается на линейное напряжение. Это ограничивает область применения этого режима работы нейтрали сетями с напряжением 3–35 кВ. В этих сетях стоимость изоляции электроустановок не является определяющей, и некоторое ее увеличение компенсируется повышенной надежностью питания потребителей, так как однофазные замыкания на землю составляют 65 % всех нарушений изоляции.

Следует отметить, что при работе сети с замкнутой на землю фазой становится вероятным повреждение изоляции другой фазы

и возникновение междуфазного КЗ через землю. Поэтому в сетях с изолированной нейтралью обязательно предусматривают специальные сигнальные устройства, извещающие персонал о возникновении простого замыкания на землю.

Однако в сетях с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью, наряду с повышением напряжения на неповрежденных фазах до линейного и появлением значительных дуговых перенапряжений, могут возникать феррорезонансные явления, приводящие к повреждению измерительных трансформаторов напряжения (при резонансной настройке дугогасящего реактора).

По этой причине в развитых странах уже применяется, а в Республике Беларусь признается целесообразным использовать заземление нейтрали через резистор. Схемы включения резистора в нейтраль сети показаны на рис. 3.4 для различных случаев: при использовании нейтральной точки обмотки силового трансформатора (рис. 3.4, а) либо нейтральной точки обмотки, соединенной в звезду (или разомкнутый треугольник), дополнительного трансформатора (рис. 3.4 б, в, г).

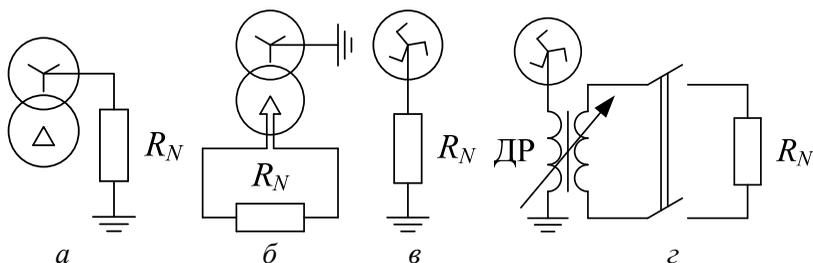


Рис. 3.4. Варианты схем включения резистора в нейтраль сети

Величина резистора  $R_N$  подбирается в зависимости от необходимости отключения сети при однофазном замыкании на землю. Для воздушных неразвитых сетей, где вопросы надежного электроснабжения являются приоритетными, а длительное повышение напряжения на неповрежденных фазах при замыкании одной фазы на землю не является опасным, применяют высокоомный резистор. В этом случае опасные феррорезонансные перенапряжения не возникают и не требуется немедленное отключение сети.

Для кабельных городских развитых сетей, имеющих небольшой запас изоляции по напряжению из-за наличия старых кабелей с ослабленной изоляцией, более важным является вопрос быстрого отключения повреждения и недопущения перенапряжений и развития аварии, чем надежного электроснабжения, поскольку в таких сетях легко обеспечить резервирование питания. В этих случаях применяют низкоомный резистор, что приводит к увеличению тока замыкания на землю и позволяет применять для быстрого отключения повреждения селективные токовые защиты.

### Описание лабораторного стенда

Принципиальная схема стенда, моделирующая сеть с изолированной нейтралью напряжением 18 кВ различной длины, приведена на рис. 3.5.

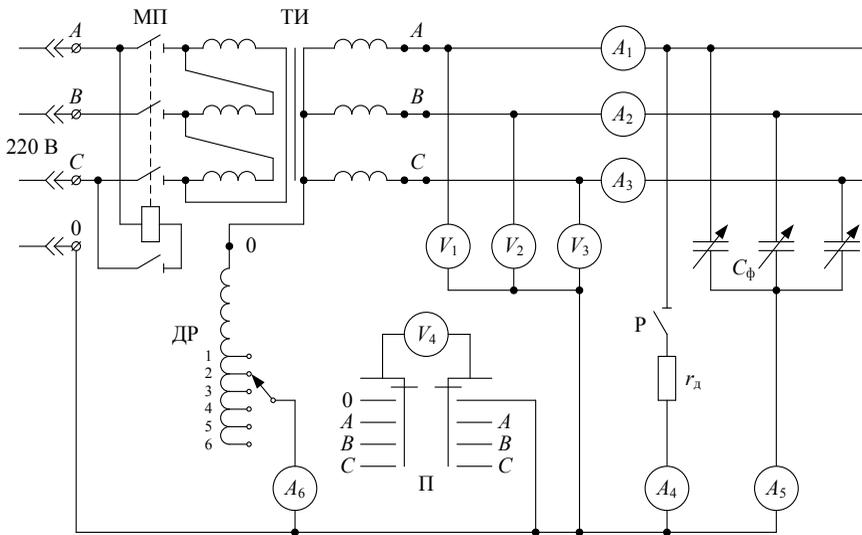


Рис. 3.5. Схема лабораторной установки

В ней источник питания отделен от исследуемой сети разделительным трансформатором ТИ. Контроль напряжений осуществляется по вольтметрам  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ , и  $V_4$ . Вольтметр  $V_4$  с переключением

положений служит для измерения линейных напряжений и напряжения смещения нейтрали. Для измерения фазных токов служат амперметры  $A_1, A_2, A_3$ . Ток в месте повреждения  $I_3$  измеряется амперметром  $A_4$ . Емкостная и индуктивная слагаемые тока измеряются соответственно амперметрами  $A_5$  и  $A_6$ . Переменная емкость сети моделируется трехфазной батареей конденсаторов. Простое замыкание осуществляется переключателем  $P$ .

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами лабораторного стенда. Собрать исследуемую сеть (рис. 3.5) и установить емкость фаз относительно земли  $C_\phi$  согласно заданному варианту (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Емкости фаз относительно земли

Вариант \ Параметры	$U_\phi$ , кВ	$C_\phi$ , мкФ
1	10,5	1,0
2	10,5	0,8
3	10,5	0,6

2. Выполнить измерения токов и напряжений при работе сети с изолированной нейтралью (цепь ДР разомкнута) в нормальном режиме и при замыкании фазы  $A$  на землю. Результаты измерений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

## Результаты измерений

Режимы		Параметры													
		$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_0$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	
Нормальный	измерено														
	вычислено														
Замыкание фазы А на землю	измерено														
	вычислено														
Замыкание фазы А на землю (без ДР) и $r_d \neq 0$															
Замыкание фазы А на землю (ДР вкл.)															
Положение переключателя ДР	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														

## Анализ результатов работы и выводы

Сравнить результаты измерений с данными расчета и сделать заключение о степени их соответствия. Построить векторные диаграммы напряжений и токов.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторного стенда.
3. Результаты измерений и вычислений токов и напряжений (табл. 3.3).
4. Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные по результатам измерений.
5. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Дать определение простого замыкания на землю. Его отличие от короткого замыкания.
2. Каковы последствия простого замыкания?
3. Построить векторные диаграммы токов и напряжений при замыкании фаз  $B$  или  $C$  на землю.
4. Где больше ток  $I_3$  в кабельной или воздушной линии?
5. Достоинства и недостатки сетей с изолированной нейтралью.
6. Каково назначение дугогасящих реакторов, и когда они устанавливаются?
7. Каким образом выбирается индуктивность ДР?
8. Влияние дуги в месте повреждения при простом замыкании. Чем опасна перемежающаяся дуга?
9. Преимущества резистивно заземленной нейтрали?

Литература: [1] с. 434–440, [3] с. 27–38.

## Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

#### Цель работы

Определение сопротивлений токам нулевой последовательности двух- и трехобмоточных трансформаторов с различными схемами соединений обмоток.

#### Краткие теоретические сведения

Для анализа и расчета несимметричных КЗ необходимо определять сопротивления отдельных элементов системы для токов различных последовательностей.

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном режиме, а также при трехфазном КЗ, по существу являются сопротивлениями прямой последовательности.

При расчете несимметричных КЗ с помощью расчетных кривых, сопротивления обратной последовательности отдельных элементов принимаются равными сопротивлениям прямой последовательности.

Система токов нулевой последовательности резко отличается от системы токов прямой и обратной последовательности, вследствие чего сопротивления нулевой последовательности в общем случае весьма существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

Схема замещения нулевой последовательности определяется схемой сети, а также схемами соединения обмоток трансформаторов, автотрансформаторов и режимом заземления их нейтралей. Вопросы принципа составления схем замещения нулевой последовательности при различных видах несимметрии рассматриваются в лабораторной работе № 5 второй части лабораторного практикума.

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов определяется схемой соединения обмоток и конструктивным исполнением их магнитопроводов.

Если несимметричное КЗ на землю произошло со стороны обмотки трансформатора, соединенной в треугольник ( $\Delta$ ) или звезду

без заземленной нейтрали (Y), сопротивление нулевой последовательности трансформатора бесконечно велико ( $x_{T0} = \infty$ ), так как в этом случае исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе, независимо от того, как соединены его другие обмотки (табл. 4.1, ж, з и табл. 4.2, ж).

Путь для циркуляции токов нулевой последовательности имеет место в тех трансформаторах, которые со стороны КЗ на землю имеют обмотку, соединенную в звезду с заземленной нейтралью (Y<sub>0</sub>).

Основные варианты соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов, схемы замещения их для токов нулевой последовательности и выражения для определения сопротивления нулевой последовательности данной ветви приведены в табл. 4.1, а для трехобмоточных трансформаторов – в табл. 4.2. В этих таблицах, для общности проводимых здесь записей, обмотки трансформаторов обозначены порядковыми номерами I, II, III вместо B, C, H, как это обычно принято, а  $x_{T0}$  – сопротивление нулевой последовательности внешнего элемента (генератора).

Как видно из табл. 4.1, а, б, для всех двухобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y<sub>0</sub>/Y<sub>0</sub> (когда внешний элемент со стороны обмотки II имеет заземленную нейтраль) и Y<sub>0</sub>/Δ, сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности,  $x_{T0} = 1$ , так как  $x_{\mu 0} \gg x_{II}$ , а сопротивления каждой обмотки двухобмоточных трансформаторов приблизительно одинаковы и равны половине  $U_k$  %, т. е.  $x_I = x_{II} = 0,5x_I$ .

При соединении обмоток Y<sub>0</sub>/Y<sub>0</sub> (когда внешний элемент соединен в Δ или Y) и Y<sub>0</sub>/Y (табл. 4.1, в, з, д) сопротивление нулевой последовательности трансформатора  $x_{T0} = x_I + x_{\mu 0}$ , так как на стороне обмотки II нет пути для циркуляции тока нулевой последовательности, что соответствует режиму холостого хода трансформатора. Величина  $x_{\mu 0}$  – реактивность намагничивания нулевой последовательности трансформатора, которая зависит от конструкции магнитопровода.

Таблица 4.1

Схемы соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов и их схемы замещения для токов нулевой последовательности

№ Варианта	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора, для токов нулевой последовательности	Результирующее сопротивление нулевой последовательности ветви трансформатора
а			$x_{\Sigma 0} = x_{T0} =$ $= x_I + \frac{x_{II} x_{\mu 0}}{x_{II} + x_{\mu 0}} =$ $= x_I + x_{II},$ $x_{\mu 0} = \infty$
б			$x_{\Sigma 0} = x_I +$ $+ \frac{x_{\mu 0} (x_{II} + x'_{r0})}{x_{\mu 0} + x_{II} + x'_{r0}}$
в			
г			$x_{\Sigma 0} = x_{T0} =$ $= x_I + x_{\mu 0}$
д			
ж		-	$x_{\Sigma 0} = \infty$
з		-	$x_{\Sigma 0} = \infty$

Таблица 4.2

Схемы соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов и их схемы замещения для токов нулевой последовательности

№ варианта	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора, для токов нулевой последовательности	Результирующее сопротивление нулевой последовательности ветви трансформатора
а			$x_{\Sigma 0} = x_I + \frac{x_{III}(x_{II} + x'_{T0})}{x_{III} + x_{II} + x'_{T0}}$
б			$x_{\Sigma 0} = x_I + \frac{x_{III}(x_{II} + x_{T0})}{x_{III} + x_{II} + x_{T0}}$
в			$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = x_I + x_{III}$
г			$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = x_I + \frac{x_{III}x_{T0}}{x_{II} + x_{III}}$
д			$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = x_I + \frac{x_{III}x_{T0}}{x_{II} + x_{III}}$
ж		<p style="text-align: center;">-</p>	$x_{\Sigma 0} = \infty$

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных четырех- или пятистержневых трансформаторов, ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, что позволяет им пренебречь и считать  $x_{\mu 0} = \infty$ , поскольку при таких кон-

струкциях магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через свободные от обмоток стержни.

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания; следовательно, реактивность  $x_{\mu 0}$  у трансформатора такого типа значительно меньше, чем  $x_{\mu 1}$ . В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах 0,3–1 и должна быть приведена к базисным условиям.

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило, соединена в треугольник. Поэтому для них всегда можно принимать  $x_{\mu 0} = \infty$ , это значение не вводится в схему замещения нулевой последовательности.

Обмотки автотрансформатора связаны между собой не только магнитно, но и электрически, поэтому при глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности будет аналогична схеме трехобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y_0/\Delta/Y_0$ .

Сопротивления схем замещения трансформатора  $x_I$ ,  $x_{II}$  и  $x_{III}$  находят по формулам, как при расчете трехфазного КЗ.

### **Описание лабораторного стенда**

Для исследования используются двухобмоточный (ТС-1,96/0,4) и трехобмоточный (ТС-1,74/0,4) трехстержневые трансформаторы, каталожные величины которых приведены в табл. 4.3. Выводы обмотки II трансформаторов выполнены таким образом, что представляется возможным собрать любую схему соединения обмоток. Следует отметить, что у трехобмоточного трансформатора обмотка III всегда соединена в  $\Delta$ .

В качестве источника напряжения нулевой последовательности используется однофазное напряжение, которое подводится через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) к первичной обмотке исследуемого трансформатора, соединенной по схеме  $Y_0$ .

Таблица 4.3

Каталожные данные исследуемых трансформаторов  
и результаты расчета их сопротивлений

Схема соединения		Каталожные величины							Расчетные величины, Ом								
трансформатора	генератора	$S_{НБ}$ кВА	$U_b$ В	$U_{II}$ В	$U_{III}$ В	$U_{КЛ-II}$ %	$U_{КЛ-III}$ %	$U_{I-II}$ %	$X_{\mu 0}$ , о. е.	$X_{Г0}$ , Ом	$X_{\Sigma 0}$	$X_{Г0}$	$X_I$	$X_{II}$	$X_{III}$	$X_{\mu 0}$	$X_{Г0}$
двухобмоточный трансформатор																	
$Y_0/\Delta$	$Y_0$	1,96	400	120	–	10,5	–	–	$\infty$	–							
$Y_0/Y$	$Y_0$	1,96	400	120	–	10,5	–	–	0,3	–							
$Y_0/Y_0$	$Y_0$	1,96	400	120	–	10,5	–	–	0,3	1							
трехобмоточный трансформатор																	
$Y_0/\Delta/Y$	$Y_0$	1,74	400	230	15	9	17	8,5	$\infty$	–							
$Y_0/\Delta/\Delta$	$Y_0$	1,74	400	230	15	9	17	8,5	$\infty$	–							
$Y_0/\Delta/Y_0$	$Y_0$	1,74	400	230	15	9	17	8,5	$\infty$	2							

Таблица 4.4

Результаты измерений и расчета

Схема соединения		Измеренные величины								Расчетные величины, Ом						
трансформатора	генератора	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$I_4$ , А	$I_5$ , А	$I_6$ , А	$X_{\Sigma 0}$	$X_{Г0}$	$X_I$	$X_{II}$	$X_{III}$	$X_{\mu 0}$	$X_{Г0}$
двухобмоточный трансформатор																
$Y_0/\Delta$	$Y_0$															
$Y_0/Y$	$Y_0$															
$Y_0/Y_0$	$Y_0$															
трехобмоточный трансформатор																
$Y_0/\Delta/Y$	$Y_0$															
$Y_0/\Delta/\Delta$	$Y_0$															
$Y_0/\Delta/Y_0$	$Y_0$															

Для измерения токов и напряжений в цепях стенда установлены амперметры ( $A_1$ – $A_6$ ) и вольтметры ( $V_1$  и  $V_2$ ). Амперметр  $A_3$  включается в обмотку II, соединенную по схеме  $\Delta$ .

Схема лабораторного стенда для исследования двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 4.1, а трехобмоточного – на рис. 4.2.

## Порядок выполнения работы

1. При самостоятельной подготовке к лабораторной работе определить сопротивления ( $x_{\Sigma 0}$ ,  $x_{T0}$ ,  $x_I$ ,  $x_{II}$ ,  $x_{III}$ ,  $x_{\mu 0}$ ,  $x'_{T0}$ ) в Омах, используя каталожные данные исследуемых трансформаторов, результаты расчетов занести в табл. 4.3. Сопротивления  $x_{\Sigma 0}$  и  $x_{T0}$  вычисляются по выражениям, приведенным в табл. 4.1 и табл. 4.2 для соответствующих схем соединений обмоток трансформаторов. Сопротивления обмоток трансформаторов и генератора определяются:

– для двухобмоточного трансформатора

$$x_I = x_{II} = \frac{U_{K \text{ I-II}}}{200} \frac{U_I^2}{S_H}, \quad x_{\mu 0} = x_{\mu 0}^* \frac{U_I^2}{S_H};$$

– для трехобмоточного трансформатора

$$x_I = \frac{U_{K \text{ I-II}} + U_{K \text{ I-III}} - U_{K \text{ II-III}}}{200} \frac{U_I^2}{S_H},$$

$$x_{II} = \frac{U_{K \text{ I-II}} + U_{K \text{ II-III}} - U_{K \text{ I-III}}}{200} \frac{U_I^2}{S_H},$$

$$x_{III} = \frac{U_{K \text{ I-III}} + U_{K \text{ II-III}} - U_{K \text{ I-II}}}{200} \frac{U_I^2}{S_H};$$

– для генератора

$$x'_{T0} = x_{T0} k_T^2.$$

В этих выражениях:  $U_K$  – напряжение КЗ трансформатора, %;  $U_I$  – напряжение первичной обмотки трансформатора, В;  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора, В·А;  $x'_{T0}$  – сопротивление токам нулевой последовательности генератора, приведенное к пер-

вичной обмотке трансформатора, Ом;  $k_T = \frac{U_I}{U_{II}}$  – коэффициент

трансформации трансформатора.

2. Определить величины реактивностей нулевой последовательности двухобмоточного (рис. 4.1) и трехобмоточного (рис. 4.2) трансформаторов  $x_{T0}$  для различных схем соединений обмоток. В каждом случае установить ЛАТРОм напряжение такой величины, чтобы через амперметр  $A_1$  протекал ток не более 2 А. Данные измерений занести в табл. 4.4.

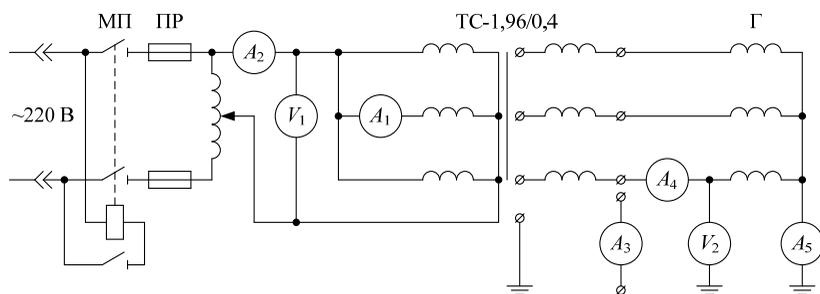


Рис. 4.1. Схема исследования двухобмоточного трансформатора

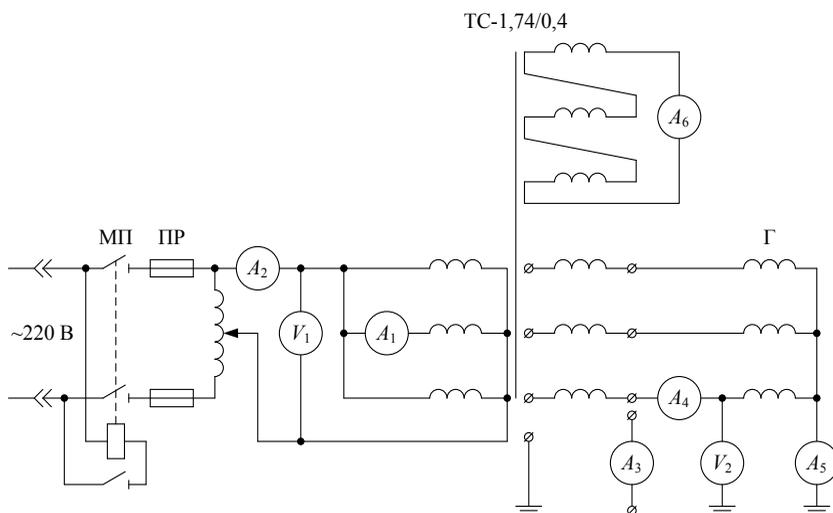


Рис. 4.2. Схема исследования трехобмоточного трансформатора

Сопrotивление нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора:

– для схемы соединения  $Y_0/\Delta$

$$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = \frac{U_I}{I_I} = x_I + x_{II}; \quad (4.1)$$

– для схемы соединения  $Y_0/Y$

$$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = \frac{U_I}{I_I} = x_I + x_{\mu 0}; \quad (4.2)$$

– для схемы соединения  $Y_0/Y_0$

$$x_{\Sigma 0} = \frac{U_I}{I_I} = x_I + \frac{x_{\mu 0}(x_{II} + x'_{T0})}{x_{\mu 0} + x_{II} + x'_{T0}}, \quad (4.3)$$

$$x_{T0} = x_I + \frac{x_{\mu 0}x_{II}}{x_{\mu 0} + x_{II}}.$$

Сопrotивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора:

– для схемы соединения  $Y_0/\Delta/Y$

$$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = \frac{U_I}{I_I} = x_I + x_{II}; \quad (4.4)$$

– для схемы соединения  $Y_0/\Delta/\Delta$

$$x_{\Sigma 0} = x_{T0} = \frac{U_I}{I_I} = x_I + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}; \quad (4.5)$$

– для схемы соединения  $Y_0/\Delta/Y_0$

$$x_{\Sigma 0} = \frac{U_I}{I_I} = x_I + \frac{x_{III}(x_{II} + x'_{r0})}{x_{III} + x_{II} + x'_{r0}}, \quad (4.6)$$

$$x_{r0} = x_I + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}.$$

Решив уравнения (4.1)–(4.6), определить сопротивления каждой из обмоток двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов токам нулевой последовательности. Результаты расчета занести в табл. 4.4.

### **Анализ результатов работы и выводы**

Сравнить сопротивления обмоток двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов токам нулевой последовательности, полученных в результате расчетов измерений и каталожных данных. В случае их существенного различия выяснить возможные причины.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Схемы, по которым производились измерения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов.
3. Результаты расчетов (табл. 4.3 и 4.4).
4. Заключение по выполненной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. В каком случае трансформатор с соединением обмоток  $Y_0/\Delta$  будет вводиться в схему замещения нулевой последовательности конечным значением сопротивления, а в каких случаях его сопротивление равно  $\infty$ ?

2. В каких случаях трансформатор с соединением обмоток  $Y_0/Y_0$  будет вводиться в схему замещения нулевой последовательности как трансформатор с соединением обмоток  $Y_0/Y$ ? Почему?

3. Почему ток намагничивания нулевой последовательности у группы из трех однофазных трансформаторов, трехфазных четырех- и пятистержневых трансформаторов мал?

4. Как определить сопротивление нулевой последовательности трансформатора, имеющего схему соединения обмоток  $Y_0/Y/Y_0$ ?

5. Составить схему замещения нулевой последовательности по заданию преподавателя для расчетной схемы с несколькими трансформаторами.

Литература: [1] с. 279–280, 285–292; [2] с. 38–42.

## Литература

1. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – Москва: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Свита, Л. Н. Тексты лекций по курсу «Переходные процессы в электрических системах» для студентов электротехнических специальностей / Л. Н. Свита, С. М. Силюк. – Ч. 1. – Минск: БПИ, 1989. – 65 с.
3. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Лабораторные работы (практикум) по дисциплине «Переходные процессы в электрических системах» для студентов специальностей 10.01, 10.02, 10.04: в 2-х ч. Ч. 1. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / сост.: В. А. Булат [и др.] – Минск: БПИ, 1990. – 58 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ» .....	4
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	5
Лабораторная работа № 1	
Исследование распределения токов короткого замыкания и остаточных напряжений при коротких замыканиях .....	7
Лабораторная работа № 2	
Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи при внезапном коротком замыкании .....	17
Лабораторная работа № 3	
Замыкание фазы на землю в сети с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью.....	25
Лабораторная работа № 4	
Определение сопротивлений трансформаторов для токов нулевой последовательности.....	39
Литература .....	50

Учебное издание

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

Лабораторный практикум  
для студентов специальностей  
1-43 01 01 «Электрические станции»,  
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,  
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

В 2 частях

Часть 1

**СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ**

Составители:

**БОБКО** Николай Николаевич  
**БУЛАТ** Валерий Александрович  
**БУЛОЙЧИК** Елена Васильевна  
**ГУБАНОВИЧ** Анатолий Григорьевич

Редактор *Ю. В. Ходочинская*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 02.11.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,36. Тираж 100. Заказ 963.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.