

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

Л. И. Евминов

ЭЛЕКТОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
для студентов специальностей**

**1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2022

УДК 621.316.925(075.8)
ББК 31.27-05я73
Е19

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 22.10.2020 г.)*

Рецензент: проф. каф. «Электроснабжение» д-р техн. наук, проф. *Н. В. Грунтович*

Евминов, Л. И.

Е19 Электромагнитные переходные процессы : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электрические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / Л. И. Евминов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 107 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены, учитывая современные учебные планы, методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы». Каждое методическое указание содержит цель работы, краткую теорию, порядок выполнения работы, содержание отчета, контрольные вопросы.

Для студентов энергетических специальностей дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.316.925(075.8)
ББК 31.27-05я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2022

Лабораторная работа № 1

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КЗ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОНИЖАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК Y/Y_n-0 .

1. Цель работы: построение векторных диаграмм токов и напряжений при переходе через трехфазный трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n при различных видах КЗ.

2. Краткая теория

2.1. Общие положения

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

Группой соединения трансформатора считается сдвиг по фазе линейного (фазного) напряжения обмотки низкого напряжения (НН) по отношению к одноименному линейному (фазному) напряжению обмотки высшего напряжения (ВН). Группы соединения принято определять по циферблату часов, считая вектор напряжения ВН исходным и направленным на цифру 12. Цифра на циферблате, на которую укажет вектор напряжения обмотки НН и определяет группу соединения обмоток.

Группа соединения трансформатора определяется схемой соединения его обмоток и обозначается целым числом m в зависимости от сдвига по фазе между линейными первичным и вторичным напряжениями на одноименных зажимах трансформатора. Угол сдвига $m \cdot 30^\circ$ соответствует m группе соединений. В зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора (в звезду или треугольник), возможно получение различных групп соединения.

В системах электроснабжения наибольшее распространение получили следующие схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:

- а) схема соединения обмоток трансформатора Y/Y_n-0 ;
- б) схема соединения обмоток трансформатора D/Y_n-0 .

При наличии в электрической цепи силовых трансформаторов необходимо ввести дополнительные условия, для того чтобы сопос-

тавлять векторные диаграммы токов и напряжений на разных сторонах трансформатора. Положительные направления токов при этом следует задавать с учетом полярности обмоток трансформатора. В зависимости от направления намотки обмоток трансформатора взаимное направление токов в них изменяется. Для того чтобы определять направление токов в обмотках силового трансформатора и сопоставлять их между собой, обмоткам трансформатора дают условные обозначения «начало» и «конец».

В схеме, приведенной на рисунке 1.1,а между источником ЭДС E и нагрузкой включен трансформатор. Обозначим начала обмоток ВН и НН силового трансформатора буквами A и a , концы — X и x . При этом следует иметь в виду, что начало одной из обмоток принимается произвольно, а второй определяется на основании условных положительных направлений токов, заданных для обеих обмоток трансформатора.

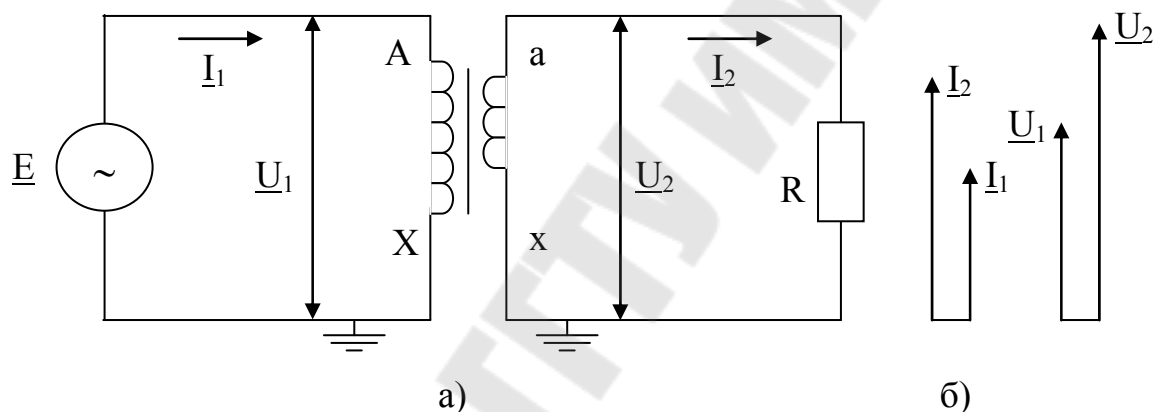


Рисунок 1.1. – Принцип работы трансформатора (а) и определение условных положительных направлений токов и напряжений в обмотках трансформатора; а – схема цепи; б – векторная диаграмма токов и напряжений в обмотках трансформатора

На рис. 1.1, б показаны положительные направления токов в обмотках силового трансформатора. В первичной обмотке положительным считается направление тока от начала к концу обмотки, а во вторичной — от конца к началу. При таких условно принятых положительных направлениях токов в обмотках трансформатора направление тока в нагрузке остается таким же, каким оно было бы при отсутствии трансформатора и непосредственном подключении нагрузки к генератору. При этом, поскольку магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе трансформатора обоими токами (первичным и вторичным), направлены встречно (рисунок 1.1,а), для идеального транс-

форматора, пренебрегая током намагничивания, можно записать следующее равенство через магнитодвижущие силы (МДС):

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = 0, \quad (1.1)$$

где $I_1 W_1$ и $I_2 W_2$ – магнитодвижущие силы, создающие эти потоки, W_1 , W_2 – число витков обмоток ВН и НН.

Из уравнения (1.1):

$$I_1 = I_2 \frac{W_1}{W_2} \quad (1.2)$$

Согласно равенству (1.2) векторы I_1 и I_2 имеют одинаковые знаки и, следовательно, будут совпадать по направлению (рисунок 1.1, б). Для напряжений также удобно принять такие положительные направления, чтобы векторы первичного и вторичного напряжений на обмотках совпадали по фазе, как показано на рисунке 1.1, б)

2.2. Токи и напряжения при переходе через трехфазный трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n-0 при трехфазном КЗ

Для трехфазного трансформатора Y/Y_n-0 схема соединений и векторные диаграммы токов и напряжений показаны на рисунке 1.2 при симметричной нагрузке по фазам или при трехфазном КЗ. Угловые смещения токов и напряжений по фазам на стороне 1 и 2 отсутствуют.

Анализируя векторные диаграммы напряжений (рисунок 1.2, б) и токов (рисунок 1.2, б, в), можно сделать вывод, что напряжения и токи, протекающие по первичной обмотке, трансформируются без сдвигов по фазе во вторичную обмотку, изменяясь по значению в K_T раз.

2.3. Распределение токов при трехфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Y_n-0 . (рисунок 1.2)

Коэффициент трансформации трансформатора T для схемы Y/Y_n-0 численно равен

$$K_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}, \quad (1.3)$$

где U_{AB} , U_{ab} – линейные напряжения соответственно обмоток ВН и НН трансформатора

Ток КЗ $I_{по\ нн}^{(3)}$, протекающий в любой фазе при трехфазном КЗ на стороне НН трансформатора T определяется

$$I_{a\phi}^{(3)} = I_{в\phi}^{(3)} = I_{с\phi}^{(3)} = \frac{U_{л\ a\ в}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma}}, A, \quad (1.4)$$

где $U_{Л}$ – линейное напряжение, В; Z_{Σ} – полное сопротивление цепи КЗ (питающей системы и трансформатора Т), приведенное к стороне Y_0 , т.е. к НН, Ом.

Рассчитанные токи трехфазного КЗ за трансформатором на стороне низшего напряжения должны быть пересчитаны на сторону высшего напряжения через коэффициент трансформации трансформатора Т K_T

$$I_{ПО.ВН}^{(3)} = \frac{I_{ПО.НН}^{(3)}}{K_T}. \quad (1.5)$$

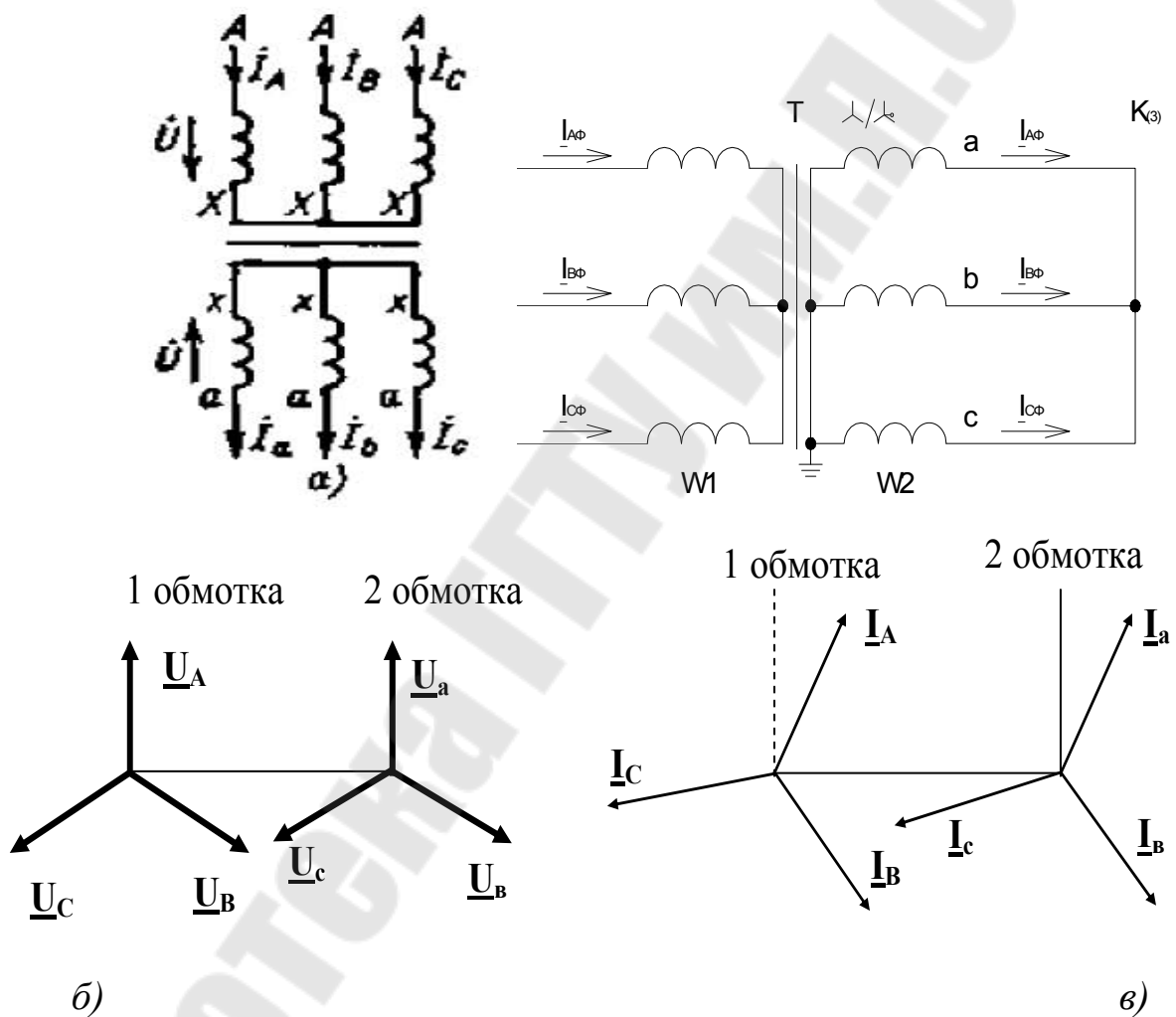


Рисунок 1.2. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y_n-0 , а – схема соединения обмоток; б – векторная диаграмма напряжений; в – векторная диаграмма токов при $K_T=1$

При построении векторных диаграмм напряжений и токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рисунки 1.2, б, в) для про-

стоты условно принят коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$.

Анализируя векторные диаграммы токов можно сделать следующие выводы:

-Токи, протекающие по вторичной обмотке, трансформируются без сдвигов по фазе в первичную обмотку.

- При трехфазном КЗ в точке К между фазами a , b и c звезды Y_n токи КЗ одинаковые в фазах по величине протекают во всех трех фазах.

- Вектора фазных токов и напряжений на стороне НН и ВН сдвинуты на угол 120° (рисунок 1.2,б,в). По этим причинам трехфазное КЗ называется симметричным КЗ.

2.4.Распределение токов при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Y_n-0

При двухфазном КЗ в точке К⁽²⁾ между фазами b и c звезды Y_n за трансформатором со схемой Y/Y_n-0 (рисунок 1.3) токи КЗ одинаковые по величине протекают в двух фазах. Вектора фазных токов при этом сдвинуты на угол 180° (рисунок 1.3,в).

Ток КЗ, протекающий в фазе при двухфазном КЗ на стороне НН трансформатора Т определяется

$$I_{вф}^{(2)} = I_{сф}^{(2)} = \sqrt{3} \frac{U_{л}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}}, \text{ А}, \quad (1.6)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение стороны НН трансформатора Т, В; $Z_{1\Sigma}$ и $Z_{2\Sigma}$ – полные сопротивления прямой и обратной последовательности цепи КЗ, приведенные к стороне НН трансформатора, соединенной в Y_n , Ом.

Ток КЗ, протекающий в поврежденных фазах при двухфазном КЗ на стороне НН, допускается определять по формуле, полагая $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma}$.

$$I_{вф}^{(2)} = I_{сф}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)} \cdot A. \quad (1.7)$$

Рассчитанные токи двухфазного КЗ за трансформатором на стороне низшего напряжения могут быть пересчитаны на сторону высшего напряжения по формуле (1.5).

При двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Y_n-0 сдвиг по фазе между токами вторичной и первичной обмоток трансформатора равен 0° (рисунок 1.3, б, в). Для простоты при построении векторных диаграмм токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рисунок 1.3, б, в) условно принимаем коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y и Y_n равно 1,

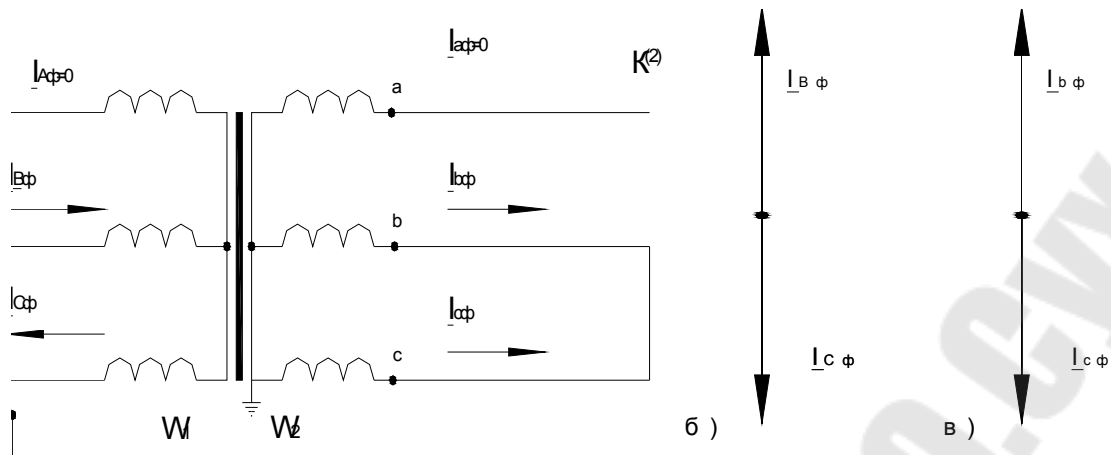


Рисунок 1.3. – Распределение токов (а) и векторные диаграммы токов вторичной (в) и первичной обмоток (б) при двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Y/Y_n-0 и $K_T = 1$.

2.5. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Y/Y_n-0

Рассмотрим распределение токов на стороне звезды трансформатора с соединением обмоток Y/Y_n-0 при однофазном КЗ фазы а в точке $K^{(1)}$ на стороне звезды НН (рисунок 1.4). Для простоты принимаем, что коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y и Y_n равно 1. При однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Y_n-0 ток КЗ на стороне НН проходит только в поврежденной фазе а (рисунок 1.4).

Токи однофазного КЗ на стороне ВН за трансформатором со схемой Y/Y_n-0 проходят во всех трех фазах, причем в одной фазе протекает ток равный $2/3$ тока однофазного КЗ, а в двух других протекают половина этого тока (рисунок 1.4). Т.е.

$$\begin{aligned} I_{внА}^{(1)} &= 2/3 I_{нн}^{(1)} / K_T; \\ I_{внВ}^{(1)} &= I_{внС}^{(1)} = -1/3 I_{нн}^{(1)} / K_T; \end{aligned} \quad (1.8)$$

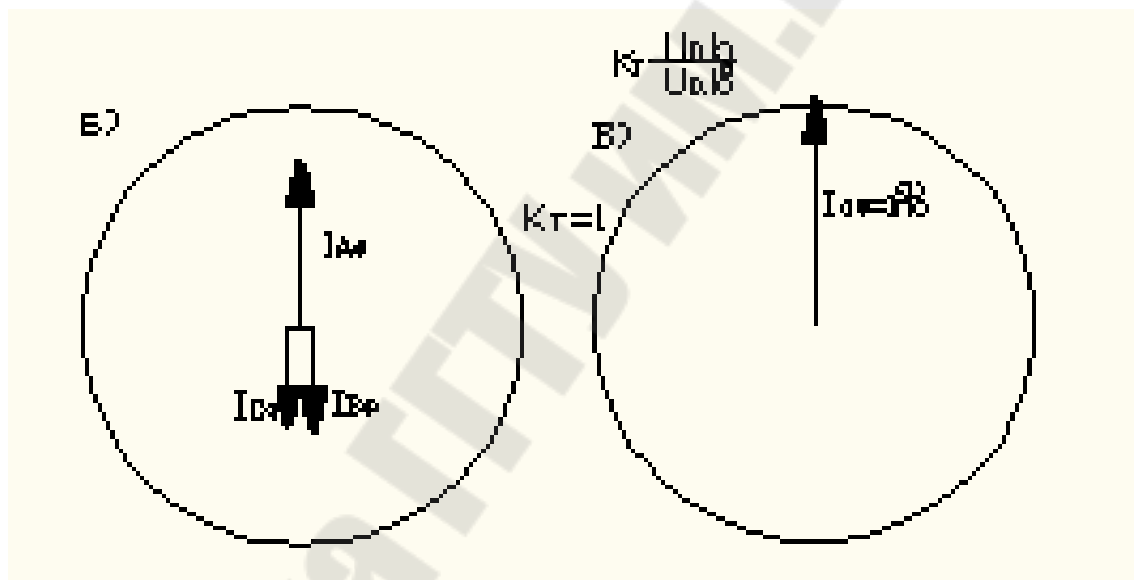
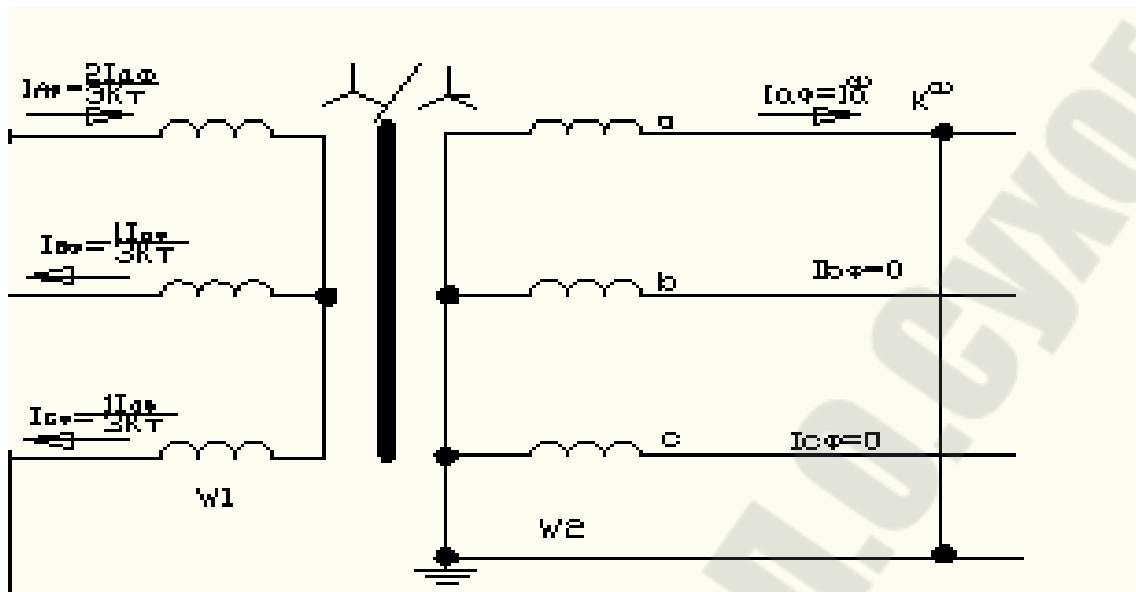


Рисунок 1.4. – Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Y/Y_n-0 и $K_T = 1$

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 1.5) питается от сети напряжением 3×220 В системы электроснабжения лаборатории. В стенде смонтированы силовой трехфазный трансформатор, резисторы нагрузки и необходимые для измерений приборы. Амперметры со стороны ВН подключены и измеряют линейный ток стороны ВН.

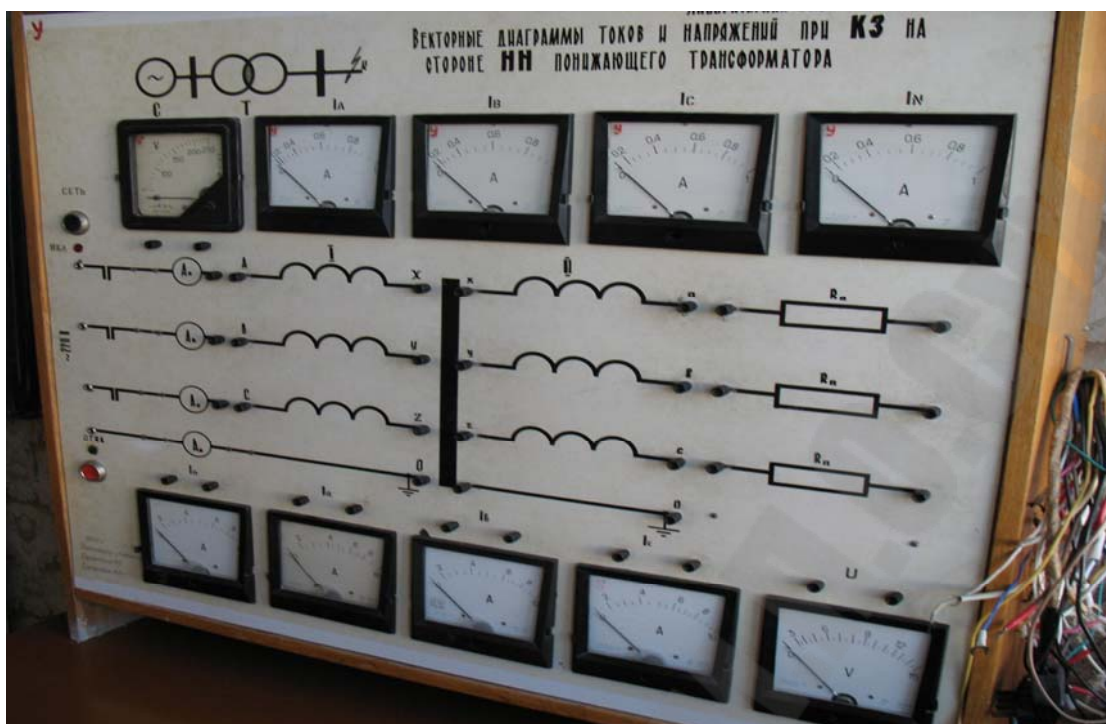


Рисунок 1.5. Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы.

1. Нарисовать схему соединения обмоток трансформатора в группу Y/Y_n-0 с приборами, необходимыми для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.
2. С помощью трехфазной вилки подать напряжение на стенд. Включить стенд, нажав кнопку черного цвета на стенде. При этом загорится красная сигнальная лампа на стенде.
3. Измерить линейные напряжения со стороны НН и ВН трансформатора вольтметрами стенда. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.
4. Вычислить коэффициент трансформации K_t трансформатора Т по выражению (1.3). Результаты вычислений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. – Результаты измерений

	Первичная сторона			Вторичная сторона		
	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_{ab}, В$	$U_{bc}, В$	$U_{ca}, В$
Вычисленная величина K_t	$K_{t1} =$		$K_{t2} =$	$K_{t3} =$		
Среднее значение K_t	$K_{t.ср} =$					

5. Отключить стенд. Выполнить трехфазное КЗ, перемкнув три клеммы выхода резисторов R.

6. Включить стенд. При КЗ трех фаз на вторичной стороне трансформатора снять показания приборов первичной и вторичной стороны и записать показания приборов в таблицы 1.2 и 1.3. Отключить стенд.
7. Вычислить величины токов и напряжений первичной стороны трансформатора через $K_{т.ср}$, используя результаты измерений токов и напряжений на вторичной стороне. Результаты расчетов занести в таблицу 1.2. Сравнить результаты расчетов и измерений.
8. Построить по результатам измерений векторные диаграммы фазных и линейных напряжений на первичной и вторичной стороне трансформатора, а также токов на первичной и вторичной стороне трансформатора
9. Выполнить двухфазное КЗ, перемкнув две клеммы выхода резисторов R. (Варианты закорачиваемых фаз заданы в таблице 1.4)
10. Повторить пункты 6,7, 8 при двухфазном КЗ. (Результаты измерений занести в таблицы 1.2 и 1.3.)
11. Выполнить однофазное КЗ, перемкнув клемму выхода резистора R на нейтраль трансформатора. (Варианты закорачиваемой фазы заданы в таблице. 1.4)
12. Повторить пункты 6,7, 8 при однофазном КЗ. Результаты измерений занести в таблицы 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2 – Результаты измерений

Первичная сторона						
Измеренная величина	$K^{(3)}$		$K^{(2)}$		$K^{(1)}$	
	Измеренная величина	Вычисленная величина	Измеренная величина	Вычисленная величина	Измеренная величина	Вычисленная величина
I_A, A						
I_B, A						
I_C, A						
I_0, A						
$U_{A, B}$						
$U_{B, B}$						
$U_{C, B}$						
$U_{AB, B}$						
$U_{BC, B}$						
$U_{CA, B}$						

Таблица 1.3 – Результаты измерений

Измеряемая величина	Вторичная сторона		
	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
	Измеренная величина	Измеренная величина	Измеренная величина
I_a, A			
I_b, A			
I_c, A			
U_a, B			
U_b, B			
U_c, B			
U_{ab}, B			
U_{bc}, B			
U_{ca}, B			
I_0, A			

Примечание. Фазы, между которыми осуществляются соответствующие виды КЗ, для каждой бригады студентов задаются таблицей 1.4.

Таблица 1.4 – Варианты заданий

№ бригады	Y / Y_n-0	
	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
1	AB	C-O
2	BC	A-O
3	CA	A-O
4	AB	B-O
5	BC	B-O
6	CA	B-O
7	AB	A-O
8	BC	C-O

5. Содержание отчета

1. Название и цель лабораторной работы и номер бригады.
2. Схема соединения обмоток трансформатора в группу Y/Y_n-0 с приборами, необходимыми для измерения фазных и линейных напряжений, а также фазных токов.
3. Результаты измерений по пунктам рабочего задания в виде таблиц 1.1, 1.2 и 1.3.

4. Построенные по результатам измерений векторные диаграммы фазных и линейных напряжений вторичной и первичной обмоток и токов вторичной и первичной обмоток, выполненных в масштабе для трехфазного, двухфазного и однофазного коротких замыканий.

5. Письменный ответ на вопросы 9,10 и 11 перечня контрольных вопросов.

6. Контрольные вопросы

1. Каким образом обозначаются начала и концы первичной и вторичной обмоток трансформатора?

2. Как вычисляется коэффициент трансформации трехфазного трансформатора?

3. Дать определение группы соединения обмоток трехфазного трансформатора.

4. Чему равен угол сдвига между первичными и вторичными линейными напряжениями трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток трансформатора в группу Y/Y_n-0 ?

5. Чему равен угол сдвига между первичными и вторичными токами трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток трансформатора в группу Y/Y_n-0 ?

6. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора при трехфазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?

7. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора при двухфазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?

8. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора при однофазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?

9. Чему равны токи на стороне ВН трансформатора с соединением Y/Y_n-0 , если фазные токи на стороне НН в равны $I_a = I_b = I_c =$ (соответствует номеру бригады в Амперах) при трехфазных КЗ и коэффициенте трансформации K_T из таблицы 1?

10. Чему равны токи на стороне ВН трансформатора с соединением Y/Y_n-0 , если фазные токи на стороне НН в равны $I_a = I_b = I_c =$ (соответствует номеру бригады в Амперах) при двухфазных КЗ и коэффициенте трансформации K_T из таблицы 1?

11. Чему равны токи на стороне ВН трансформатора с соединением Y/Y_n-0 , если фазные токи на стороне НН в равны $I_a = I_b = I_c =$ (соответствует номеру бригады в Амперах) при однофазных КЗ и коэффициенте трансформации K_T из таблицы 1?

Лабораторная работа № 2

ПРОСТЫЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

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

2. Краткая теория

2.1. Нормальный режим. В сетях с изолированной нейтралью при нормальной работе, наряду с рабочими токами нагрузки, по фазам проходят емкостные токи, обусловленные распределенными по длине проводов емкостями фаз относительно земли. Если не учитывать токи нагрузки, то напряжения во всех точках сети можно считать одинаковыми, так как емкостные токи малы и можно не учитывать падение напряжения в проводах от этих токов. При этом напряжения фаз относительно земли равны соответствующим фазным напряжениям \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C относительно нейтрали N системы (рисунок 2.1,а), а распределенные емкости фаз в эквивалентной схеме можно заменить сосредоточенными емкостями C_A , C_B , C_C . Место присоединения сосредоточенных емкостей на величину емкостных токов практически не влияет, так как индуктивное и активное сопротивления линии ничтожно малы по сравнению с сопротивлением емкости фаз относительно земли.

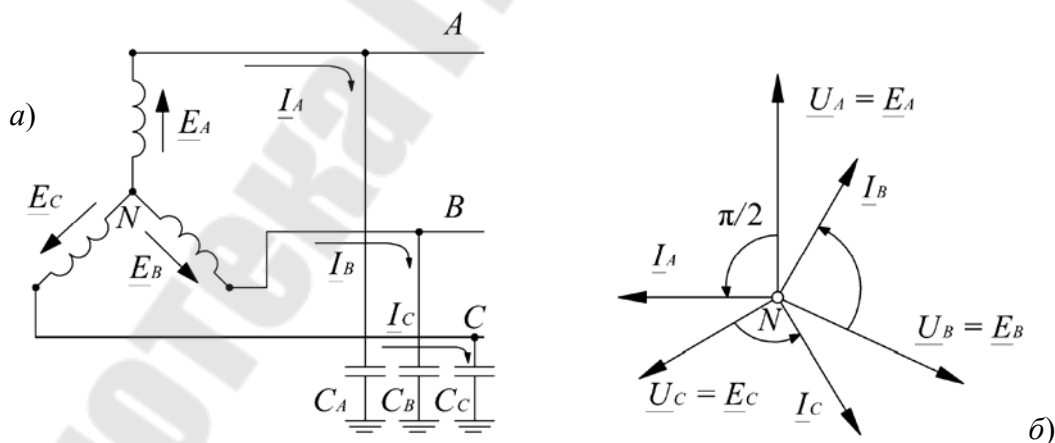


Рисунок 2.1 – Нормальный режим сети с изолированной нейтралью (а) и векторная диаграмма напряжений и токов (б)

Емкости между фазами для простоты не показаны, так как их влияние на ток замыкания незначительно и ими можно пренебречь. Емкостные проводимости элементов электрической системы значи-

тельно превышают их активные проводимости, что позволяет при определении тока в фазах пренебречь активными проводимостями. Пренебрегая падениями напряжений в элементах системы электроснабжения (очень малый емкостной ток), можно считать, что фазные напряжения в любой точке системы электроснабжения равны фазным ЭДС источника питания. В связи с отсутствием падения напряжения в проводах, напряжения \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C равны соответствующим ЭДС источника питания, а их векторы образуют симметричную звезду фазных напряжений (рисунок 2.1,б). В результате напряжение нейтрали N относительно земли равно нулю, а через сосредоточенные емкости проходят токи, опережающие по фазе соответствующие фазные напряжения на углы $\pi/2$ и образующие симметричную систему токов (рисунок 2.1,б), т.е.

$$\underline{I}_A = j\underline{U}_A / X_{c_2} = j\omega C \underline{U}_A; \quad \underline{I}_B = j\omega C \underline{U}_B; \quad \underline{I}_C = j\omega C \underline{U}_C. \quad (2.1)$$

2.2. Режим замыкания на землю одной фазы

При замыкании на землю фазы А в системе с изолированной нейтралью, т. е. при простом замыкании на землю, путь для тока, протекающего в землю, осуществляется через емкостную проводимость неповрежденных фаз В и С относительно земли (рисунок 2.2,а).

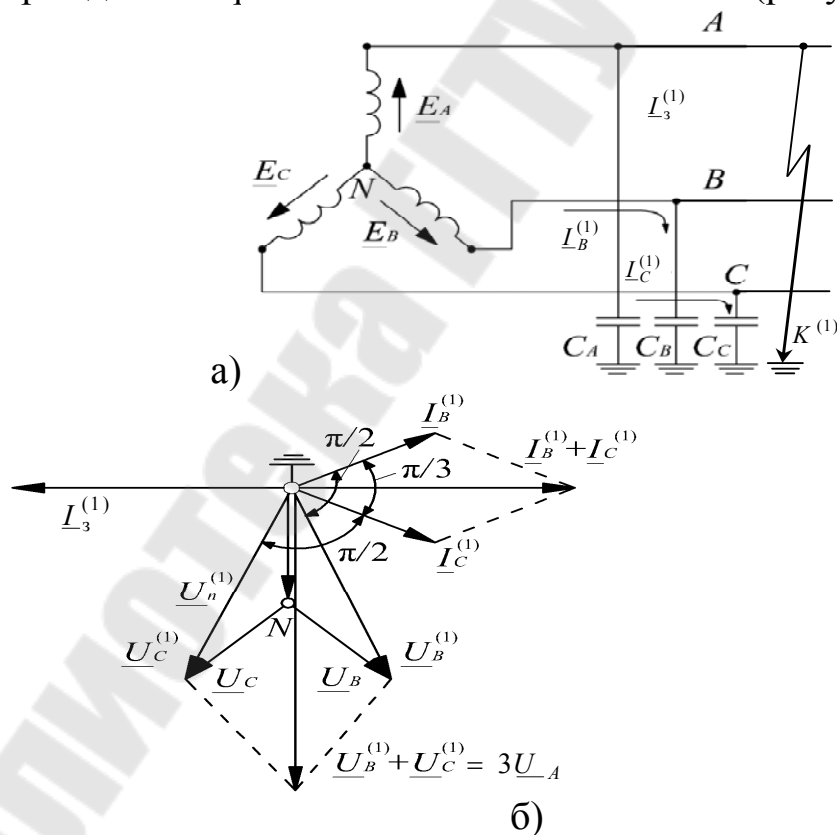


Рисунок 2.2 – Режим замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б)

Проследим путь циркуляции тока замыкания на землю. На рисунке 2.2, а он указан стрелками. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли. При замыкании на землю емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе отсутствует.

При металлическом замыкании на землю ток I_A в емкости поврежденной фазы А отсутствует, так как напряжение поврежденной фазы относительно земли равно нулю. Токи I_B, I_C неповрежденных фаз определяются напряжениями фаз В и С относительно земли:

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &= j\omega C \underline{U}_B = \sqrt{3}\omega C \underline{U}_B e^{j\pi/3}; \\ \underline{I}_C &= j\omega C \underline{U}_C = \sqrt{3}\omega C \underline{U}_C e^{j2\pi/3}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

При условном положительном направлении токов I_B, I_C, I_3 , показанном на рисунке 2.2, б, $I_3 = -(I_B + I_C)$ и с учетом соотношения $\underline{U}_B + \underline{U}_C = -3\underline{U}_A$ имеем

$$I_3 = -(j\omega C \underline{U}_B + j\omega C \underline{U}_C) = j3\omega C \underline{U}_A. \quad (2.3)$$

Полученный ток I_3 опережает по фазе напряжение \underline{U}_A на угол $\pi/2$ и не зависит от расположения точки повреждения. Таким образом, при металлическом замыкании на землю фазы А токи через емкости неповрежденных фаз увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, а ток I_3 , проходящий через место повреждения в землю, равен утроенному значению емкостного тока фазы А при нормальной работе.

Токи I_3, I_B и I_C проходят в соответствующих фазах поврежденной линии на участке между источником питания и местом присоединения конденсаторов схемы (рисунок 2.2, б).

Ток замыкания на землю мал, поэтому при его определении можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным. При этих допущениях, ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением R_d будет:

$$I_3 = 3 \frac{\underline{U}_\phi}{R_d - jX_{c_\Sigma}}, \text{ А}, \quad (2.4)$$

где X_{c_Σ} – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания, Ом; \underline{U}_ϕ – фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю, В.

Наибольшая величина тока замыкания на землю имеет место при металлическом замыкании ($R_d = 0$) и определяется по формуле (2.3).

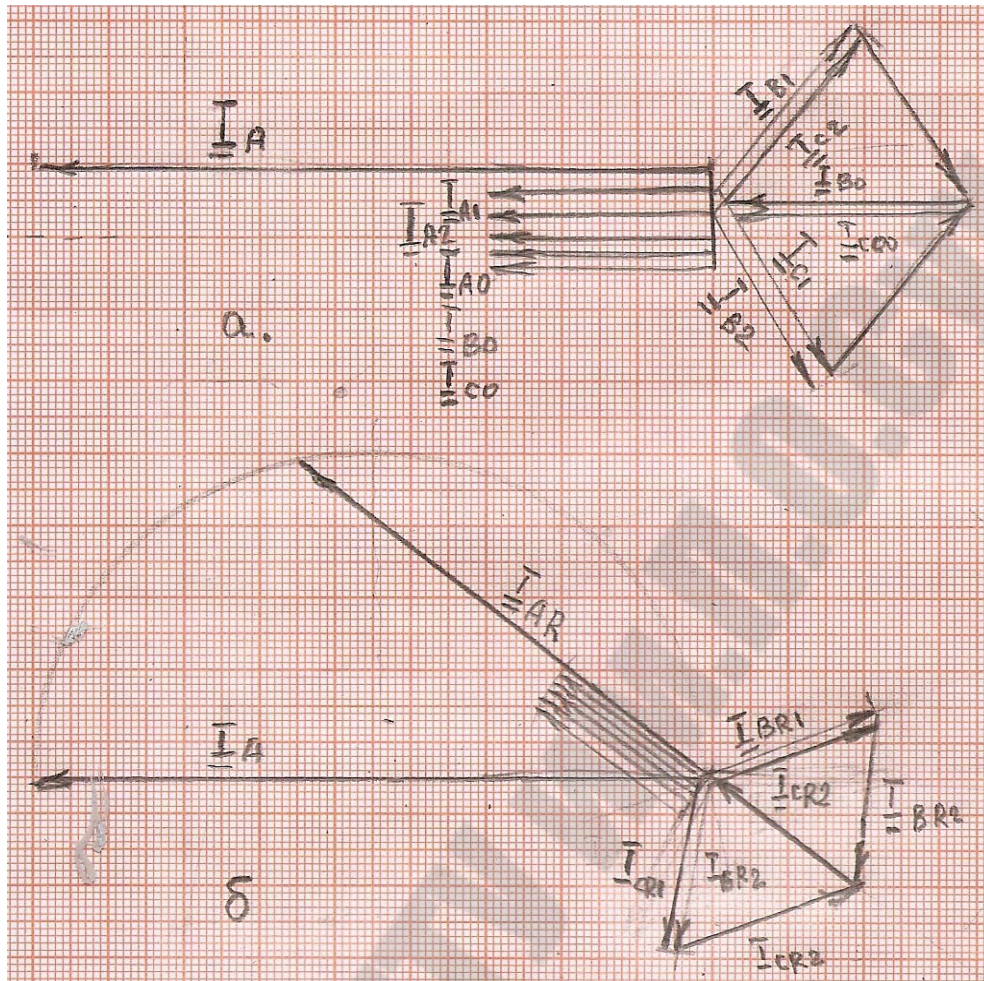


Рисунок 2.3 – Векторная диаграмма токов в месте простого замыкания на землю при замыкании фазы А на землю

Рассмотрим распределение напряжений с применением симметричных составляющих. При металлическом замыкании фазы А на землю напряжения фаз относительно земли изменяются.

Так как междуфазные напряжения остаются неизменными при замыкании какой-либо фазы на землю, то напряжения неповрежденных фаз В и С относительно земли повышаются в $\sqrt{3}$ раз и становятся равными линейному напряжению (рисунок 2.4).

При металлическом замыкании на землю в сети появляется напряжение нулевой последовательности \underline{U}_N которое, как и напряжение смещения нейтрали \underline{U}_H , равно абсолютному значению и противоположно по фазе напряжению, которое имеет поврежденная фаза относительно земли при нормальной работе (напряжению относительно нейтрали системы). Напряжение прямой последовательности равно напряжению фаз относительно земли при нормальной работе. Вследствие этого изменение напряжения фаз при замыкании на землю

можно рассматривать как результат наложения напряжения нулевой последовательности \underline{U}_0 на напряжение фаз сети при ее нормальной работе.

Одновременно с изменением фазных напряжений изменяются и полные фазные токи. Токи неповрежденных фаз замыкаются через точку К и поврежденную фазу, образуя ток \underline{I}_3 (рисунок 2.3, б).

Векторная диаграмма напряжений представлена на рисунке 2.4. При металлическом замыкании на землю ($R_d = 0$) напряжение смещения нейтрали максимально и равно фазному напряжению сети, а напряжения неповрежденных фаз относительно земли симметричны и равны по модулю междуфазному напряжению ($1,73 U_\phi$). По мере увеличения R_d модуль напряжения U_N уменьшается, что соответствует скольжению конца вектора \underline{U}_N на векторной диаграмме по полуокружности, опирающейся на вектор \underline{U}_N при металлическом замыкании на землю. Так как вектор напряжения каждой фазы относительно земли равен сумме векторов соответствующего фазного напряжения и \underline{U}_N , то концы векторов фазных напряжений $\underline{U}_{\phi 3}$ также скользят по полуокружностям, пристроенным к концам векторов исходных фазных напряжений (на рисунке 2.4 пунктиром показано положение векторов при $R_{II} / X_{C\Sigma cети} = 1$).

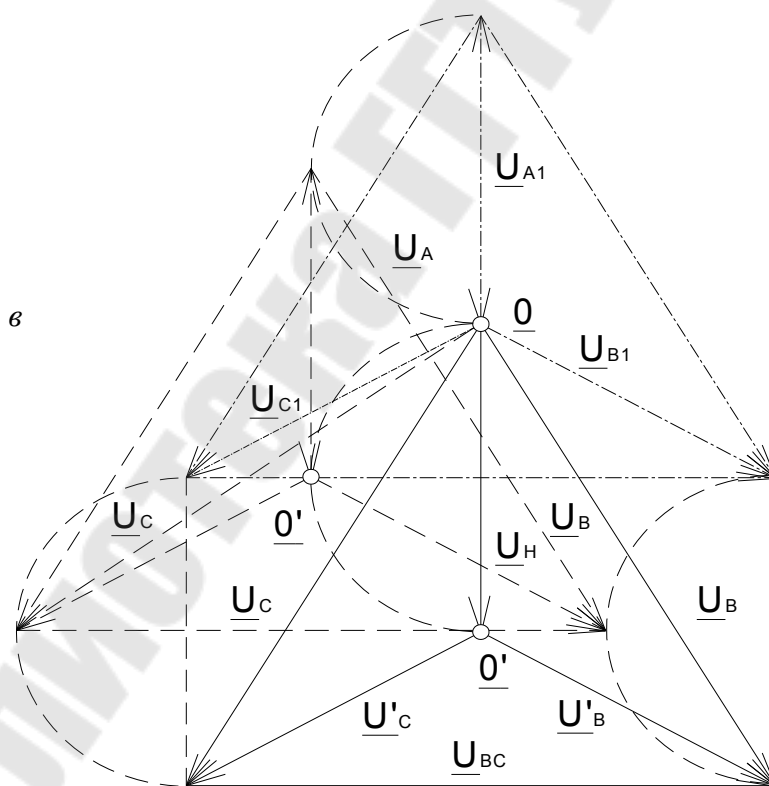


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма напряжений в месте простого замыкания на землю при замыкании фазы А на землю

Векторы фазных напряжений $\underline{U}_{\phi 3}$ получаются несимметричными, а треугольник междуфазных напряжений остается неизменным, так что трехфазные потребители электроэнергии не ощущают этого нарушения нормального состояния питающей сети.

На рисунках 2.3 и 2.4 приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте простого замыкания на землю фазы А. Они построены при указанных допущениях. С изменением сопротивления дуги R_d концы векторов токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей. Значения линейных напряжений остаются без изменений и лишь перемещаются параллельно самим себе. Неизменность линейных напряжений обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при простом замыкании на землю. С уменьшением сопротивления дуги напряжение поврежденной фазы стремится к нулю, а напряжение «здоровых» фаз – к линейным напряжениям.

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 2.5) питается от сети напряжением 3×220 В от системы электроснабжения лаборатории. В стенде смонтированы резистор нагрузки и необходимые для измерений приборы. Вольтметры подключены и измеряют линейные и фазные токи.



Рисунок 2.5 – Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему нормального режима сети в соответствии с вариантом задания (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Варианты заданий

№ бригады	Количество секций ЛЭП	Фаза, замкнутая на землю	Положение реостата Rд
1	1	А	1
2	2	В	2
3	1	С	3
4	2	А	4
5	1	В	5
6	2	С	6
7	1	А	4

2. Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали U_N нормального режима холостого хода ЛЭП. Результаты измерений занести в таблицу 2.2.
3. Измерить в фазах токи нормального режима холостого хода ЛЭП. Измерение токов произвести с помощью токоизмерительных клещей и вольтамперфазометра (ВАФ). При количестве секций ЛЭП равным 2 определить суммарный ток сложением токов, протекающим по соответствующим фазам секций 1 и 2 секций ЛЭП. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.2.
4. По данным измерений в масштабе построить векторную диаграмму напряжений нормального режима.
5. По данным измерений в масштабе построить векторную диаграмму токов нормального режима.
6. Собрать схему рисунка 2.6,а с замыканием на землю фазы через амперметр в соответствии с вариантом задания (таблица 2.1).
7. Измерить линейные и фазные напряжения, напряжение смещения нейтрали U_N . Результаты измерений внести в таблицу 2.2.
8. По данным измерений в том же масштабе на векторной диаграмме, полученной в п. 4, построить векторную диаграмму напряжений режима замыкания на землю фазы из таблицы 2.2.
9. Измерить токи в фазах и ток замыкания на землю по показаниям амперметра РАз1. Результаты измерений внести в таблицу 2.2.
10. По данным измерений в том же масштабе на векторной диаграмме, полученной в п. 5, построить векторную диаграмму напряжений режима замыкания на землю фазы из таблицы 2.2.

11. По измеренному значению тока I_3 , используя метод симметричных составляющих, построить в масштабе векторную диаграмму токов при замыкании на землю (рисунок 2.3).
12. Для заданной фазы произвести замыкание на землю через сопротивление R_d (рисунок 2.6, б). Величина сопротивления R_d должна соответствовать варианту задания (таблица 2.1).
13. Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали. Результаты измерений занести в таблицу 2.2.
14. Измерить токи в фазах и ток замыкания на землю по показаниям амперметра $PA_{з1}$. Результаты измерений внести в таблицу 2.2
15. По данным измерений в том же масштабе на векторной диаграмме, полученной в п. 4, построить векторную диаграмму напряжений режима замыкания на землю фазы через сопротивление R_d из таблицы 2.2.
16. По измеренному значению тока I_3 , используя метод симметричных составляющих, построить в масштабе векторную диаграмму токов при замыкании на землю через сопротивление R_d .

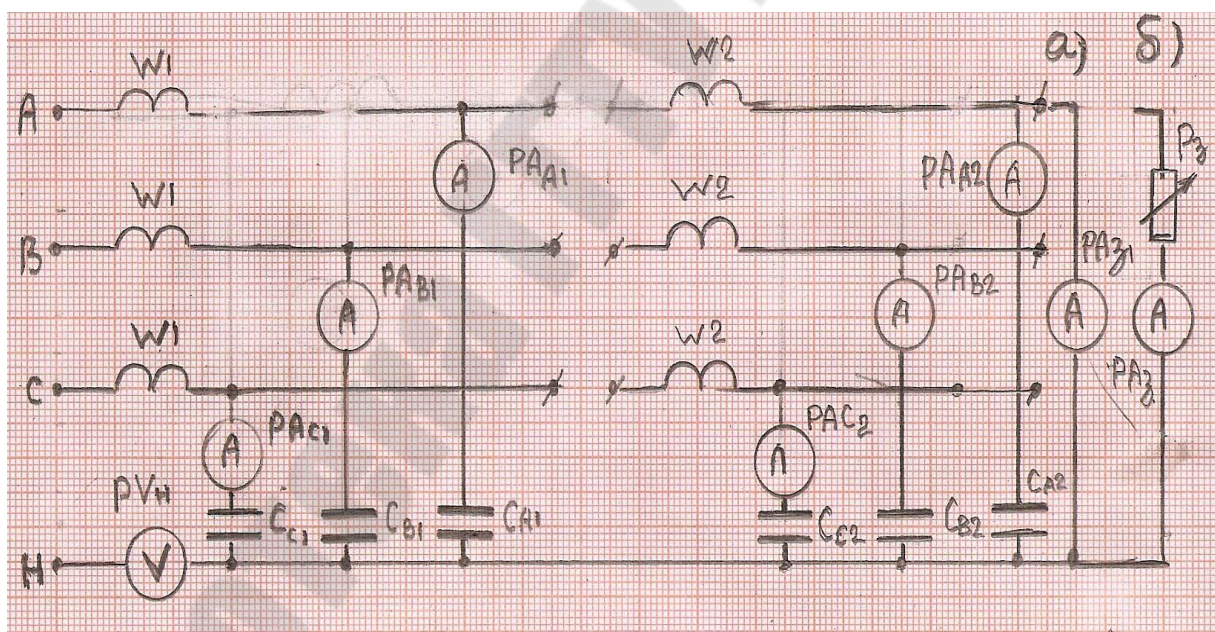


Рисунок 2.6 – Схема замыкания фазы на землю: а – металлическое замыкание на землю; б – замыкание через сопротивление R_3

Таблица 2.2 – Результаты измерений

Режим	Нормальный режим	Режим металлического замыкания фазы на землю	Режим замыкания фазы на землю через сопротивление R_d
U_{AB}, B			
U_{BC}, B			
U_{CA}, B			
U_A, B			
U_B, B			
U_C, B			
U_N, B			
I_3, A			
$IA1, A$			
$IB1, A$			
$IC1, A$			
$IA2, A$			
$IB2, A$			
$IC2, A$			
SIA, A			
SIB, A			
SIC, A			

5. Содержание отчета

1. Название, цель работы и номер бригады.
2. Схема сети с измерительными приборами (рисунок 2.6) в соответствии с вариантом задания (таблица 2.1)
3. Результаты измерений токов, напряжений при нормальном режиме работы сети и при различных повреждениях в табличной форме.
4. Векторные диаграммы напряжений и токов в нормальном режиме работы сети, выполненные по результатам измерений в масштабе.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов при металлическом замыкании одной фазы на землю, выполненные по результатам измерений в масштабе.

6. Векторные диаграммы напряжений и токов при замыкании одной фазы на землю через сопротивление R_d , выполненные по результатам измерений.

6. Контрольные вопросы

1. Сети какого напряжения работают с изолированной нейтралью?
2. Как изменяются линейные и фазные напряжения при замыкании фазы на землю в сети с изолированной нейтралью?
3. Перечислите допущения при анализе простого замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью
4. От каких факторов зависит величина тока замыкания на землю?
5. Каковы пути циркуляции тока простого замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью справа и слева от точки повреждения, если замыкание произошло в середине линии?
6. Чему равно напряжение смещения нейтрали в сети напряжением 10 кВ, если на землю замкнута фаза С?
7. Чему равно напряжение неповрежденных фаз А и В в сети напряжением 10 кВ, если на землю замкнута фаза С?
8. Чему равно напряжение нейтрали системы при простом замыкании на землю через активное сопротивление дуги, равное результирующему емкостному сопротивлению нулевой последовательности, при условии, что всеми остальными сопротивлениями системы можно пренебречь?

Лабораторная работа № 3

ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

1. Цель работы: изучение теории симметричных составляющих и применение ее к анализу двухфазного короткого замыкания (КЗ). Построение векторных диаграмм двухфазного замыкания токов и напряжений по данным измерений и расчетов.

2. Краткая теория

2.1. Общие замечания

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

При несимметрии в произвольной точке сопротивления в фазах неодинаковы и по этим причинам по фазам неодинаковы величины то-

ков, напряжений и углы сдвига между ними. Для определения токов и напряжений в любой фазе несимметричной системы необходимо составить трехфазную схему замещения и написать необходимое число уравнений, что усложняет решение задачи.

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

2.2. Основные соотношения метода симметричных составляющих

Произвольную несимметричную систему трех векторов (токов, напряжений или потоков) \underline{A} ; \underline{B} ; \underline{C} можно разложить однозначно на три симметричные системы:

- систему векторов прямой последовательности \underline{A}_1 ; \underline{B}_1 ; \underline{C}_1 ;
- систему векторов обратной последовательности \underline{A}_2 ; \underline{B}_2 ; \underline{C}_2 ;
- систему векторов нулевой последовательности \underline{A}_0 ; \underline{B}_0 ; \underline{C}_0 .

Согласно условию разложения имеем:

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

Введение оператора фазы a позволяет любой вектор каждой симметричной трехфазной системы выразить через один вектор той же системы.

Для сведения уравнений (3.1) к трем неизвестным вводят оператор фазы a . Модуль оператора фазы a равен 1. Таким образом, если любой вектор умножить на a , то модуль вектора не изменится, а лишь произойдет его поворот на 120° против часовой стрелки.

Оператор фазы a определяется из соотношений:

$$\begin{aligned}a &= e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^3 = e^{j360^\circ} = 1.\end{aligned}$$

Благодаря этому свойству можно векторы каждой из симметричных систем (прямой, обратной, нулевой) выразить через один вектор той же системы, т. е. три неизвестных в каждом уравнении свести к одному.

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

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

Совместное решение уравнений (3.2) дает:

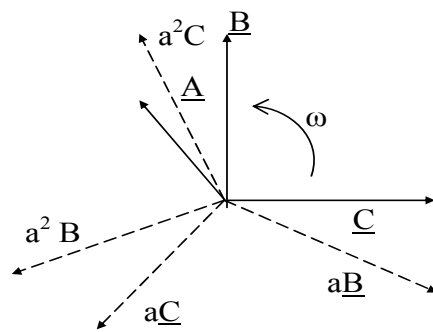
$$\begin{cases} \underline{A}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}).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

На рисунке 3.1 показан пример разложения несимметричной системы на симметричные составляющие.

Системы прямой и обратной последовательности являются симметричными и уравновешенными, а система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной. Система нулевой последовательности может существовать только в неуравновешенных системах, которые характеризуются следующими условиями:

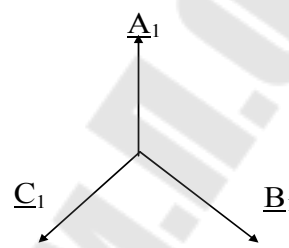
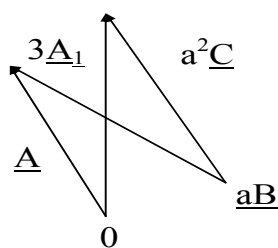
$$\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} \neq 0.\tag{3.4}$$

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

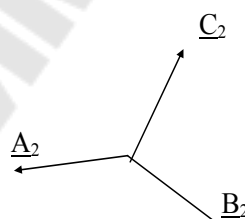
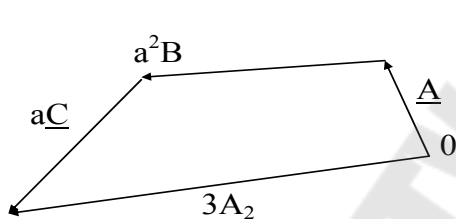


Исходная система

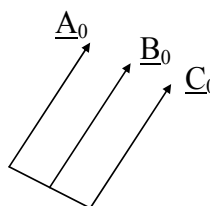
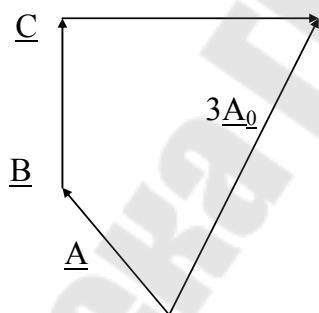
Прямая последовательность $3\underline{A}_1 = \underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}$.



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



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



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

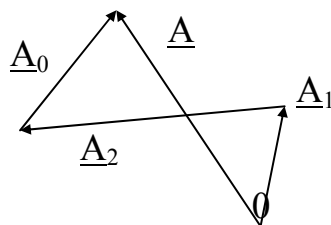


Рисунок 3.1 – Разложение несимметричной системы трех векторов на симметричные составляющие

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

$$\begin{aligned}\underline{U}_{K1} &= \underline{E}_{\Sigma} - Z_{1\Sigma} \underline{I}_{K1}; \\ \underline{U}_{K2} &= 0 - Z_{2\Sigma} \underline{I}_{K2}; \\ \underline{U}_{K0} &= 0 - Z_{0\Sigma} \underline{I}_{K0},\end{aligned}\tag{3.5}$$

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

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

2.2. Порядок расчета токов при несимметричных КЗ

Расчеты несимметричных КЗ проводят с использованием метода симметричных составляющих, согласно которому любая несимметричная трехфазная система напряжений, токов и потоков заменяется тремя симметричными трехфазными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Формулы для определения сопротивлений различных последовательностей элементов СЭС приведены в таблице 2.1.

При расчетах токов и напряжений при несимметричных КЗ необходимо учитывать:

При расчетах токов несимметричных КЗ применяют правило эквивалентности прямой последовательности, на основании которого ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ численно равен току при некотором трехфазном КЗ в точке, удаленной на величину $\Delta X^{(n)}$ от действительной точки КЗ. Следовательно, все методы расчета токов при трехфазных КЗ приемлемы и для определения тока любого несимметричного КЗ.

1. Рассчитываются параметры элементов схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Параметры элементов приводятся к одной ступени трансформации точным или приближенным приведением. Определяются результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки КЗ, а также результирующая ЭДС из схемы замещения прямой последовательности.

2. Величина тока прямой последовательности определяется следующим образом:

- при двухфазном КЗ : $\underline{I}^{(2)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$;
- при однофазном КЗ : $\underline{I}^{(1)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$
- при двухфазном КЗ на землю : $\underline{I}^{(1,1)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j\left(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)}$.

Таблица 2.1 – Сопротивления элементов СЭС

Наименование элемента	Трёхфазное КЗ		Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
	именованные единицы	относительные единицы			
Синхронный генератор	$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	без ДО $X_2 = 1,45 X_d' ; c$ ДО $X_2 = 1,22 X_d''$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$
Кабельная ЛЭП	$X_0 \cdot L$	$X_0 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_L^2}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (3,5 - 4,5) X_1$ $R_0 = 10 R_1$
Токоограничивающий реактор	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{I_6 U_H}{I_H U_6}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Асинхронный двигатель	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 0,9 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_*'' = 0,9$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$
Обобщенная нагрузка	$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E_H'' = 0,8 U_H$	$0,35 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_{H*}'' = 0,8$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется элементами
Двухобмоточный трансформатор	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется соединением обмоток
Синхронный двигатель, компенсатор	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 1,1 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_*'' = 1,1$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = 1,22 X_1$, до-пускается $X_2 = X_1$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$

3. Структура приведенных выражений позволяет ток прямой последовательности особой фазы (A) при любом (n) виде несимметричного КЗ выразить в общем виде:

$$\underline{I}^{(n)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})}, \quad (3.6)$$

где $\Delta X^{(n)}$ – дополнительная реактивность, величина которой для каждого вида КЗ определяется только значениями $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$.

4. Кроме того, абсолютная величина полного тока поврежденных фаз в месте КЗ пропорциональна току прямой последовательности, что позволяет записать общее выражение

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{KA1}^{(n)}, \quad (3.7)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ.

Таблица 2.2

Определяемая величина	Виды КЗ		
	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
Токи в месте КЗ			
а) прямой последовательности в фазе A \underline{I}_{KA1}	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2)$	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2 + X_0)$	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2 \parallel X_0)$
б) обратной последовательности в фазе A \underline{I}_{KA2}	$-\underline{I}_{KA1}$	\underline{I}_{KA1}	$-\underline{I}_{KA1} X_0 / (X_0 + X_2)$
в) нулевой последовательности \underline{I}_{KA0}	0	\underline{I}_{KA1}	$\underline{I}_{KA1} X_2 / (X_0 + X_2)$
Полный ток КЗ			
а) в фазе A \underline{I}_{KA}	0	$3\underline{I}_{KA1}$	0
б) в фазе B \underline{I}_{KB}	$-j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}$	0	$\underline{I}_{KA1} ((a^2 - (X_2 + aX_0) / (X_2 + X_0))$
в) в фазе C \underline{I}_{KC}	$j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}$	0	$\underline{I}_{KA1} ((a - (X_2 + a^2 X_0) / (X_2 + X_0))$
Напряжения в месте КЗ			
а) прямой последовательности \underline{U}_{KA1}	$j\underline{I}_{KA1} X_2$	$-j\underline{I}_{KA1} (X_2 + X_0)$	$j\underline{I}_{KA1} X_2 \parallel X_0$
б) обратной последовательности \underline{U}_{KA2}	$j\underline{I}_{KA1} X_2$	$-j\underline{I}_{KA1} X_2$	$j\underline{I}_{KA1} X_2 \parallel X_0$
в) нулевой последовательности \underline{U}_{KA0}	0	$-j\underline{I}_{KA1} X_0$	$j\underline{I}_{KA1} X_2 \parallel X_0$
г) фазы A \underline{U}_{KA}	$2j\underline{I}_{KA1} X_2$	0	$3j\underline{I}_{KA1} X_2 \parallel X_0$
д) фазы B \underline{U}_{KB}	$-j\underline{I}_{KA1} X_2$	$\underline{I}_{KA1} j[(a^2 - a) X_2 + (a^2 - 1) X_0]$	0
е) фазы C \underline{U}_{KC}	$-j\underline{I}_{KA1} X_2$	$\underline{I}_{KA1} j[(a - a^2) + X_2 + (a - 1) X_0]$	0

Окончание табл. 2.2

Определяемая величина	Виды КЗ		
	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
Дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$	$X_{2\Sigma}$	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	$X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma}$
Коэффициент $m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

5. Значения $\Delta X^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для различных видов КЗ приведены в таблице 2.2.

Таким образом, для конкретного вида КЗ определяется ток прямой последовательности по выражению (2.8), а затем определяется полный ток в поврежденных фазах в месте КЗ по выражению (2.9) или выражениям таблицы 2.2.

Обращаясь к полученным выражениям для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ (таблица 2.2), замечаем, что токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

2.3. Основные соотношения токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании ($K^{(2)}$)

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

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

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

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

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

$$\underline{I}_{KA} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} = 0. \quad (3.8)$$

где \underline{I}_{KA1} и \underline{I}_{KA2} токи прямой и обратной последовательности при $K^{(2)}$,

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

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

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

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

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

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

$$(\underline{U}_{KA1} - \underline{U}_{KA2})(a^2 - a) = 0, \text{ откуда } \underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2}. \quad (3.11)$$

Фазные напряжения в месте КЗ:

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

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

Построим векторные диаграммы токов (рисунок 3.2,б) и напряжений (рисунок 3.2,в), используя полученные выражения (3.9) и (3.11). При графическом определении токов прямой и обратной последовательности необходимо использовать (3.3) для $K^{(2)}$:

$$\begin{cases} \underline{A}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}). \end{cases} \quad \begin{cases} \underline{I}_{A1} = \frac{1}{3} \cdot (a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C); \\ \underline{I}_{A2} = \frac{1}{3} \cdot (a^2 \cdot \underline{I}_B + a \cdot \underline{I}_C); \end{cases} \quad (3.14)$$

Построение векторной диаграммы токов произвести в следующей последовательности:

- Задавшись масштабом, измеренные значения токов $K^{(2)}$ \underline{I}_B и \underline{I}_C нанести на карту селективности, учитывая соотношение (3.7,а),
- Воспользовавшись (3.14), определить величину и направление векторов, входящих в это выражение в скобках,
- Воспользовавшись (3.14), произвести геометрическое суммирование определить величину и направление векторов $3\underline{I}_{A1}$ и $3\underline{I}_{A2}$,
- Определить величину и направление векторов \underline{I}_{A1} и \underline{I}_{A2} ,
- Зная величину и направление векторов \underline{I}_{A1} и \underline{I}_{A2} построить звезды токов прямой и обратной последовательности фаз В и С.
- Воспользовавшись найденными значениями \underline{I}_{B1} и \underline{I}_{B2} , а также \underline{I}_{C1} и \underline{I}_{C2} по (3.8), находим токи \underline{I}_B и \underline{I}_C , равными исходным, т.е. измеренным.

Построение векторной диаграммы напряжений произвести в следующей последовательности:

- Задавшись масштабом, измеренные значения напряжений $K^{(2)}$ \underline{U}_{KA} и $\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC}$ нанести на карту селективности, учитывая соотношение (3.13),
- Определить величину и направление векторов \underline{U}_{KA1} и \underline{U}_{KA2}
- Зная величину и направление векторов \underline{U}_{KA1} и \underline{U}_{KA2} построить звезды напряжений прямой и обратной последовательности фаз В и С.

- Воспользовавшись найденными значениями \underline{U}_{KB1} и \underline{U}_{KB2} , а также \underline{U}_{KC1} и \underline{U}_{KC2} по (3.12 и 3.13), находим напряжения \underline{U}_{KA} , \underline{U}_{KB} и \underline{U}_{KC} , равными исходным, т.е. измеренным.

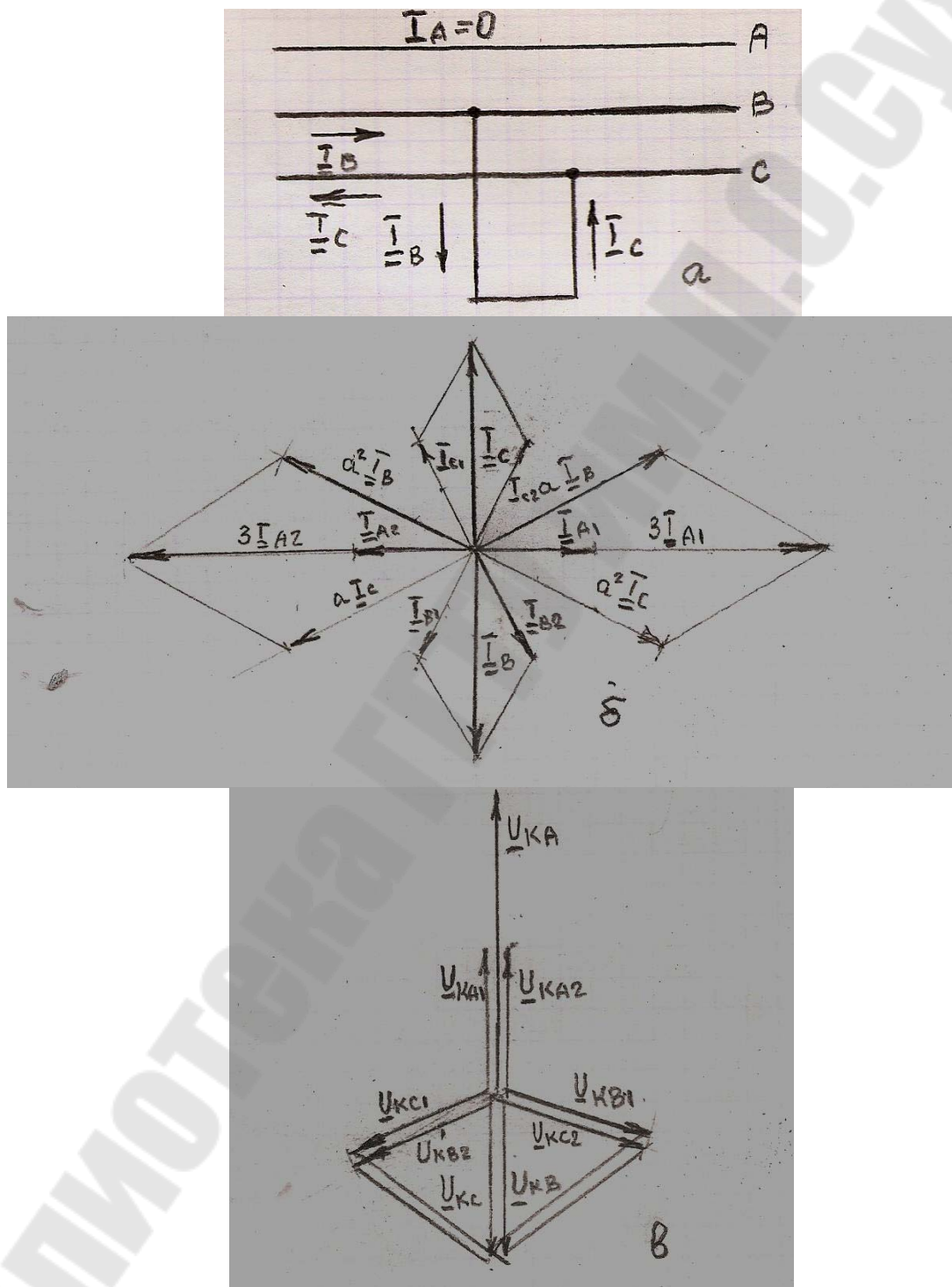


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б) и напряжений (в) при двухфазном КЗ

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 3.3) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3×220 В. Подключение стенда к сети осуществляется трехфазной вилкой. На стенде смонтированы кнопки включения и отключения стенда, сигнальные лампы включенного и отключенного положения стенда, а также необходимые приборы для измерений.

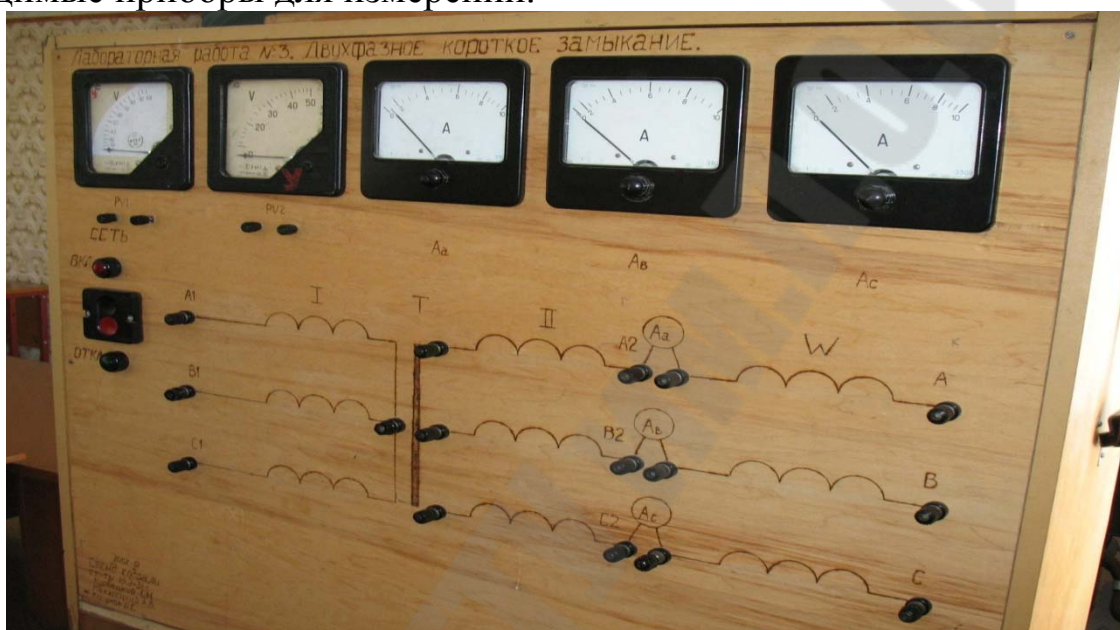


Рисунок 3.3 – Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными положениями теории симметричных составляющих и ее применением для анализа двухфазного КЗ.
2. Собрать схему, показанную на рисунке 3.4.

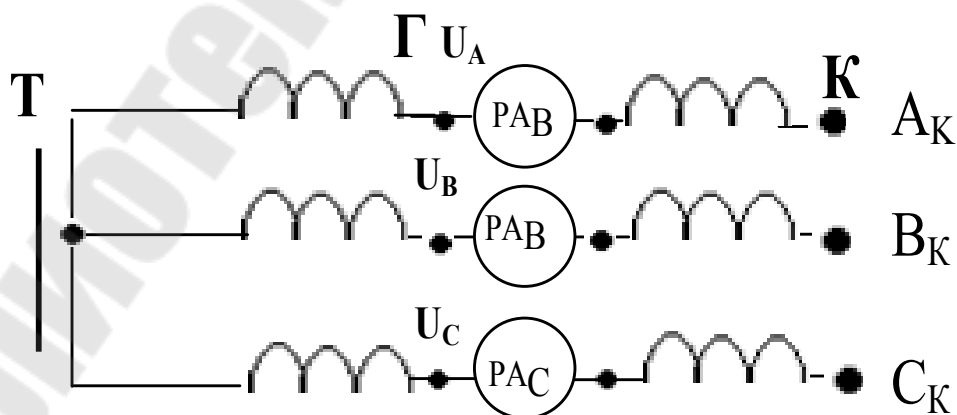


Рисунок 3.4 – Схема для измерения параметров двухфазного КЗ

3. При двухфазном КЗ ($A_k - B_k$ – для нечетных номеров бригад или $A_k - C_k$ – для четных номеров бригад) измерить ток в фазах А, В, С. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.
4. При двухфазном КЗ измерить линейные и фазные напряжения в точке К. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

По результатам измерений токов вычислить токи прямой и обратной последовательностей. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.1.

По результатам измерения напряжений вычислить фазные напряжения прямой и обратной последовательностей в точке К. Результаты вычислений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений и вычислений

К.З, между фазами	Измеренные величины								
	Фазные токи			Линейные напряжения			Фазные напряжения		
				Точка К					
	I _a , А	I _b , А	I _c , А	U _{ав} В	U _{вс} В	U _{са} В	U _{ка} В	U _{кв} В	U _{кс} В
А _к – В _к (нечетн. бригада) А _к – С _к (четн. бриг)									
Токи			Напряжения			Линейные напряжения			
Прямой послед I ₁ , А	Обратной посл. I ₂ , А	Прямой послед U ₁ , В	Обратной посл. U ₂ , В	U _{ав,в}		U _{са,в}			

5. В масштабе построить векторную диаграмму токов в соответствии с рекомендациями п. 2.3, используя вычисленные данные таблицы 3.1.
6. В масштабе построить векторные диаграммы напряжений по данным вычислений таблицы 3.1 для точки К в соответствии с рекомендациями п. 2.3 по данным измерений таблицы 3.1.
7. Из построенной векторной диаграммы найти линейные напряжения $U_{ав}$, $U_{вс}$, $U_{са}$ и занести их значения в таблицу 3.1.

5. Пример расчета 3.1. Определить сверхпереходный и ударный токи в месте двухфазного КЗ в точке $K^{(2)}$ для схемы рисунке 3.5,а. По результатам вычислений построить векторные диаграммы токов и напряжений для двухфазного КЗ. Расчет токов КЗ произвести без учета активных сопротивлений элементов системы электроснабжения. При решении примера расчета 3.1 использовать технические данные, приведенные в таблице 3.2, где номер варианта соответствует номеру бригады.

Питающая система G $S_{kc G}^{(3)} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $X_{1*} = 0,125$; $X_{2*} = 0,21$

Трансформатор Т $S_T = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $U_K = 5,5\%$; 10/04 кВ.

Решение произведем в именованных единицах.

- Составим схемы замещения прямой и обратной последовательностей (рисунки 3.5,б,в):

- Схема замещения прямой последовательности (рисунок 3.5, б) повторяет схему для расчета трехфазного КЗ, но содержит источник U_{K1} .

- Схема замещения обратной последовательности (рисунок 3.5, в) отличается от схемы замещения прямой последовательности отсутствием в ней ЭДС генерирующих ветвей.

- Определим параметры схемы замещения прямой и обратной последовательностей

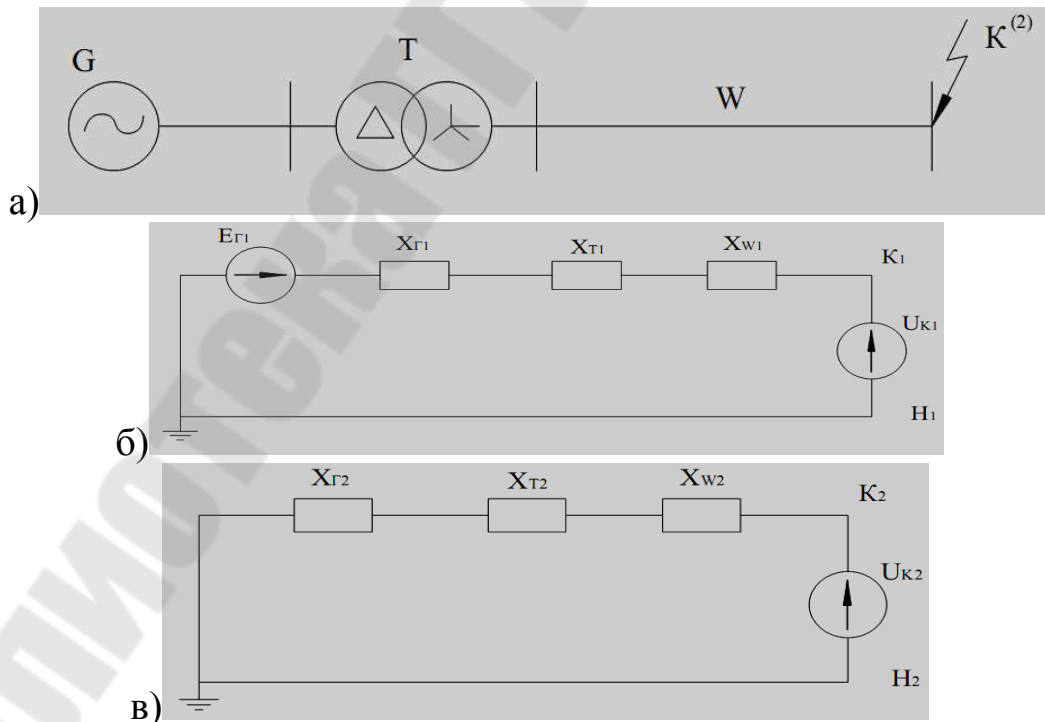


Рисунок 3.5 – Расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б) и обратной (в) последовательности к примеру.

- Прямая последовательность

$$X_{C1} = X_{1*} \cdot \frac{U^2}{S_{ксG}^{(3)}} = 0,125 \frac{0,4^2}{10} = 0,002 \text{ Ом}$$

$$X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_T} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{2,5} = 0,00352 \text{ Ом}$$

$$X_{Л1} = X_0 L = 0,25 \cdot 0,1 = 0,025 \text{ Ом}$$

-Суммарное сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = X_{C1*} + X_{T1*} + X_{Л1*} = 0,002 + 0,00352 + 0,025 = 0,03052 \text{ Ом}.$$

-Обратная последовательность

$$X_{C2} = X_{2*} \cdot \frac{U^2}{S_{ксG}^{(3)}} = 0,21 \frac{0,4^2}{10} = 0,00336 \text{ Ом}; \quad X_{T2*} = X_{T1*} = 0,00352 \text{ Ом};$$

$$X_{Л2*} = X_{Л1*} = 0,025 \text{ Ом},$$

-Суммарное сопротивление обратной последовательности

$$X_{2\Sigma} = X_{C2} + X_{T2} + X_{Л2} = 0,00336 + 0,00352 + 0,025 = 0,03188 \text{ Ом}.$$

-Определим ток прямой последовательности в именованных единицах

$$I_{1ПО}^{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3}(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})} = \frac{0,4}{\sqrt{3}(0,03052 + 0,03188)} = \frac{0,4}{\sqrt{30,0624}} = 3,69 \text{ кА}.$$

-Определим ток, протекающий в поврежденных фазах

$$I_{ПО}^{(2)} = I_{1ПО}^{(2)} \cdot \sqrt{3} = 3,69 \cdot 1,73 = 6,4 \text{ кА}.$$

-Определим ударный ток КЗ $i_{y\delta}^{(2)} = 2,55 I_{ПО}^{(2)} = 2,55 \cdot 6,4 = 16,35 \text{ кА}$

Построим векторные диаграммы токов и напряжений (рисунок 3.2) для двухфазного КЗ.

1. Векторная диаграмма токов

-Токи прямой последовательности $I_{ПО1}^{(2)} = 3,69 \text{ кА}$.

-Токи в поврежденных фазах $I_{ПО}^{(2)} = 6,40 \text{ кА}$

2. Векторная диаграмма напряжений:

-Из граничных условий имеем, что напряжение прямой и обратной последовательностей фазы А в месте КЗ будут равны

$U_{КА2}^{(2)} = U_{КА1}^{(2)} = jX_{2\Sigma} I_{ПО1}^{(2)} = 1,99 \cdot 0,256 \cdot 230 = 115 \text{ В}$, а фазные напряжения в месте КЗ равны

$$U_{КА}^{(2)} = U_{КА1}^{(2)} + U_{КА2}^{(2)} = 2U_{КА1}^{(2)} = 2jX_{2\Sigma} I_{ПО1}^{(2)} = 2j \cdot 0,03188 \cdot 3,69 = j230 \text{ В},$$

$$\underline{U}_{КВ}^{(2)} = \underline{U}_{КС}^{(2)} = -\underline{U}_{КА1}^{(2)} = -\underline{U}_{КА}^{(2)} / 2 = 115 \text{ В}.$$

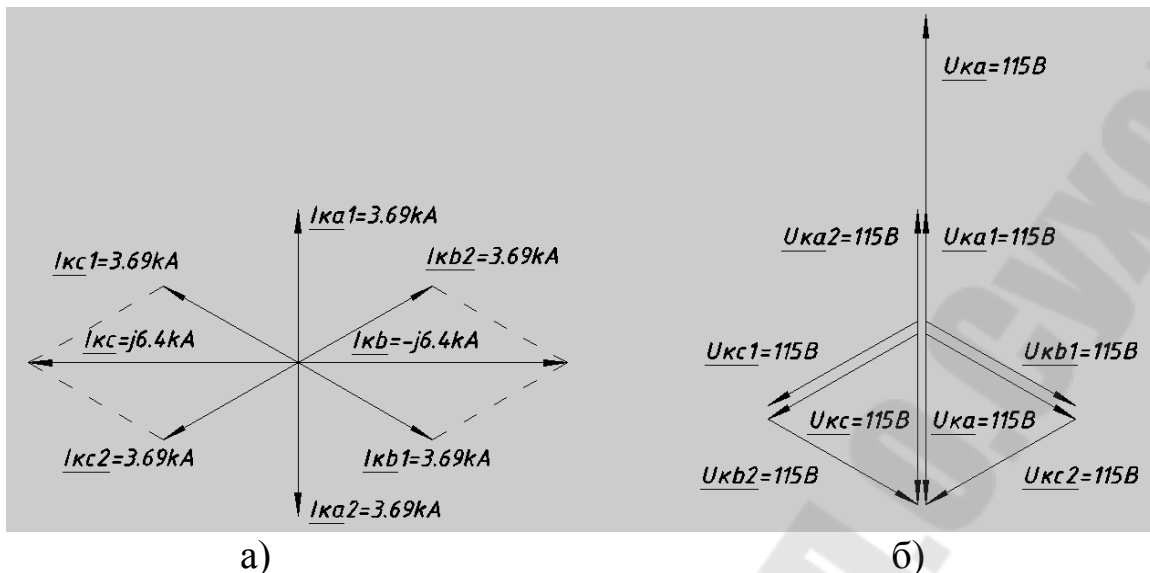


Рисунок 3.6. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) при двухфазном КЗ к примеру 3.1.

5. Содержание отчета

Название, цель работы.

1. Исходная схема с указанием граничных условий двухфазного КЗ.
2. Таблица измеренных и вычисленных величин.
3. Векторные диаграммы тока и напряжения, построенные в масштабе.
4. Решение задачи 3.1 с параметрами СЭС, приведенными в таблице 3.2. Номер варианта соответствует номеру бригады.
5. Выводы из анализа двухфазного КЗ.

6. Контрольные вопросы

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

Таблица 3.2 – Технические данные к задаче 3.1

Номер бригады	Параметры системы			Линия Длина, км	Трансформатор		
	Мощность КЗ системы, МВА	Сопротивление прямой последоват. Хс1, О.Е.	Сопротивление обратной последоват. Хс2, О.Е.		Напряжение, кВ	Мощность, кВА	Напряжение КЗ, %
1	10	0.12	0.2	10	10\0.4	2500	4
2	9	0.2	0.3		10\0.4	1600	5
3	8	0.1	0.2	15	10\0.4	1000	6
4	7	0.11	0.21	12	10\0.4	630	7
5	6	0.12	0.15	9	6\0.4	1250	8
6	5	0.13	0.21	8	6\0.4	400	5.5
7	4	0.14	0.25	7	6\0.4	250	5
8	3	0.15	0.22	10	6\0.4	630	4.5

Лабораторная работа № 4

ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

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

2. Краткие теоретические сведения

2.1. Основные соотношения метода симметричных составляющих

Произвольную несимметричную систему трех векторов (токов, напряжений или потоков) \underline{A} ; \underline{B} ; \underline{C} можно разложить однозначно на три симметричные системы:

- систему векторов прямой последовательности \underline{A}_1 ; \underline{B}_1 ; \underline{C}_1 ;
- систему векторов обратной последовательности \underline{A}_2 ; \underline{B}_2 ; \underline{C}_2 ;
- систему векторов нулевой последовательности \underline{A}_0 ; \underline{B}_0 ; \underline{C}_0 .

Согласно условию разложения имеем:

$$\begin{aligned}
 \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\
 \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0; \\
 \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Введение оператора фазы a позволяет любой вектор каждой симметричной трехфазной системы выразить через один вектор той же системы.

Если принять в качестве основной фазу A , то систему (4.1) при помощи оператора a можно представить в следующем виде:

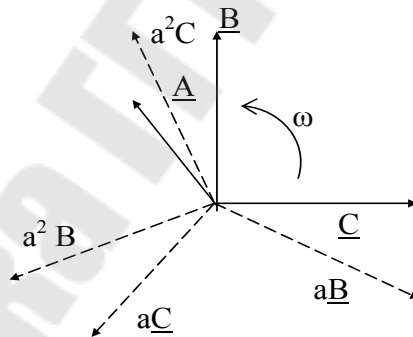
$$\begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= a^2 \cdot \underline{A}_1 + a \cdot \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{C} &= a \cdot \underline{A}_1 + a^2 \cdot \underline{A}_2 + \underline{A}_0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Совместное решение уравнений (4.2) дает:

$$\begin{cases} \underline{A}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}). \end{cases} \quad (4.3)$$

На рисунке 4.1 показан пример разложения несимметричной системы на симметричные составляющие.

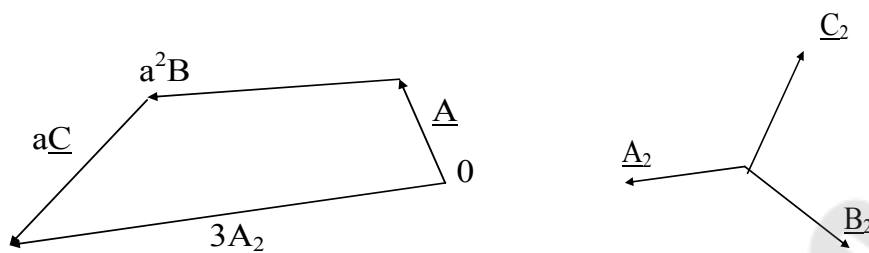
Исходная система векторов \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} .



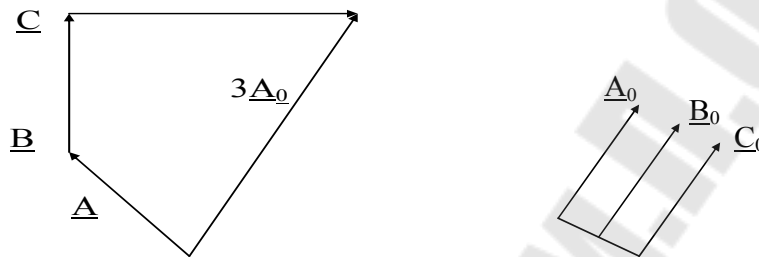
Прямая последовательность $3\underline{A}_1 = \underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}$.



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



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



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

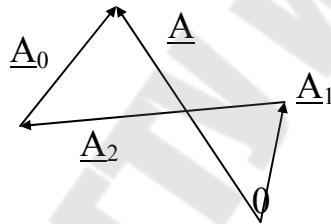


Рисунок 4.1 – Разложение несимметричной системы трех векторов на симметричные составляющие

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

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

$$\begin{aligned} \underline{U}_{K1} &= \underline{E}_\Sigma - Z_{1\Sigma} \underline{I}_{K1}; \\ \underline{U}_{K2} &= 0 - Z_{2\Sigma} \underline{I}_{K2}; \\ \underline{U}_{K0} &= 0 - Z_{0\Sigma} \underline{I}_{K0}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $\underline{U}_{K1}, \underline{U}_{K2}, \underline{U}_{K0}, \underline{I}_{K1}, \underline{I}_{K2}, \underline{I}_{K0}$ – симметричные составляющие напряжений и токов; \underline{E}_Σ – результирующая ЭДС; $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ – результирующие сопро-

тивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

Уравнения (4.4) содержат шесть неизвестных величин: три составляющих напряжения и три составляющих тока. Недостающие уравнения для определения этих величин получают из граничных условий, которыми характеризуются тот или иной вид несимметричного КЗ.

2.2. Порядок расчета токов при несимметричных КЗ

Расчеты несимметричных КЗ проводят с использованием метода симметричных составляющих, согласно которому любая несимметричная трехфазная система напряжений, токов и потоков заменяется тремя симметричными трехфазными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Формулы для определения сопротивлений различных последовательностей элементов СЭС приведены в таблице 4.1.

При расчетах токов и напряжений при несимметричных КЗ необходимо учитывать:

1. При расчетах токов несимметричных КЗ применяют правило эквивалентности прямой последовательности, на основании которого ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ численно равен току при некотором трехфазном КЗ в точке, удаленной на величину $\Delta X^{(n)}$ от действительной точки КЗ. Следовательно, все методы расчета токов при трехфазных КЗ приемлемы и для определения тока любого несимметричного КЗ.

2. Рассчитываются параметры элементов схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Параметры элементов приводятся к одной ступени трансформации точным или приближенным приведением. Определяются результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки КЗ, а также результирующая ЭДС из схемы замещения прямой последовательности.

3. Величина тока прямой последовательности определяется следующим образом:

- при двухфазном КЗ :

$$\underline{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})};$$

- при однофазном КЗ :

$$\underline{I}_{KA1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})};$$

Таблица 4.1 – Сопротивление элементов СЭС

Наименование элемента	Трехфазное КЗ		Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
	именованные единицы	относительные единицы			
Синхронный генератор	$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	без ДО $X_2 = 1,45 X_d'$; с ДО $X_2 = 1,22 X_d''$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$
Кабельная ЛЭП	$X_0 \cdot L$	$X_0 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_{Л}^2}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (3,5 - 4,5) X_1$ $R_0 = 10 R_1$
Токоограничивающий реактор	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{I_6 U_H}{I_H U_6}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Асинхронный двигатель	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 0,9 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_*'' = 0,9$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$
Обобщенная нагрузка	$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E_H'' = 0,8 U_H$	$0,35 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_{H*}'' = 0,8$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется элементами
Двухобмоточный трансформатор	$\frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется соединением обмоток
Синхронный двигатель, компенсатор	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 1,1 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_*'' = 1,1$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = 1,22 X_1$, до- пускается $X_2 = X_1$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$

4. Структура приведенных выражений позволяет ток прямой последовательности особой фазы (A) при любом (n) виде несимметричного КЗ выразить в общем виде:

$$\underline{I}^{(n)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})}, \quad (4.5)$$

где $\Delta X^{(n)}$ – дополнительная реактивность, величина которой для каждого вида КЗ определяется только значениями $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$.

5. Кроме того, абсолютная величина полного тока поврежденных фаз в месте КЗ пропорциональна току прямой последовательности, что позволяет записать общее выражение

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{KA1}^{(n)}, \quad (4.6)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ.

Таблица 4.2

Определяемая величина	Виды КЗ		
	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
Токи в месте КЗ а) прямой последовательности в фазе А I_{KA1} б) обратной последовательности в фазе А I_{KA2} в) нулевой последовательности I_{KA0}	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2)$ $-\underline{I}_{KA1}$ 0	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2 + X_0)$ I_{KA1} I_{KA1}	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2 \parallel X_0)$ $-\underline{I}_{KA1} X_0 / (X_0 + X_2)$ $I_{KA1} X_2 / (X_0 + X_2)$
Полный ток КЗ а) в фазе А I_{KA} б) в фазе В I_{KB} в) в фазе С I_{KC}	0 $-j\sqrt{3}I_{KA1}$ $j\sqrt{3}I_{KA1}$	$3I_{KA1}$ 0 0	0 $I_{KA1} ((a^2 - (X_2 + aX_0) / (X_2 + X_0))$ $I_{KA1} ((a - (X_2 + a^2 X_0) / (X_2 + X_0))$
Напряжения в месте КЗ а) прямой последовательности \underline{U}_{KA1} б) обратной последовательности \underline{U}_{KA2} в) нулевой последовательности \underline{U}_{KA0} г) фазы А \underline{U}_{KA} д) фазы В \underline{U}_{KB} е) фазы С \underline{U}_{KC}	$jI_{KA1} X_2$ $jI_{KA1} X_2$ 0 $2jI_{KA1} X_2$ $-jI_{KA1} X_2$ $-jI_{KA1} X_2$	$-jI_{KA1} (X_2 + X_0)$ $-jI_{KA1} X_2$ $-jI_{KA1} X_0$ 0 $I_{KA1} j[(a^2 - a) X_2 + (a^2 - 1) X_0]$ $I_{KA1} j[(a - a^2) + X_2 + (a - 1) X_0]$	$jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$ $jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$ $jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$ $3jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$ 0 0
Дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$	$X_{2\Sigma}$	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	$X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma}$
Коэффициент $m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

Значения $\Delta X^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для различных видов КЗ приведены в таблице 4.2.

Таким образом, для конкретного вида КЗ определяется ток прямой последовательности по выражению (4.5), а затем определяется пол-

ный ток в поврежденных фазах в месте КЗ по выражению (4.6) или выражениям таблицы 4.2.

Обращаясь к полученным выражениям для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ (таблица 4.2), замечаем, что токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

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

$$\begin{aligned}\underline{U}_{KA1} &= E_{\Sigma} - j\underline{I}_{KA1} \cdot X_{1\Sigma}; \\ \underline{U}_{KA2} &= 0 - j\underline{I}_{KA2} \cdot X_{2\Sigma}; \\ \underline{U}_{KA0} &= 0 - j\underline{I}_{KA0} \cdot X_{0\Sigma},\end{aligned}\tag{4.7}$$

где \underline{U}_{KA1} , \underline{U}_{KA2} , \underline{U}_{KA0} , \underline{I}_{KA1} , \underline{I}_{KA2} , \underline{I}_{KA0} – напряжения и токи отдельных последовательностей; $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ – результирующие сопротивления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При КЗ на землю фазы А (рисунок 4.2, а) в сети с глухозаземлённой нейтралью граничными условиями будут:

$$\underline{I}_{KB} = 0; \quad \underline{I}_{KC} = 0; \quad \underline{U}_{KA} = 0.\tag{4.8}$$

Симметричные составляющие токов в фазе А будут:

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

с учетом граничных условий (4.8): $\underline{I}_{KA} = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA}$;

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

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

Т.е. ток в поврежденной фазе и через землю состоит из равных по величине и совпадающих по фазе составляющих:

$$\underline{I}_{KA} = 3\underline{I}_{KA1} \cdot \underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA0} = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA}.\tag{4.9}$$

Напряжение поврежденной фазы А:

$$\underline{U}_{KA} = \underline{U}_{KA1} + \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = 0.$$

(4.10)

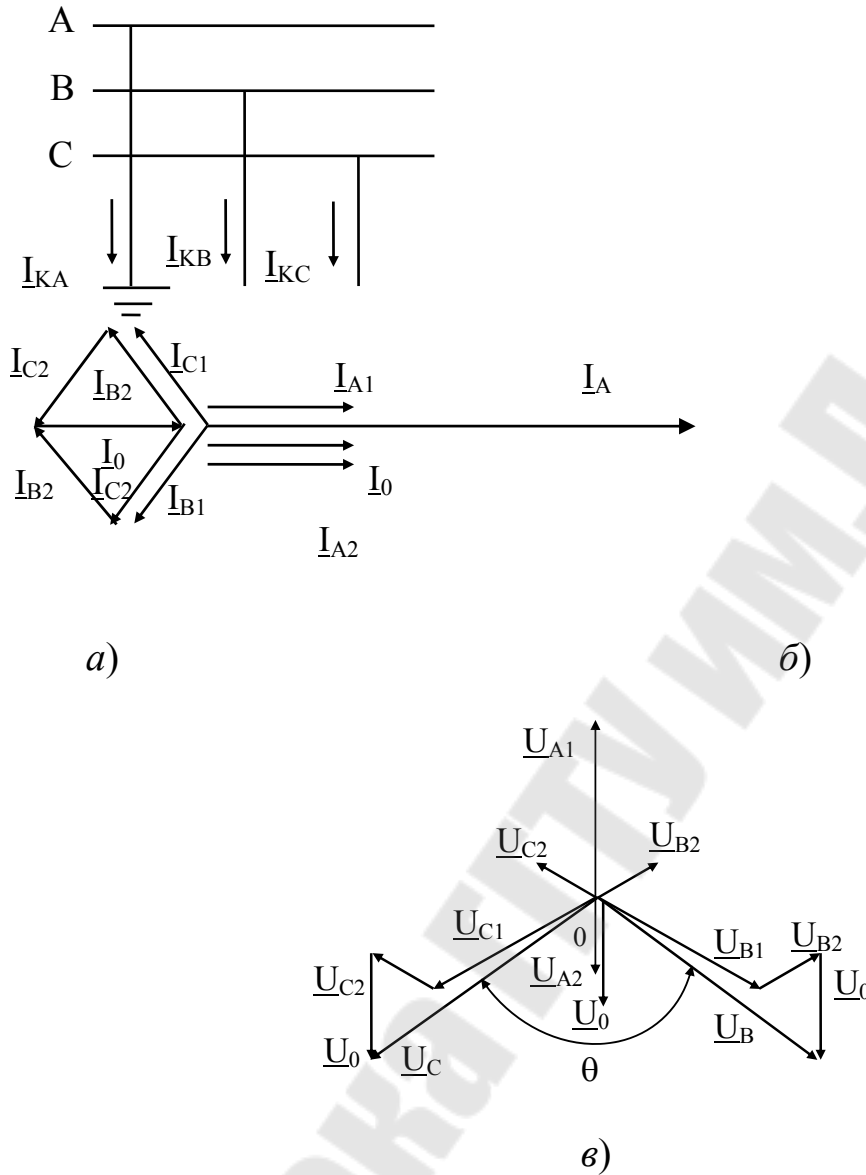


Рисунок 4.2. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б), напряжений (в) однофазного КЗ

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{K1} &= -(\underline{U}_{KA2} - \underline{U}_{K0}) = -j(X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma})\underline{I}_{KA1}; \\ \underline{U}_{KA2} &= -jX_{2\Sigma}\underline{I}_{KA2} = -jX_{2\Sigma}\underline{I}_{KA1}; \\ \underline{U}_{K0} &= -jX_{0\Sigma}\underline{I}_{K0} = -jX_{0T}\underline{I}_{KA1}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Фазные напряжения в месте короткого замыкания:

$$\underline{U}_{KB} = a^2 \underline{U}_{KA1} + a \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = j[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma}] \underline{I}_{KA1} \quad (4.12)$$

$$\underline{U}_{KC} = j[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma}] \underline{I}_{KA1}.$$

Выражения (4.9) и (4.10) позволяют построить векторные диаграммы токов (рисунок 4.2,б) и напряжений (рисунок 4.2,в).

На векторной диаграмме напряжений (рисунок 4.2,в) угол θ между напряжениями неповрежденных фаз зависит от соотношения между X_{2c} и X_{0c} и изменяется в пределах $60^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$. Нижний предел соответствует $X_{0c} = \infty$, верхний при $X_{0c} = 0$. При $X_{0c} = X_{2c}$ угол θ равен 120° .

3. Описание лабораторного стенда.

Лабораторный стенд (рисунок.4.3) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3×220 В. Подключение стенда к сети осуществляется трехфазной вилкой. На стенде смонтированы кнопки включения и отключения стенда, сигнальные лампы включенного и отключенного положения стенда, а также необходимые приборы для измерений и ФНОП – фильтр напряжений обратной последовательности, ФННП – фильтр напряжений нулевой последовательности.

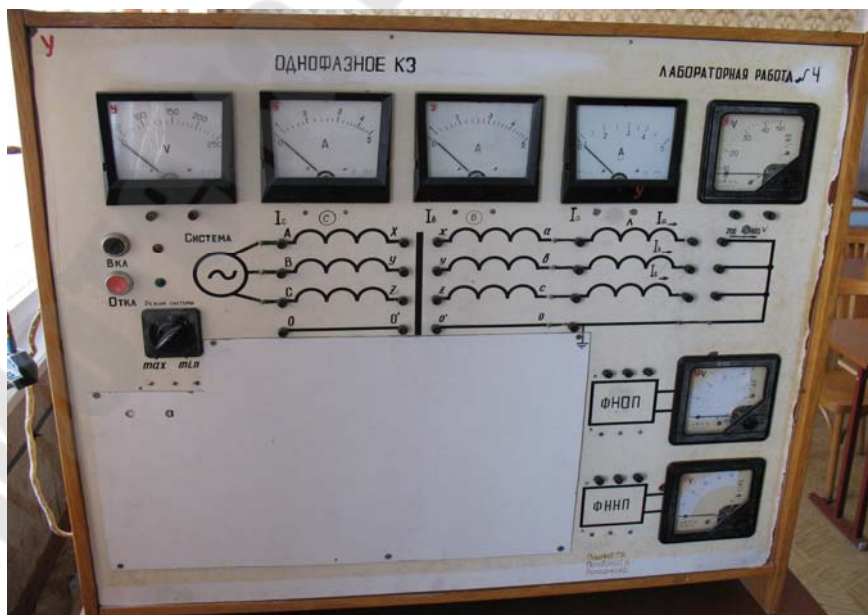


Рисунок 4. 3. Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теорией симметричных составляющих (п. 2.1),
2. Изучить получение с помощью теории симметричных составляющих основных соотношений между токами и напряжениями и их симметричными составляющими при однофазном КЗ в сети с глухозаземленной нейтралью. (п. 2.2 и п. 2.2)
3. Собрать схему испытаний на стенде, приведенную на рисунке 4.4. В таблице 4.3 указаны положение ключа П1 режима работы питающей системы для производства измерений и фаза, на которой производится КЗ. (Номер варианта задания соответствует номеру бригады)

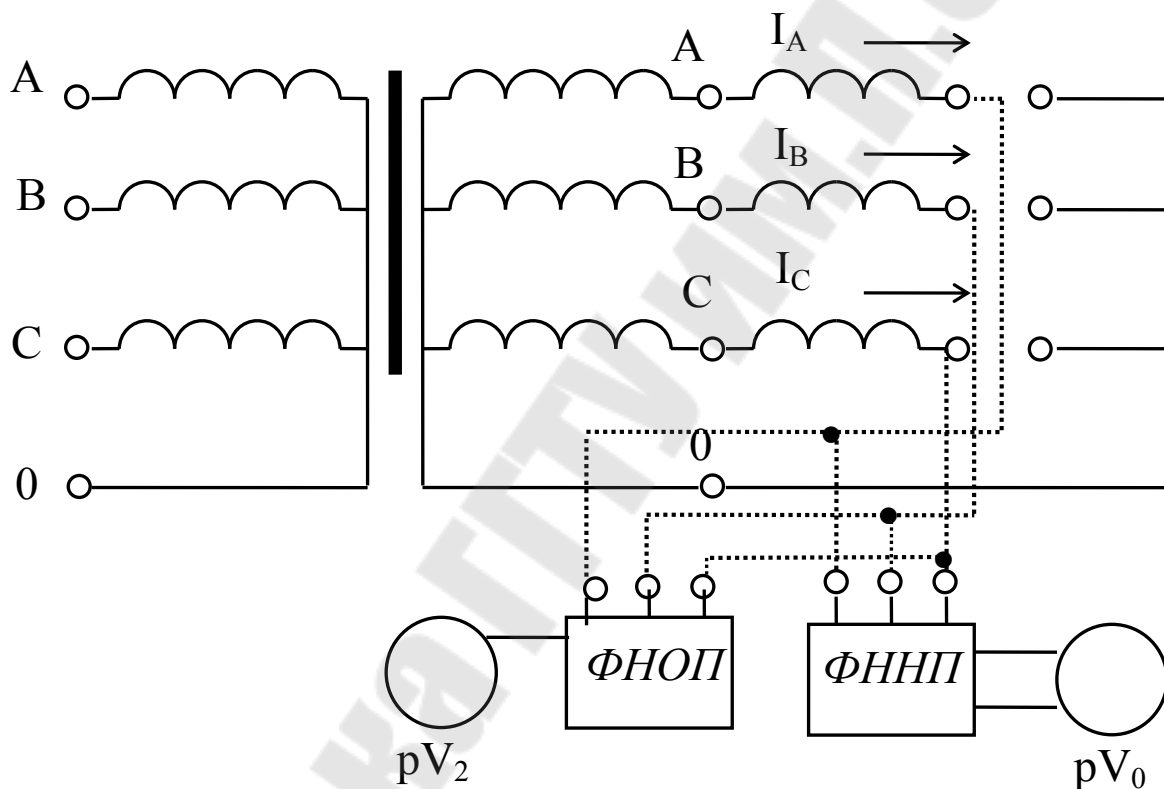


Рисунок 4.4 – Схема для определения параметров однофазного КЗ. ФНОП – фильтр напряжений обратной последовательности, ФННП – фильтр напряжений нулевой последовательности.

4. Включить стенд и произвести измерения токов в фазах. Результаты измерений занести в таблицу 4.4.
5. Вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, протекающие в точке КЗ на основании теории симметричных составляющих. Результаты вычислений занести в таблицу 4.4.

6. Построить в масштабе по результатам измерений и вычислений векторную диаграмму токов, аналогичную приведенной на рисунке 4.2,б.
7. В схему (рисунок 4.4) подключить фильтры напряжений обратной ФНОП и нулевой (ФННП) последовательности. Подключение фильтров показано на рисунке 4.4 пунктиром.

Таблица 4.3 – Варианты заданий

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

Таблица 4.4 – Результаты измерений и вычислений

КЗ фазы	Измерено			Вычислено					
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_1, A	I_2, A	I_0, A			
				Формула Результат	Формула Результат	Формула Результат			
КЗ фазы	Измеренные величины							Вычислено	
	U_A, B	U_B, B	U_C, B	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	U_2, B	U_0, B	U_1, B

8. Включить стенд и измерить в точке КЗ величины фазных и линейных напряжений, а также напряжения обратной последовательности U_2 и нулевой последовательности U_0 на выходе фильтров. Результаты измерений занести в таблицу 4.4.

9. В масштабе по результатам измерений и вычислений построить векторную диаграмму напряжений, аналогичную изображенной на рисунке 4.2,в.

5. Пример расчета 4.1. Определить сверхпереходный и ударный токи в месте однофазного КЗ в точке К⁽¹⁾ для схемы рисунке 4.5, а. По результатам вычислений построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для однофазного КЗ. Расчет токов КЗ произвести без учета активных сопротивлений элементов системы электроснабжения. При решении примера расчета 4.1 использовать технические данные, приведенные в таблице 4.5, где номер варианта соответствует номеру бригады.

Питающая система G $S_{кв\ G}^{(3)} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $X_{1*} = 0,125$; $X_{2*} = 0,21$

Трансформатор Т $S_T = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $U_K = 5,5\%$; 10/04 кВ.

Решение произведем в именованных единицах.

- Составим схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рисунки 4.5, б, в, г).

- Определим параметры схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

- Прямая последовательность

- Схема замещения прямой последовательности (рисунок 4.5, б) повторяет схему для расчета трехфазного КЗ, но содержит источник $U_{к1}$.

$$X_{C1} = X_{1*} \cdot \frac{U^2}{S_{кв\ G}^{(3)}} = 0,125 \frac{0,4^2}{10} = 0,002 \text{ Ом};$$

$$X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_T} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{2,5} = 0,00352 \text{ Ом};$$

$$X_{Л1} = X_0 L = 0,25 \cdot 0,1 = 0,025 \text{ Ом}.$$

- Суммарное сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = X_{C1*} + X_{T1*} + X_{Л1*} = 0,002 + 0,00352 + 0,025 = 0,03052 \text{ Ом}.$$

- Схема замещения обратной последовательности (рисунок 4.5, в) отличается от схемы замещения прямой последовательности отсутствием в ней ЭДС генерирующих ветвей.

- Обратная последовательность

$$X_{C2} = X_{2*} \cdot \frac{U^2}{S_{кв\ G}^{(3)}} = 0,21 \frac{0,4^2}{10} = 0,00336 \text{ Ом};; \quad X_{T2*} = X_{T1*} = 0,00352 \text{ Ом};;$$

$$X_{Л2*} = X_{Л1*} = 0,025 \text{ Ом}.,$$

- Суммарное сопротивление обратной последовательности

$$X_{2C} = X_{C2} + X_{T2} + X_{Л2} = 0,00336 + 0,00352 + 0,025 = 0,03188 \text{ Ом.}$$

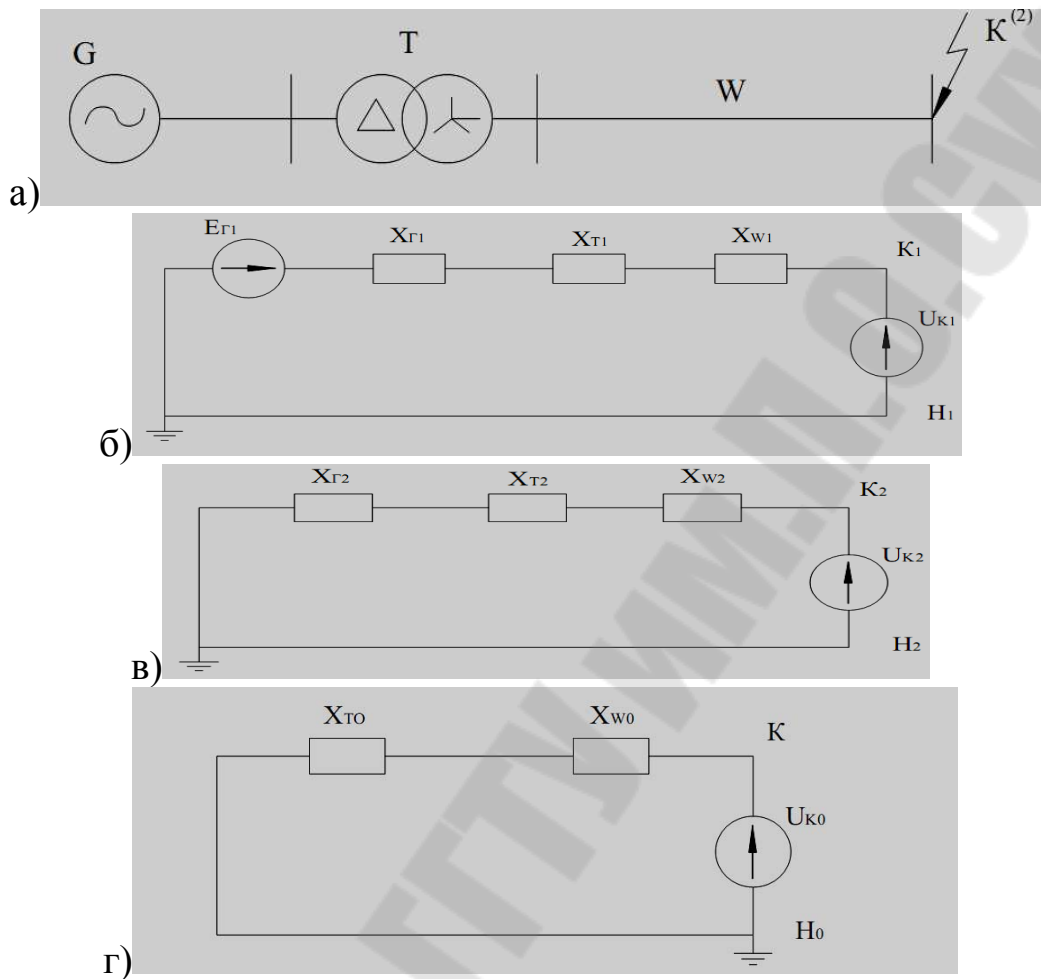


Рисунок 4.5 – Расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательности к примеру.

- Составление схемы замещения нулевой последовательности (рисунок 4.5,г) начинают от точки K считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение нулевой последовательности U_{K0} . Под действием напряжения U_{K0} через элементы, соединенные в звезду с заземленной нейтралью и имеющие электрическую связь с точкой $K3$, будут протекать токи нулевой последовательности. Поэтому в схему замещения включаются лишь линия (одноцепная) и трансформатор. Генератор из схемы замещения исключается, так как токи нулевой последовательности не выходят за треугольник трансформатора T .

- Определяем параметры схемы замещения нулевой последовательности

$$X_{T0} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_T} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{2,5} = 0,00352 \text{ Ом}$$

$$X_{Л0} = X_0 L = 3,5 \cdot 0,25 \cdot 0,1 = 0,0875 \text{ Ом (одноцепная линия без тр-сов)}$$

- Суммарное сопротивление нулевой последовательности

$$X_{0\Sigma} = X_{T0} + X_{Л0} = 0,00352 + 0,0875 = 0,09102 \text{ Ом}$$

- Ток трехфазного КЗ будет

$$I_{\Pi 0}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} X_{1\Sigma}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,03052} = 7,57 \text{ кА}$$

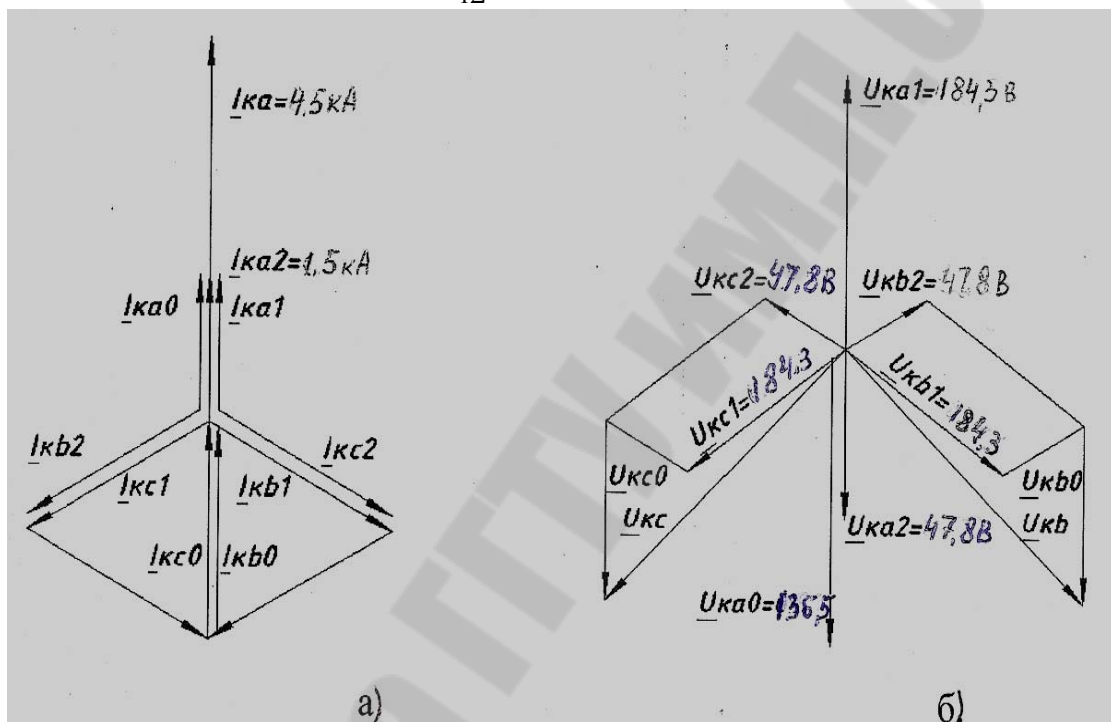


Рисунок 4.6 – Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) при однофазном КЗ к примеру 4.1.

– Определяем ток прямой последовательности при однофазном КЗ

$$I_{\Pi 0}^{(1)} = \frac{U}{\sqrt{3}(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} = \frac{0,4}{\sqrt{3}(0,03052 + 0,03188 + 0,09102)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,1534} = 1,5 \text{ кА}$$

– Определяем ток, протекающий в поврежденной фазе

$$I_{\Pi 0}^{(1)} = I_{1\Pi 0}^{(1)} \cdot 3 = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ кА}$$

Построим векторные диаграммы токов и напряжений для однофазного КЗ

1. Векторная диаграмма токов (рисунок 4.6, а).

- Ток прямой последовательности в именованных единицах

$$I_{\text{П01}}^{(1)} = 1,5 \text{ кА}$$

- Ток в поврежденной фазе А в именованных единицах

$$I_{\text{П0}}^{(1)} = 4,5 \text{ кА.}$$

2. Векторная диаграмма напряжений (рисунок 4.6, б).

- Симметричные составляющие напряжений в месте КЗ

$$\underline{U}_{K0} = -jX_{0\Sigma} I_{\text{П0A1}} = -0,09102 \cdot 1500 = -136,5 \text{ jВ,}$$

$$\underline{U}_{K2} = -jX_{2\Sigma} I_{\text{П0A1}} = -0,03188 \cdot 1500 = -47,8 \text{ jВ,}$$

$$\underline{U}_{KA1} = (\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0}) = j(136,5 + 47,8) = j184,3 \text{ В}$$

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Принципиальная схема и граничные условия однофазного КЗ.
3. Схема для определения параметров однофазного КЗ.
4. Результаты измерений и вычислений в табличной форме.
5. Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные в масштабе на основе измерений.
6. Решение задачи 3.1 с параметрами СЭС, приведенными в таблице 4.2. Номер варианта соответствует номеру бригады.
7. Выводы из анализа однофазного КЗ.

6. Контрольные вопросы

1. Поясните физический смысл оператора фазы a .
2. Как разложить графически несимметричную трехфазную систему векторов на симметричные составляющие?
3. Когда в системе электроснабжения появляется нулевая последовательность токов?
4. Когда в системе электроснабжения появляется обратная последовательность токов и напряжений?
5. Может ли продолжать работу система электроснабжения при двухфазном КЗ?
6. При каком режиме работы нейтрали могут возникать однофазные КЗ?
7. Каковы граничные условия однофазного КЗ?
8. Из каких составляющих состоит ток при однофазном КЗ?
9. Какие измерения необходимо выполнить, чтобы определить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей?
10. Как вычислить напряжение при однофазном КЗ прямой, обратной и нулевой последовательностей?

11. Как построить векторную диаграмму токов однофазного КЗ?
12. Как построить векторную диаграмму напряжений при однофазном КЗ?

Таблица 4.5 – Технические данные к задаче 4.1

Номер бригады	Параметры системы			Линия	Трансформатор		
	Мощность КЗ системы, МВА	Сопротивление прямой последоват. Хс1, О.Е.	Сопротивление обратной последоват. Хс2, О.Е.		Длина, км	Напряжение, кВ	Мощность, кВА
1	10	0,12	0,2	10	10\0,4	2500	4
2	9	0,2	0,3		10\0,4	1600	5
3	8	0,1	0,2	15	10\0,4	1000	6
4	7	0,11	0,21	12	10\0,4	630	7
5	6	0,12	0,15	9	6\0,4	1250	8
6	5	0,13	0,21	8	6\0,4	400	5,5
7	4	0,14	0,25	7	6\0,4	250	5
8	3	0,15	0,22	10	6\0,4	630	4,5

Лабораторная работа № 5

Измерение электрических величин и снятие векторных диаграмм в системе электроснабжения с помощью вольтамперфазометра

1. Цель работы. Приобретение практических навыков по измерению напряжений, токов, углов сдвига фаз и снятию векторных диаграмм с помощью вольтамперфазометра ВАФ-ПАРМА (ВАФ) в трехфазной системе электроснабжения.

2. Краткая теория

2.1. Назначение вольтамперфазометра ВАФ-Парма-А и его технические характеристики

ВАФ обеспечивает измерение параметров электрической энергии в диапазонах и с погрешностями, соответствующими приведенным в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Измеряемый параметр	Ед. изм.	Диапазон измерения
Напряжение постоянного тока	В	от 0 до 460
Действующее значение напряжения переменного тока	В	от 0 до 460
Действующее значение силы переменного тока	А	от 0 до 10
Частота измеряемого напряжения, тока	Гц	от 45 до 65
Угол сдвига фаз между напряжением и напряжением	градус	от - 180 до +180
Угол сдвига фаз между напряжением и током	градус	от - 180 до +180
Активная мощность	Вт	от 0 до 4600
Реактивная мощность	Вар	от 0 до 4600

где $U_k(I_k)$ – конечное значение диапазона измерения напряжения (силы тока), $U_k(I_k)$ – измеренное значение напряжения (силы тока).

Питание ВАФ осуществляется от сети переменного тока частотой в диапазоне от 45 до 52 Гц напряжением (220±44).

2.3. Расположение органов настройки. Порядок работы

ВАФ является переносным полностью автоматизированным электронным измерительным прибором, состоящим из измерительного блока и токоизмерительных клещей.

Внешний вид измерительного блока приведен на рисунке 5.1.

На передней панели расположены:

- (5) – выключатель питания прибора;
- (6) – кнопка включения подсветки дисплея;
- (7) – сдвоенная клемма $U_{\text{опорн}}$ – черная клемма – "нейтраль" для присоединения нейтрального провода сигнала опорного напряжения, красная клемма – "фаза" – для присоединения сигнала опорного напряжения, а при определении порядка чередования фаз для подключения напряжения фазы "А";

- (8) – одиночная клемма "В" для присоединения сигнала напряжения фазы "В" при определении порядка чередования фаз;
- (9) – сдвоенная клемма $U_{\text{измер}}$ – красная клемма, обозначенная на лицевой панели ВАФ знаком "-" предназначена для присоединения положительного потенциала источника постоянного тока при измерении постоянного тока, при измерении напряжения переменного тока – фазы сигнала измерительного напряжения, а при определении порядка чередования фаз для подключения напряжения фазы "А". Черная клемма – нейтраль, для подключения напряжения измерительного канала;

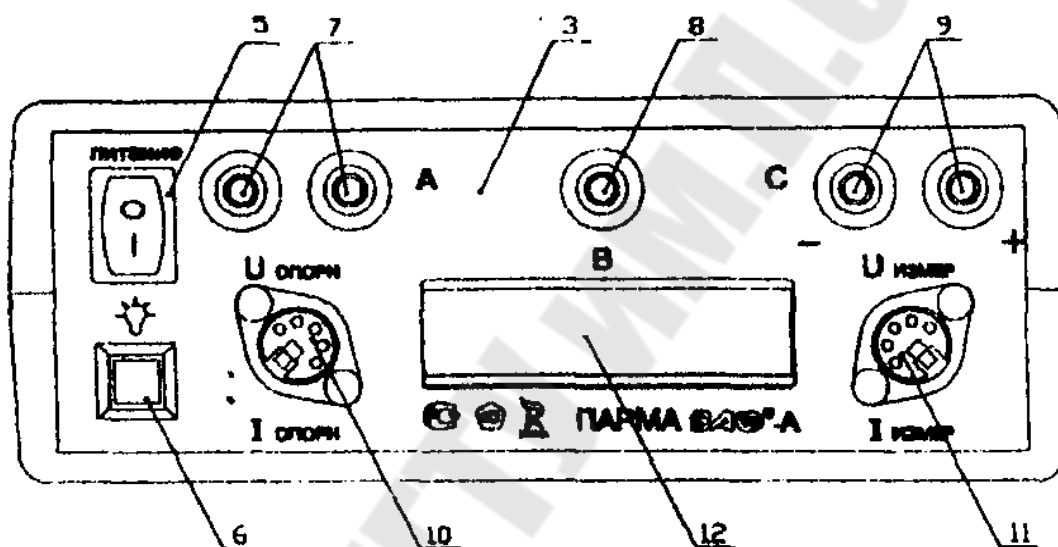


Рисунок 5.1 – Внешний вид измерительного блока

- (10) – гнездо для подключения разъема опорных клещей (отсутствуют);
- (11) – гнездо $I_{\text{измер}}$ для подключения разъема измерительных клещей.
- (12) – дисплей.

ВАФ не имеет переключателей режимов работы и диапазонов измерений. Все переключения производятся автоматически на основании оценки поступающих сигналов.

Для начала работы необходимо включить питание ВАФ. При включении питания ВАФ производит идентификацию. В течение 3 с на дисплее индицируются заводские номера, как показано на рисунке 2.2. В верхней строке индицируется заводской номер прибора, в нижней строке справа – заводской номер измерительных клещей, слева – заводской номер опорных клещей (отсутствуют).

При работе в условиях слабой освещенности предусмотрена подсветка дисплея. Для включения подсветки кратковременно нажмите кнопку на передней панели со знаком \otimes , включится подсветка дисплея. Время до выключения составляет не менее 10с.

Зав N 00001
N 00001 N 00002

Рисунок 5.2

3. Порядок проведения измерений

3.1. Для измерения действующего значения переменного тока и его частоты необходимо использовать токоизмерительные клещи.

Измерительные клещи подключаются к разъему измерительного канала, обозначенного $I_{\text{измер}}$, как показано на рисунке 5.3.

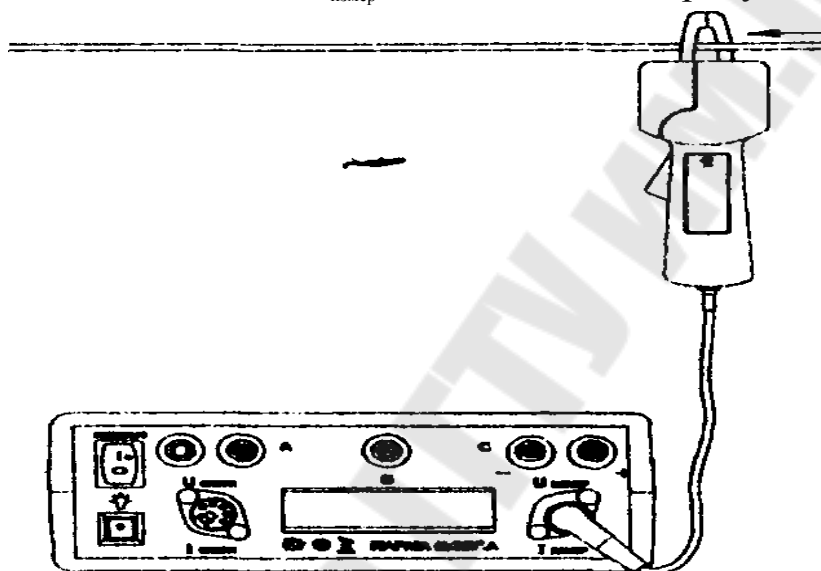


Рисунок 5.3

Обхватите клещами измерительного канала токопровод таким образом, чтобы знак "*" расположенный на корпусе клещей, указывал направление к источнику тока, контактные поверхности магнитопровода были надежно сомкнуты, а токопровод находился, по возможности, посередине окна магнитопровода.

На дисплее в нижней строке справа индицируется измеренное действующее значение переменного тока, имеющее размерность мА или А; в нижней строке слева – измеренное значение частоты переменного тока, имеющее размерность H_z ; в верхней строке справа – измеренное действующее значение напряжения переменного тока, имеющее размерность мV или V.

Считайте измеренное действующее значение переменного тока, расположенное на дисплее внизу справа и его частоту – внизу слева.

3.2. Для измерения действующего значения напряжения переменного тока и его частоты необходимо подать напряжение переменного тока на клеммы измерительного канала, обозначенные $U_{\text{измер}}$, как показано на рисунке 2.4.

На дисплее в верхней строке справа индицируется измеренное действующее значение напряжения переменного тока, имеющее размерность мV или V; в нижней строке справа – измеренное действующее значение силы переменного тока, имеющее размерность mA или A; в верхней строке слева – измеренное значение частоты переменного тока, имеющее размерность H_z .

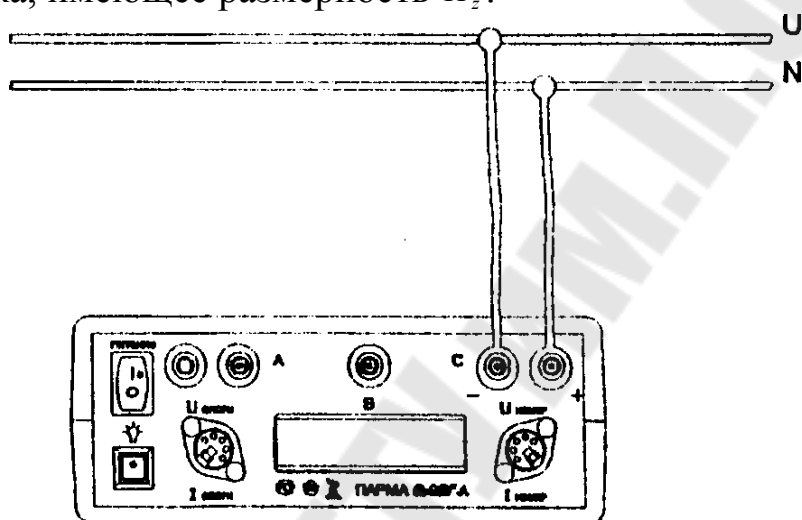


Рисунок 2.4.

3.3. Для измерения напряжения постоянного тока необходимо подать напряжение постоянного тока на клеммы, обозначенные $U_{\text{измер}}$ (рисунок 5.5) в соответствии с указанной полярностью.

Причем положительный потенциал источника постоянного тока подключить на клемму, обозначенную на лицевой панели ВАФ "–". При подаче напряжения с обратной полярностью показания на дисплее не будут индицироваться ($- 0.0 V$). Проверьте правильность подключения напряжения постоянного тока. При необходимости поменяйте полярность.

На дисплее в верхней строке справа индицируется измеренное значение напряжения постоянного тока, имеющее размерность мV или V, в нижней строке справа – измеренное значение переменного тока, имеющее размерность mA или A.

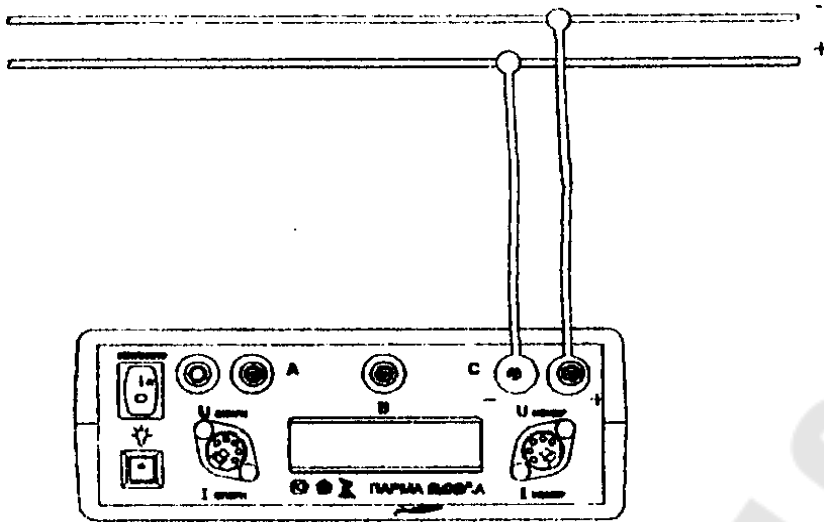


Рисунок 5.5

3.4. Для измерения активной и реактивной мощности необходимо использовать измерительные клещи.

Измерительные клещи подключить к разъему измерительного канала, обозначенного $I_{\text{измер}}$ (рисунок 2.6).

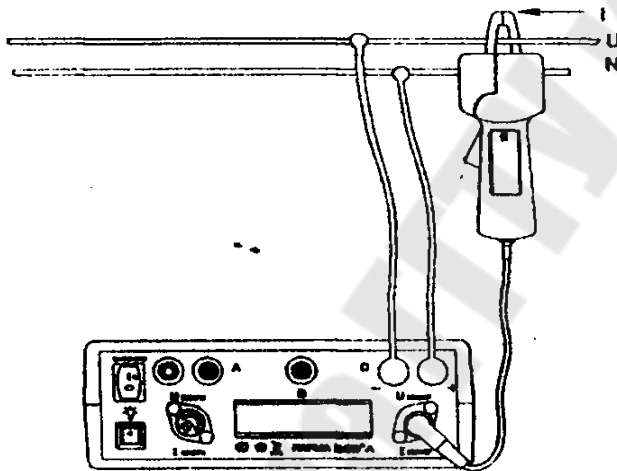


Схема подключения ВАФ в однофазной или трехфазной цепи

Рисунок 5.6

Обхватите клещами измерительного канала токопровод таким образом, чтобы знак "*" расположенный на корпусе клещей, указывал направление к источнику тока.

Подайте напряжение переменного тока на клеммы измерительного канала, обозначенные $U_{\text{измер}}$, к красной клемме, обозначенной на лицевой панели "-" подключить фазный провод, а к черной клемме, обозначенной "+" подключить "нейтраль".

На дисплее в верхней строке слева индицируется измеренное значение активной мощности со знаком, имеющее размерность W , в

нижней строке слева – измеренное значение реактивной мощности со знаком, имеющее размерность var. Действующее значение напряжения и переменного тока индицируются справа вверху и внизу соответственно. Значение угла сдвига фаз между напряжением и током в этом режиме работы на дисплей не индицируется.

3.5. Измерение угла сдвига фаз между напряжением и напряжением ВАФ осуществляет между напряжением опорного канала и напряжением измерительного канала.

Для измерения угла сдвига фаз между напряжением и напряжением необходимо подать напряжения переменного тока на клеммы, обозначенные $U_{\text{опорн}}$ и $U_{\text{измер}}$ (рисунок 5.7).

На дисплее, как показано на рисунке 2.7, в верхней строке слева индицируется измеренное значение угла сдвига фаз между напряжением опорного канала ($U_{\text{опорн}}$) и напряжением измерительного канала ($U_{\text{измер}}$), имеющее размерность $^{\circ}$ и префикс $\phi_{\text{uu}} =$; в нижней строке слева – префикс угла сдвига фаз между напряжением и током $\phi_{\text{ui}} =$. Действующие значения напряжения и переменного тока индицируются справа вверху и внизу соответственно.

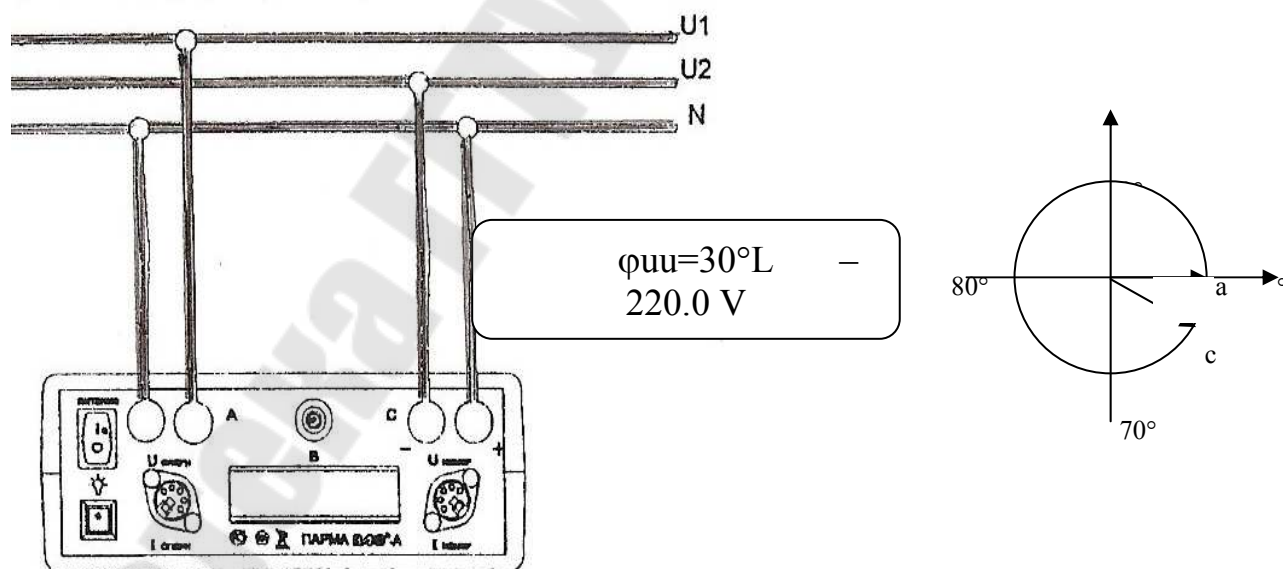


Рисунок 5.7

Считайте значение угла сдвига фаз между напряжением и напряжением слева в верхней строке дисплея. Латинская буква L указывает, что измеренный ВАФ угол сдвига фаз находится в интервале от 0 до минус 180° .

3.6. Измерение угла сдвига фаз между напряжением и током ВАФ осуществляет между напряжением опорного канала и током измерительного канала.

Для измерения угла сдвига фаз между напряжением и током необходимо использовать измерительные клещи.

Измерительные клещи подключите к разъему измерительного канала, обозначенного $I_{\text{измер}}$ (рисунок 5.8).

Обхватите клещами измерительного канала токопровод таким образом, чтобы знак "*" расположенный на корпусе клещей, указывал направление к источнику тока, контактные поверхности магнитопровода были надежно сомкнуты, а токопровод находился, по возможности, посередине окна магнитопровода.

Подайте напряжение переменного тока на клеммы обозначенные $U_{\text{опорн}}$ (рисунок 5.8).

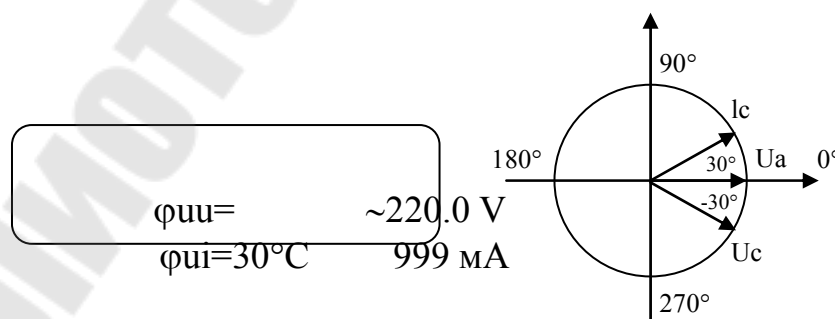
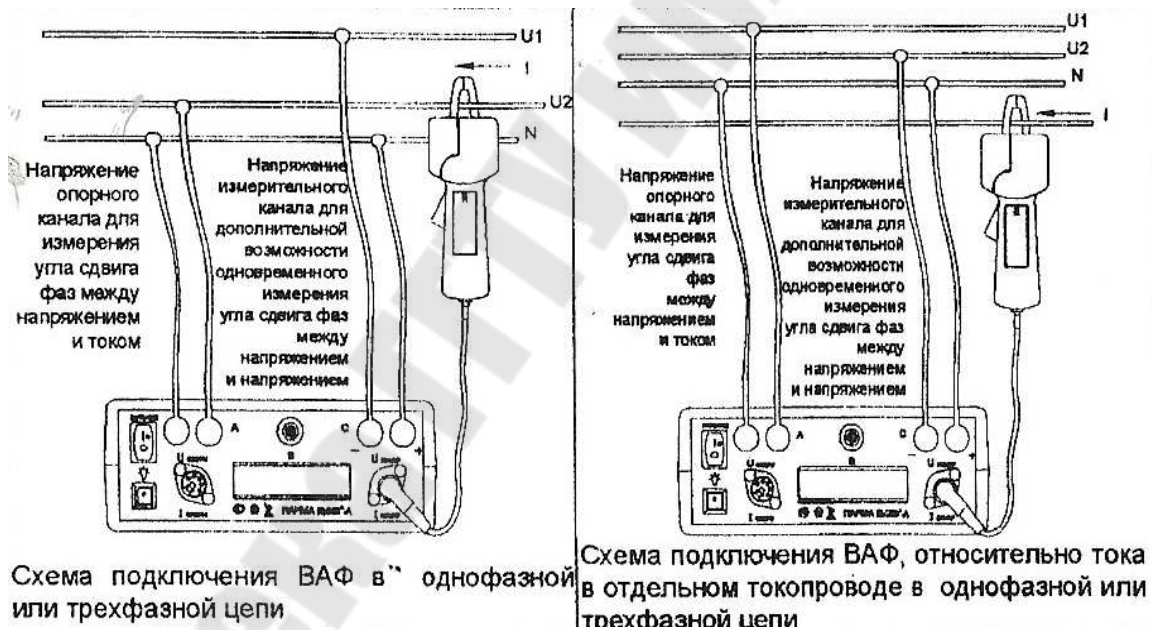


Рисунок 5.8.

На дисплее, как показано на рисунке 2.8 в нижней строке слева индицируется измеренное значение угла сдвига фаз между напряжением опорного тока ($U_{\text{опорн}}$) и током измерительного канала ($I_{\text{измер}}$), имеющее размерность $^{\circ}$ и префикс $\phi i =$; в верхней строке слева – префикс угла сдвига фаз между напряжением и напряжением $\phi u =$. Действующие значения напряжения и силы переменного тока индицируются справа вверху и внизу соответственно.

Считайте измеренное значение угла сдвига фаз между напряжением и током слева в нижней строке дисплея, рисунок 2.8. Латинская буква С обозначает, что измеренный ВАФ угол сдвига фаз находится от 0 до 180° .

3.7. Определение последовательности чередования фаз

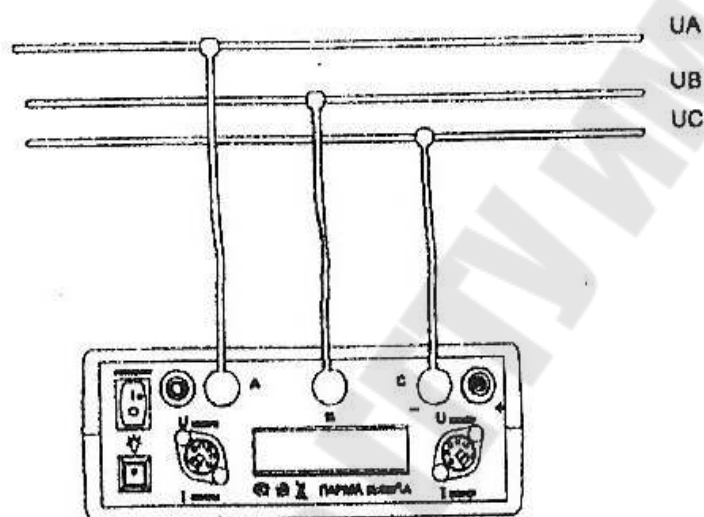


Рисунок 5.9

ВАФ автоматически переключается в данный режим при поступлении сигнала на клемму "В".

Подключите фазные проводники трехфазной системы к клеммам "А", "В" и "С" ВАФ, как показано на рисунке 5.9. Правильное определение последовательности чередования фаз возможно только при условии, что все три фазы подключены в соответствии с маркировкой на ВАФ. В случае если проводники трехфазной системы не подключены к клеммам "А" или "С" на дисплей выводится одно из сообщений, как показано на рисунке 5.10.

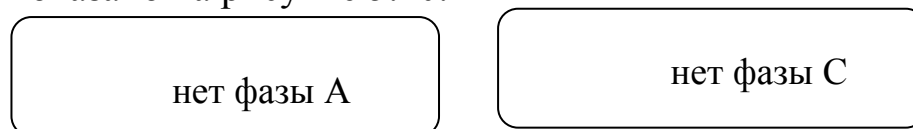


Рисунок 5.10

Результат определения последовательности чередования фаз выводится в текстовом виде, как показано на рисунке 5.11.

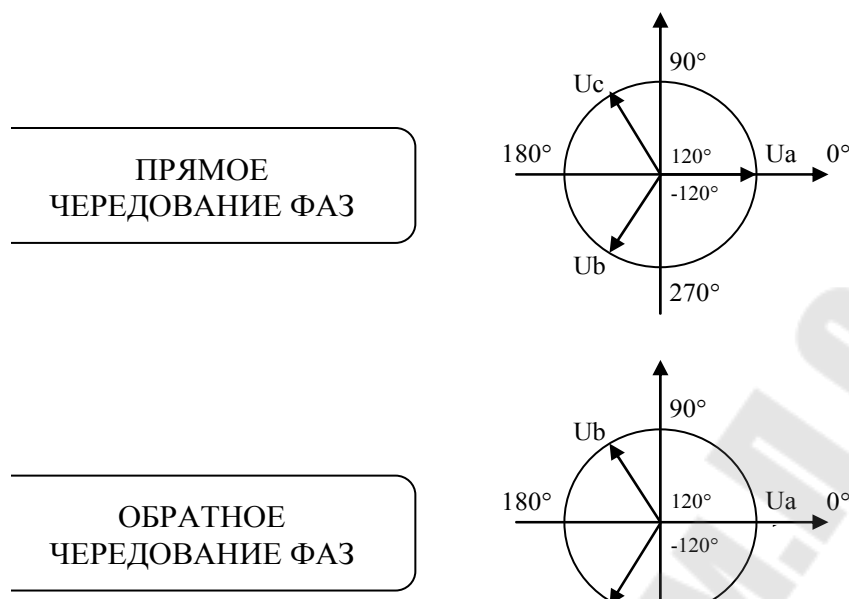


Рисунок 5.11

3.8. Порядок выполнения работы с прибором ВАФ-Парма

- 1.1. Ознакомиться с назначением, техническими характеристиками прибора ВАФ-Парма. Изучить меры безопасности.
2. Изучить методику производства измерений напряжений, токов, порядка чередования фаз и снятия векторных диаграмм (П.2).
3. Включить стенд в соответствии с вариантом задания (таблица 5.2).
4. Определить последовательность чередования фаз. Результаты проверки занести в таблицу 5.1.
5. Измерить величины фазных и линейных напряжений в линии. Результаты измерений занести в таблицу 5.1. По результатам измерений построить векторную диаграмму напряжений в масштабе.
6. Измерить величины фазных токов в линии и частоту в сети, используя токоизмерительные клещи. Результаты измерений занести в таблицу 5.1. По результатам измерений построить векторную диаграмму токов в масштабе.
7. Измерить активную и реактивную мощности в линии, используя токоизмерительные клещи. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.
8. Снять векторные диаграммы линейных и фазных напряжений при работе линии. Результаты измерений занести в таблицу 5.1. По результатам измерений построить векторную диаграмму напряжений в масштабе.

9. Снять векторную диаграмму фазных токов. Результаты измерений занести в таблицу 5.1. По результатам измерений построить векторную диаграмму токов в масштабе.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

	Частота	Напряжение, В						Токи, А		
	Ф, Гц	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C
Величина										
		U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C
Величина										
Угол										
Измеренная мощность,	Активная				Чередование фаз					
	Реактивная, Вар									

4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Измерение каких параметров электрической энергии обеспечивает ВАФ-ПАРМА-А.
3. Схемы подключения прибора ВАФ-ПАРМА-А при измерениях напряжений, токов, мощностей и порядка чередования фаз.
4. Векторные диаграммы токов и напряжений в соответствии с вариантом задания, выполненные в масштабе по результатам измерений.

5. Контрольные вопросы

1. Назначение вольтамперфазометра ВАФ-ПАРМА-А.
2. Какие электрические величины можно измерять ВАФом?
3. Каковы общие правила при использовании токоизмерительных клещей для измерений токов?
4. Как проверить правильность чередования фаз ВАФом?
5. Как произвести измерение напряжений ВАФом?
6. Как произвести измерение токов ВАФом?
7. Как произвести измерение мощности ВАФом?
8. Как произвести измерение частоты ВАФом?
9. Как произвести снятие векторных диаграмм напряжений

ВАФом?

10.Как произвести снятие векторных диаграмм токов ВАФом?

Таблица 5.2 – Варианты заданий

№ бригады	Режим работы сети	Включить			Положение выключателя
		SB1	SB2	SB3	
1	Нормальный режим без нагрузки (См. примечание [1])	Вкл	-	-	-
2	Замыкание фазы 1 на землю (См. примечание [1])	Вкл	Вкл	-	1
3	Замыкание фазы 2 на землю (См. примечание [1])	Вкл	Вкл	-	2
4	Замыкание фазы 2 на землю (См. примечание [1])	Вкл	Вкл	-	3
5	Нормальный режим с нагрузкой (См. примечание [2])	Вкл	-	Вкл	-
6	Режим с нагрузкой и с замыканием фазы 1 на землю (См. примечание [2])	Вкл	Вкл	Вкл	1
7	Режим с нагрузкой и с замыканием фазы 2 на землю (См. примечание [2])	Вкл	Вкл	Вкл	2
8	Режим с нагрузкой и с замыканием фазы 3 на землю (См. примечание [2])	Вкл	Вкл	Вкл	3

Примечание [1] Измерения производить на клеммах А,В,С,Ν

Примечание [2] Установить перемычки А1-А2, В1-В2 и С1-С2. Измерения производить на клеммах А1,В1,С1,Ν

Лабораторная работа № 6

ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

1. Цель работы. Построение векторных диаграмм токов и напряжений, эпюры распределения напряжений отдельных последовательностей при возникновении однократной продольной несимметрии.

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

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

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{LA1} &= \underline{E}_{Ac} - jX_{L1\Sigma} \cdot \underline{I}_{LA1}; \\ \Delta \underline{U}_{LA2} &= 0 - jX_{L2\Sigma} \cdot \underline{I}_{LA2}; \\ \Delta \underline{U}_{L0} &= 0 - jX_{L0\Sigma} \cdot \underline{I}_{L0},\end{aligned}\tag{6.1}$$

где $\Delta \underline{U}_{LA1}$, $\Delta \underline{U}_{LA2}$, $\Delta \underline{U}_{L0}$ – симметричные составляющие падения напряжения фазы А на несимметричном участке системы; $X_{L1\Sigma}$, $X_{L2\Sigma}$, $X_{L0\Sigma}$ – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

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

2.1. Разрыв одной фазы

Разрыв одной фазы (рисунок 6.1, а) характеризуется следующими граничными условиями:

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

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

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

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

$$\underline{I}_{LA2} = -\frac{\Delta \underline{U}_{LA1}}{jX_{L2\Sigma}}; \underline{I}_{L0} = -\frac{\Delta \underline{U}_{LA1}}{jX_{L0\Sigma}}.\tag{6.4}$$

В соответствии с (6.2) можно записать:

$$\begin{matrix} I \\ -LA1 \end{matrix} + \begin{matrix} I \\ -LA2 \end{matrix} + \begin{matrix} I \\ -L0 \end{matrix} = 0. \quad (6.5)$$

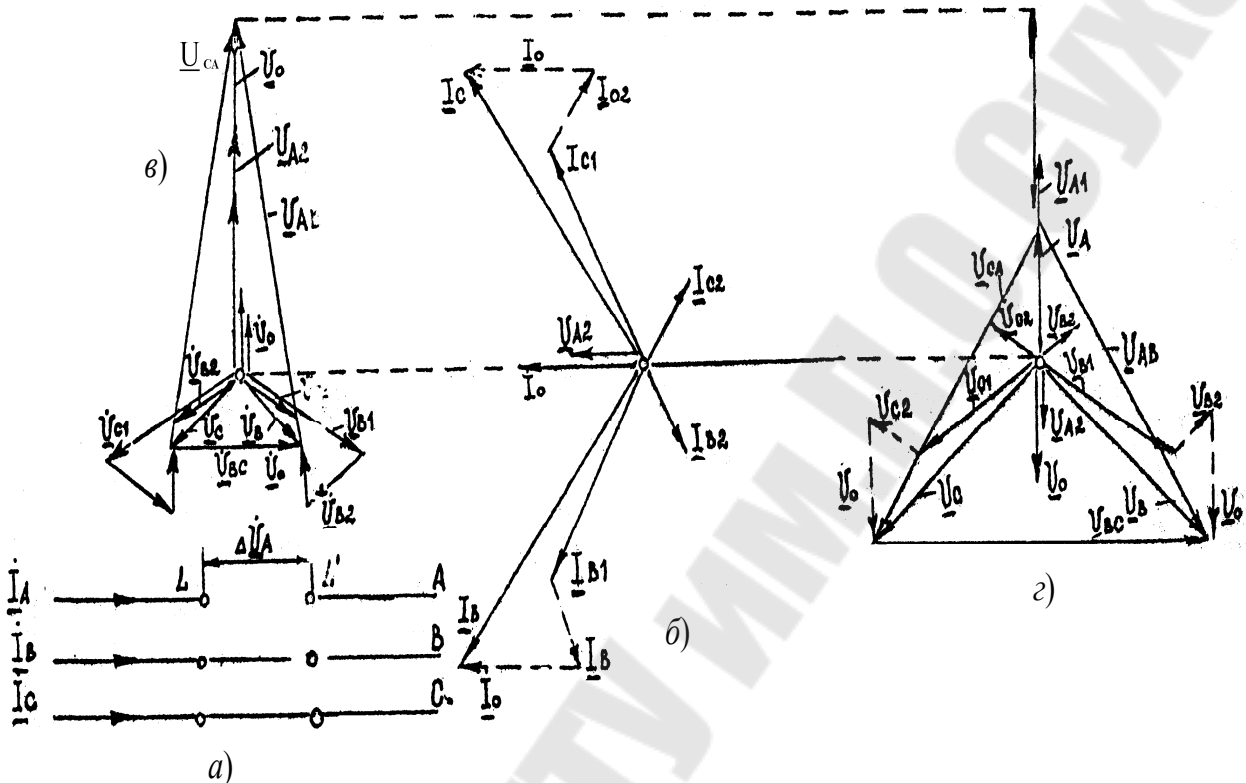


Рисунок 6.1 – Разрыв одной фазы трёхфазной цепи: *a* – исходная схема; *б* – векторная диаграмма токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи; *в* и *г* – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно, в точках *L* и *L*¹)

После подстановки (6.4) в (6.5) получим:

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

где $X_{\Delta L}^{(1)} = X_{L2\Sigma} \parallel X_{L0\Sigma}$. (6.6)

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

$$I_{LA1} = -\frac{E_{AC}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{AL}^{(1)})}. \quad (6.7)$$

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

$$\underline{I}_{LA2} = \frac{X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \cdot \underline{I}_{LA1}; \quad \underline{I}_{L0} = \frac{X_{L2\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \cdot \underline{I}_{LA1}. \quad (6.8)$$

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

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

$$\underline{I}_{L3}^{(1)} = \left(a^2 - \frac{X_{L2\Sigma} + aX_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \right) \cdot \underline{I}_L^{(1)}; \quad \underline{I}_{KC}^{(1)} = \left(a - \frac{X_{L2\Sigma} + a^2 X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \right) \cdot \underline{I}_{LA1}. \quad (6.9)$$

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

$$m_L^{(1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{L2\Sigma} - X_{L0\Sigma}}{(X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma})^2}}. \quad (6.10)$$

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

2.2. Разрыв двух фаз

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

$$\underline{I}_{LB} = 0; \underline{I}_{LC} = 0; \Delta \underline{U}_{LA} = 0. \quad (6.11)$$

В соответствии с (6.11) следует, что симметричные составляющие тока фазы А в месте разрыва двух других фаз связаны соответственно:

$$\underline{I}_{LA1} = \underline{I}_{LA2} = \underline{I}_{L0} = \frac{1}{3} \underline{I}_{LA}. \quad (6.12)$$

С другой стороны, поскольку согласно (6.11) имеем:

$$\Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{L0} = 0. \quad (6.13)$$

Достаточно сложить правые части уравнения (6.1) и сумму приравнять к нулю, после этого, учитывая (6.12), получим:

$$\underline{I}_{LA1} = \frac{E_{AC}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{\Delta L}^{(2)})}, \quad (6.14)$$

где $X_{\Delta L}^{(2)} = X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}$.

Для тока в фазах согласно (6.12) имеем:

$$\underline{I}_{LA} = 3\underline{I}_{LA1}. \quad (6.15)$$

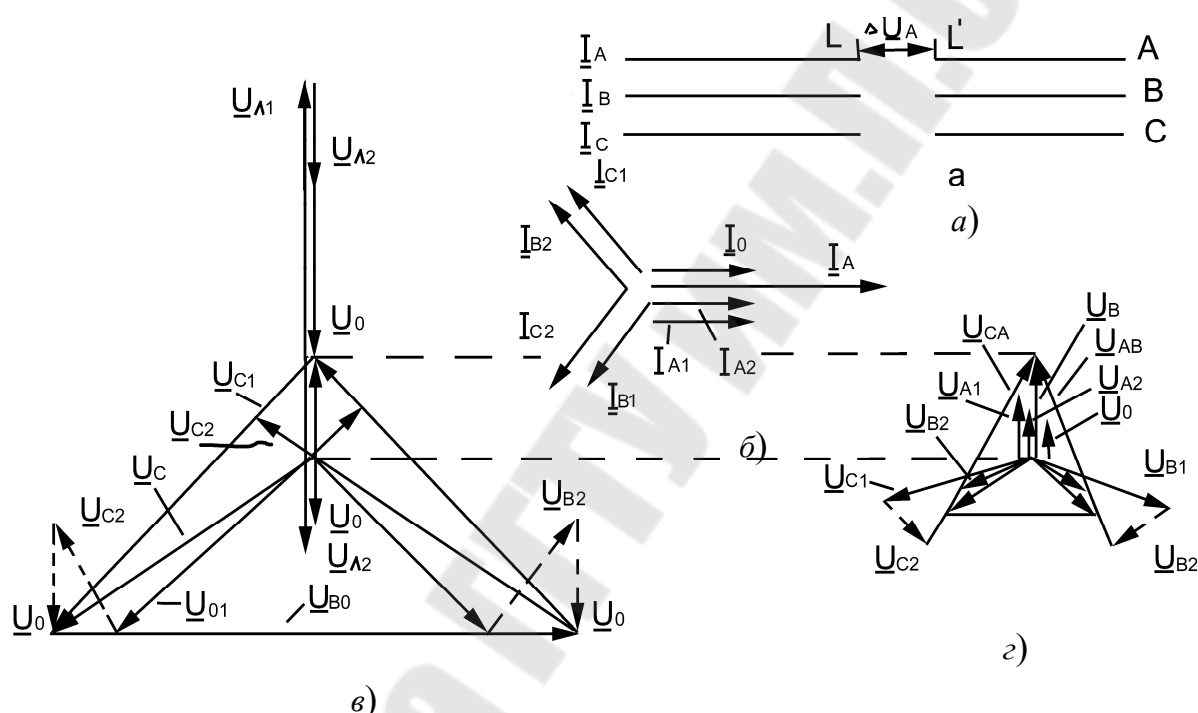


Рисунок 6.2 – Разрыв двух фаз трехфазной цепи: *a* – исходная схема; *б* – векторная диаграмма токов в месте разрыва; *в* и *г* – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно в точках *L* и *L'*)

Симметричные составляющие разности фазных напряжений в местах разрыва определяются для обратной и нулевой последовательностей по (6.1), а для прямой последовательности проще по (6.13):

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = -(\Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{L0}). \quad (6.16)$$

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

2.3. Правило эквивалентности нулевой последовательности

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

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

$$\underline{I}_{LA1}^{(n)} = \frac{E_{AY}}{j(X_{L1Y} + X_{DL}^{(2)})}, \quad (6.17)$$

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке:

$$\Delta \underline{U}_{L1}^{(n)} = X_{BL}^{(n)} \cdot I_{L1}^{(n)}, \quad (6.18)$$

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

Приведенные выше соотношения используем в данной работе для расчета величин токов и напряжений в месте возникшей однократной продольной несимметрии.

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 6.3) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3x220 В. Подключение стенда к сети осуществляется трехфазной вилкой. На стенде смонтированы кнопки включения и отключения стенда, сигнальные лампы включенного и отключенного положения стенда, а также необходимые приборы для измерений.

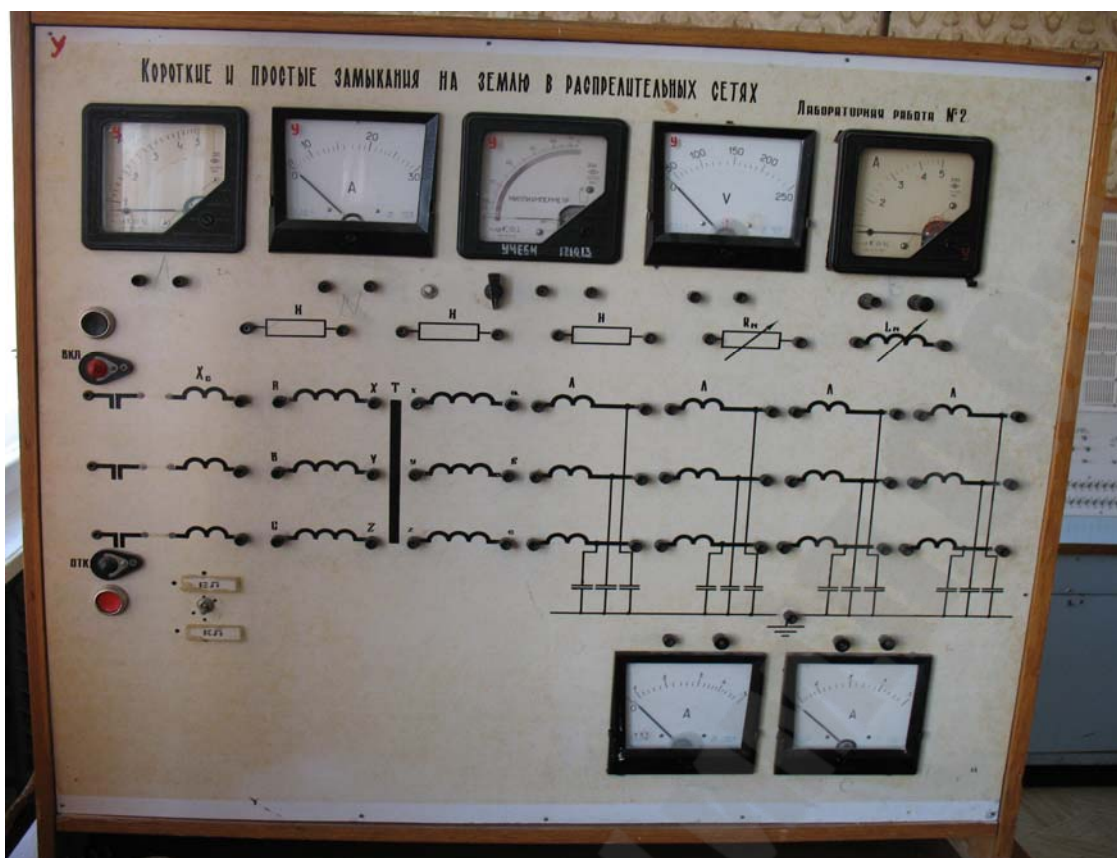


Рисунок 6.3 – Лабораторный стенд

4. Порядок выполнения работы

1. Схема для выполнения работы и место продольной несимметрии задается преподавателем.
2. Ознакомиться с целью работы, изучить схему, представленную на лабораторном стенде (рисунок 6.3) и оборудование для выполнения работы.
3. Ознакомиться с методом симметричных составляющих, правилом эквивалентности прямой последовательности, принципом составления схем замещения при рассмотрении различных видов продольной несимметрии и принципом построения векторных диаграмм токов и напряжений в месте возникновения несимметрии,
4. Собрать комплексную схему для разрыва одной фазы.
5. Измерить токи и напряжения по фазам в месте разрыва
6. По данным измерений построить векторную диаграмму токов в месте возникшей несимметрии.
7. Собрать комплексную схему для разрыва двух фаз при глухом заземлении нейтрали.

8. Измерить токи и напряжения по фазам в месте разрыва
9. По данным измерений построить векторную диаграмму токов в месте возникшей несимметрии.

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема лабораторного стенда с измерительными приборами.
3. Результаты измерений и расчетов в табличной форме.
4. Векторные диаграммы токов в месте возникшей несимметрии с указанием масштабов при обрыве одной и двух фаз.

6. Контрольные вопросы

1. Укажите основные соотношения теории симметричных составляющих при разложении трехфазной системы на симметричные составляющие при продольной несимметрии.
2. Каковы граничные условия и соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте обрыва одной фазы?
3. Каковы граничные условия и соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте обрыва двух фаз?
4. В чем состоит правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии?
5. Каков режим работы нейтрали при рассмотрении разрыва двух фаз?
6. Как влияет изменение режима работы нейтрали трансформаторов на ток в здоровых фазах при разрыве одной фазы?
7. Как влияет изменение режима работы нейтрали трансформаторов на ток в здоровых фазах при разрыве двух фаз?

Лабораторная работа № 7

ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

1. Цель работы: Анализ основных соотношений и построение векторных диаграмм напряжений при симметричном режиме трехфазной системы и при двухфазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью, а также построение векторных диаграмм токов при двухфазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью с помощью теории симметричных составляющих.

2. Краткие теоретические сведения

2.1. Основные соотношения метода симметричных составляющих

Произвольную несимметричную систему трех векторов (токов, напряжений или потоков) \underline{A} ; \underline{B} ; \underline{C} можно разложить однозначно на три симметричные системы:

- систему векторов прямой последовательности \underline{A}_1 ; \underline{B}_1 ; \underline{C}_1 ;
- систему векторов обратной последовательности \underline{A}_2 ; \underline{B}_2 ; \underline{C}_2 ;
- систему векторов нулевой последовательности \underline{A}_0 ; \underline{B}_0 ; \underline{C}_0 .

Согласно условию разложения имеем:

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0; \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0.\end{aligned}\tag{7.1}$$

Введение оператора фазы a позволяет любой вектор каждой симметричной трехфазной системы выразить через один вектор той же системы.

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

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= a^2 \cdot \underline{A}_1 + a \cdot \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{C} &= a \cdot \underline{A}_1 + a^2 \cdot \underline{A}_2 + \underline{A}_0.\end{aligned}\tag{7.2}$$

Совместное решение уравнений (7.2) дает:

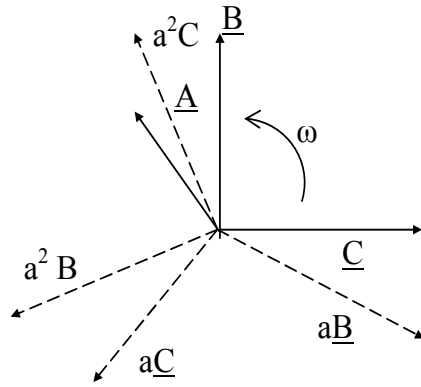
$$\begin{cases} \underline{A}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}); \\ \underline{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}). \end{cases}\tag{7.3}$$

На рисунке 7.1 показан пример разложения несимметричной системы на симметричные составляющие.

Системы прямой и обратной последовательности являются симметричными и уравновешенными, а система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной.

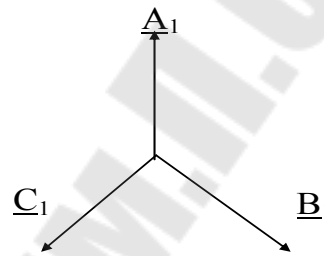
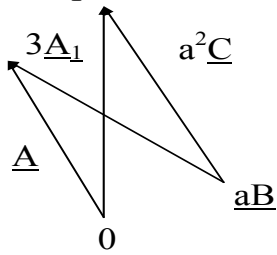
Система нулевой последовательности может существовать только в неуравновешенных системах, которые характеризуются следующими условиями:

$$\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} \neq 0.\tag{7.4}$$

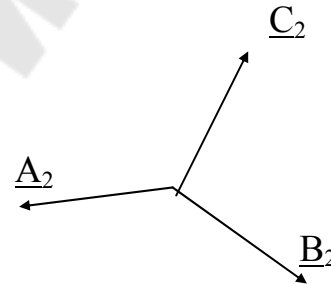
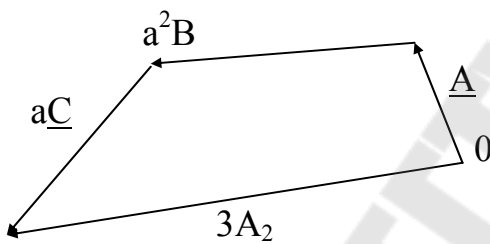


Исходная система

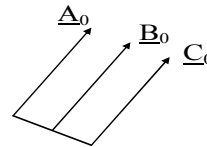
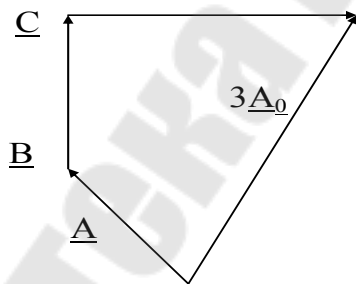
Прямая последовательность $3\underline{A}_1 = \underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}$.



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



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



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

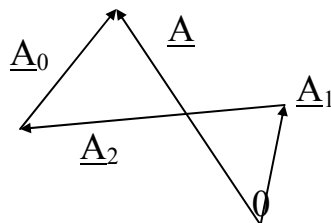


Рисунок 7.1 – Разложение несимметричной системы трех векторов на симметричные составляющие

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

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

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

$$\begin{aligned}\underline{U}_{K1} &= \underline{E}_{\Sigma} - Z_{1\Sigma} \underline{I}_{K1}; \\ \underline{U}_{K2} &= 0 - Z_{2\Sigma} \underline{I}_{K2}; \\ \underline{U}_{K0} &= 0 - Z_{0\Sigma} \underline{I}_{K0},\end{aligned}\tag{7.5}$$

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

Уравнения (7.5) содержат шесть неизвестных величин: три составляющих напряжения и три составляющих тока. Недостающие уравнения для определения этих величин получают из граничных условий, которыми характеризуются тот или иной вид несимметричного КЗ.

2.2. Порядок расчета токов при несимметричных КЗ

Расчеты несимметричных КЗ проводят с использованием метода симметричных составляющих, согласно которому любая несимметричная трехфазная система напряжений, токов и потоков заменяется тремя симметричными трехфазными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Формулы для определения сопротивлений различных последовательностей элементов СЭС приведены в таблице 7.1.

1. При расчетах токов несимметричных КЗ применяют правило эквивалентности прямой последовательности, на основании которого ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ численно равен току при некотором трехфазном КЗ в точке, удаленной на величину

$\Delta X^{(n)}$ от действительной точки КЗ. Следовательно, все методы расчета токов при трехфазных КЗ приемлемы и для определения тока любого несимметричного КЗ.

Таблица 7.1 – Сопротивление элементов СЭС

Наименование элемента	Трехфазное КЗ		Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
	именованные единицы	относительные единицы			
Синхронный генератор	$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	без ДО $X_2 = 1,45 X_d' ; c$ ДО $X_2 = 1,22 X_d''$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$
Кабельная ЛЭП	$X_0 \cdot L$	$X_0 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_{Л}^2}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (3,5 - 4,5) X_1$ $R_0 = 10 R_1$
Токоограничивающий реактор	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{I_6 U_H}{I_H U_6}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Асинхронный двигатель	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 0,9 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_*'' = 0,9$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$
Обобщенная нагрузка	$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E_H'' = 0,8 U_H$	$0,35 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_{H*}'' = 0,8$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется элементами
Двухобмоточный трансформатор	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется соединением обмоток
Синхронный двигатель, компенсатор	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 1,1 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}$ $E_*'' = 1,1$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = 1,22 X_1,$ допускается $X_2 = X_1$	$X_0 =$ $= (0,15 - 0,6) X_1$

2. Рассчитываются параметры элементов схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Параметры элементов приво-

дятся к одной ступени трансформации точным или приближенным приведением. Определяются результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки КЗ, а также результирующая ЭДС из схемы замещения прямой последовательности.

Величина тока прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю определяется следующим образом:

$$\underline{I}^{(1,1)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j \left(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right)}. \quad (7.6)$$

3. Структура приведенных выражений позволяет ток прямой последовательности особой фазы (A) при любом (n) виде несимметричного КЗ выразить в общем виде:

$$\underline{I}^{(n)}_{KA1} = \frac{\underline{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})}, \quad (7.7)$$

где $\Delta X^{(n)}$ – дополнительная реактивность, величина которой для каждого вида КЗ определяется только значениями $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$.

3. Кроме того, абсолютная величина полного тока поврежденных фаз в месте КЗ пропорциональна току прямой последовательности, что позволяет записать общее выражение

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{KA}^{(n)}, \quad (7.8)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ.

Таким образом, для конкретного вида КЗ определяется ток прямой последовательности по выражению (7.7), а затем определяется полный ток в поврежденных фазах в месте КЗ по выражению (7.8).

Обращаясь к полученным выражениям для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ (таблица 7.2), замечаем, что токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

Таблица 7.2

Определяемая величина	Виды КЗ		
	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
Токи в месте КЗ а) прямой последовательности в фазе A \underline{I}_{KA1} б) обратной последовательности в фазе A \underline{I}_{KA2} в) нулевой последовательности \underline{I}_{KA0}	$\underline{E}_A / j(X_1+X_2)$	$\underline{E}_A / j(X_1+X_2+X_0)$	$\underline{E}_A / j(X_1+X_2 \parallel X_0)$
	$-\underline{I}_{KA1}$	\underline{I}_{KA1}	$-\underline{I}_{KA1}X_0/(X_0+X_2)$
	0	\underline{I}_{KA1}	$\underline{I}_{KA1}X_2/(X_0+X_2)$
Полный ток КЗ а) в фазе A \underline{I}_{KA} б) в фазе B \underline{I}_{KB} в) в фазе C \underline{I}_{KC}	0	$3I_{KA1}$	0
	$-j\sqrt{3}I_{KA1}$	0	$\underline{I}_{KA1} ((a^2 - (X_2+aX_0) / (X_2+X_0))$
	$j\sqrt{3}I_{KA1}$	0	$\underline{I}_{KA1} ((a - (X_2+a^2X_0) / (X_2+X_0))$
Напряжения в месте КЗ а) прямой последовательности \underline{U}_{KA1} б) обратной последовательности \underline{U}_{KA2} в) нулевой последовательности \underline{U}_{KA0} г) фазы A \underline{U}_{KA} д) фазы B \underline{U}_{KB} е) фазы C \underline{U}_{KC}	$jI_{KA1} X_2$	$-jI_{KA1}(X_2 + X_0)$	$jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$
	$jI_{KA1} X_2$	$-jI_{KA1}X_2$	$jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$
	0	$-jI_{KA1}X_0$	$jI_{KA1} X_2 \parallel X_0$
	$2jI_{KA1} X_2$	0	$3jI_{KA1}X_2 \parallel X_0$
	$-jI_{KA1} X_2$	$\underline{I}_{KA1}j[(a^2-a) X_2 + (a^2-1)X_0]$	0
	$-jI_{KA1} X_2$	$\underline{I}_{KA1}j[(a-a^2) + X_2+(a-1)X_0]$	0
Дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$	$X_{2\Sigma}$	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	$X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma}$
Коэффициент $m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

Значения $\Delta X^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для различных видов КЗ приведены в таблице 7.2.

При КЗ фаз В и С на землю (рисунок.7.2) граничные условия будут:

$$\underline{I}_{KA}=0; \underline{U}_{KB}=0; \underline{U}_{KC}=0. \quad (7.9)$$

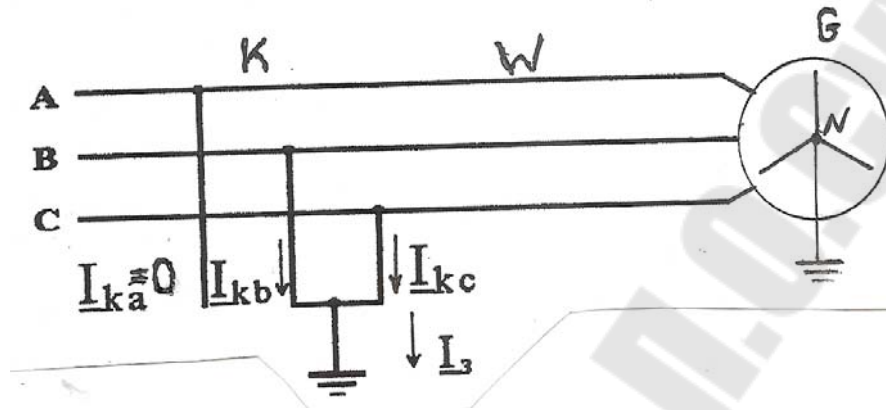


Рисунок 7.2 – Принципиальная схема двухфазного КЗ на землю на линии W в точке K

Найдем симметричные составляющие напряжений:

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

с учетом граничных условий (7.9): $\underline{U}_{KA1} = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA}$;

2. Обратной последовательности:

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

3, Нулевой последовательности:

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

Таким образом:

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{KA0} = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA}. \quad (7.10)$$

Выражение (7.10) позволяет построить векторную диаграмму напряжений двухфазного КЗ на землю, которая приведена на рисунке 7.3.

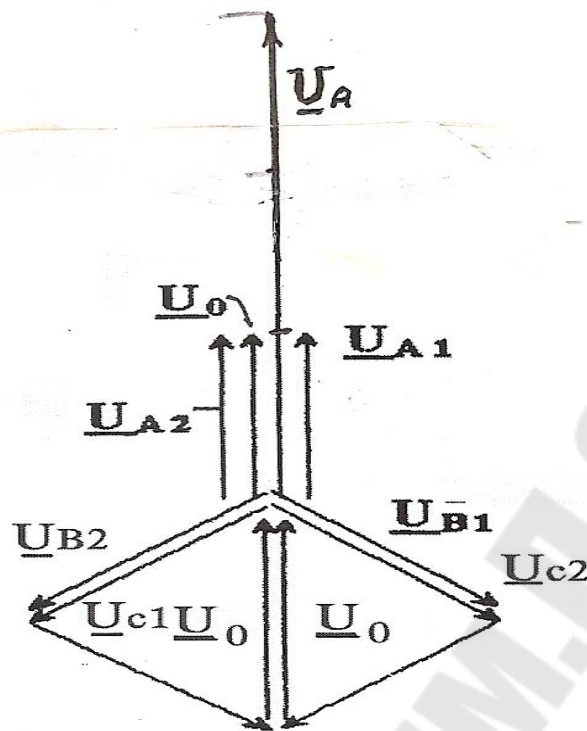


Рисунок 7.3 – Векторная диаграмма напряжений двухфазного КЗ на землю

Из теории симметричных составляющих для тока фазы А с учетом граничного условия (7.9) при КЗ на землю фаз В и С имеем:

$$\underline{I}_{KA} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = 0. \quad (7.11)$$

Определим из выражения (7.4) значение тока прямой последовательности:

$$\underline{I}_{KA1} = -(\underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{KA0}) \quad (7.12)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ могут быть найдены по выражениям:

$$\underline{I}_{KB} = \left(a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) \underline{I}_{KA1}, \quad (7.13)$$

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

Модули выражений (7.13) одинаковые и составляют:

$$m^{(1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}. \quad (7.14)$$

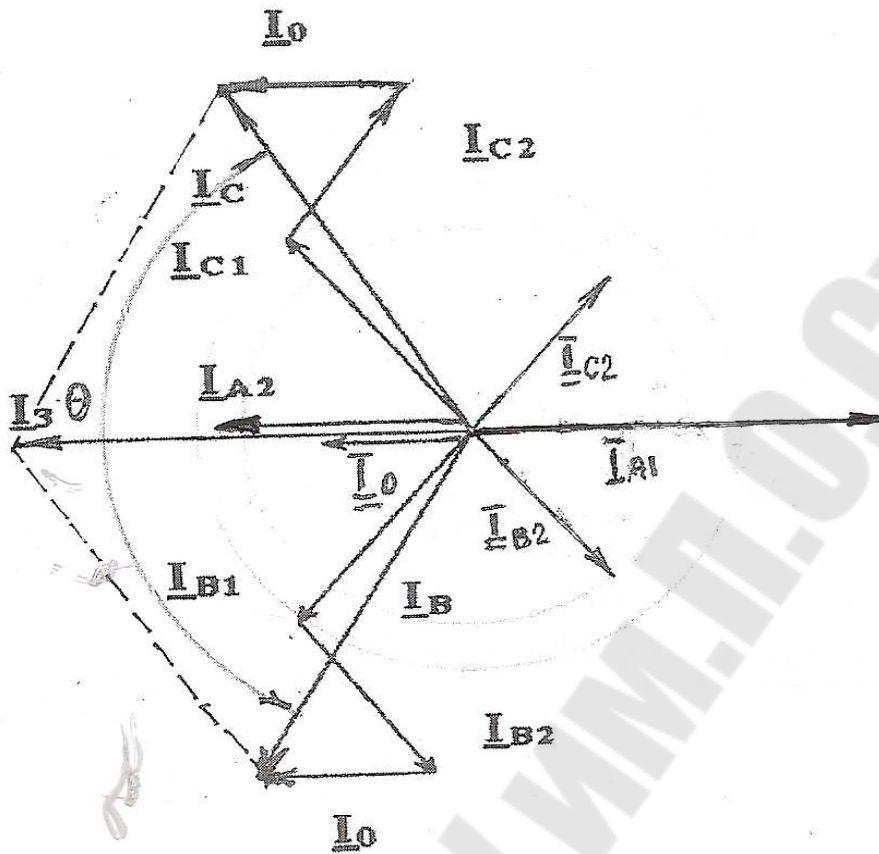


Рисунок 7.4 – Векторная диаграмма токов двухфазного КЗ на землю

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

Ток в поврежденных фазах:

$$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{KA1} \quad (7.15)$$

Ток, возвращающийся через землю, будет:

$$I_3 = 3I_{KO} \quad (7.16)$$

Выражение (7.12) позволяет построить векторную диаграмму токов двухфазного КЗ на землю, которая приведена на рисунке 7.4. На векторной диаграмме токов угол θ может изменяться в пределах $60^\circ < \theta < 180^\circ$, стремясь к нижнему пределу при $X_{0\Sigma} \rightarrow 0$, и к верхнему пределу при $X_{0\Sigma} \rightarrow \infty$, что соответствует условиям двухфазного КЗ без соединения с землей.

3. Описание лабораторного стенда

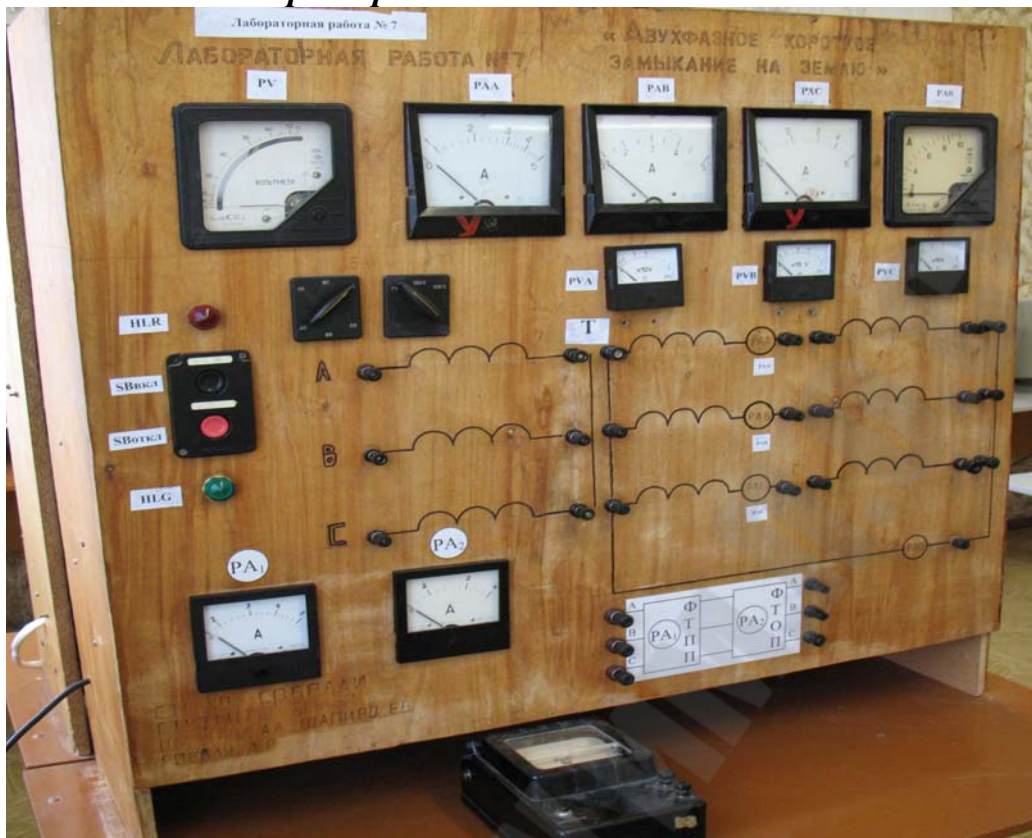


Рисунок 7.5 – Общий вид лабораторного стенда к лабораторной работе № 7

Лабораторный стенд (рисунок 7.5) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3×220 В. Подключение стенда к сети осуществляется трехфазной вилкой. На стенде смонтированы кнопки включения и отключения стенда, сигнальные лампы включенного и отключенного положения стенда, а также необходимые приборы для измерений и ФТПП – фильтр токов прямой последовательности, ФТОП – фильтр токов обратной последовательности.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Построение векторной диаграммы напряжений нормального режима.

1. Собрать схему соединения обмоток трансформатора Т в схему Y/Y-0, представленную на рисунке 7.6,а. Результаты измерений напряжений занести в таблицу 7.3.

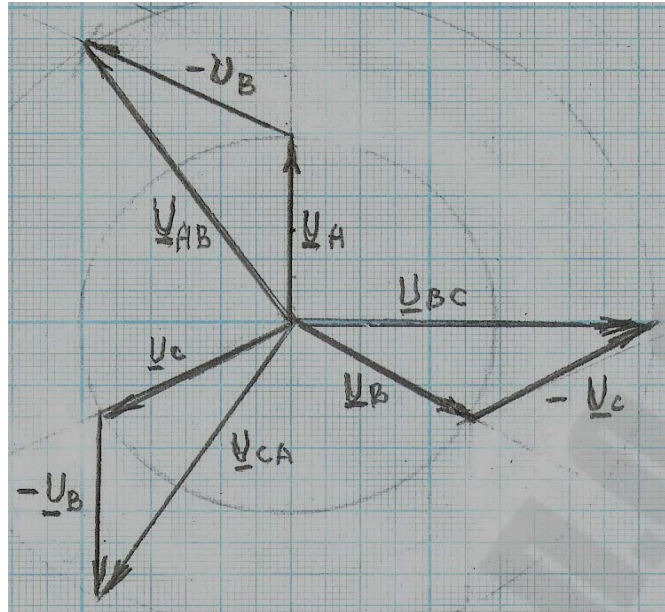


Рисунок 7.5 – Векторная диаграмма напряжений симметричного режима трехфазной системы для схемы Y/Y-0. $U_A=U_B=U_C$ – фазные напряжения, $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}$ – линейные напряжения

Таблица 7.3

Схема соединения обмоток трансформатора	Величина и угол векторов фазных напряжений					
	\underline{U}_A	Угол	\underline{U}_B	Угол	\underline{U}_C	Угол
Y						
Δ						

Схема соединения обмоток трансформатора	Величина и угол векторов линейных напряжений					
	\underline{U}_{AB}	Угол	\underline{U}_{BC}	Угол	\underline{U}_{CA}	Угол
Y						
Δ						

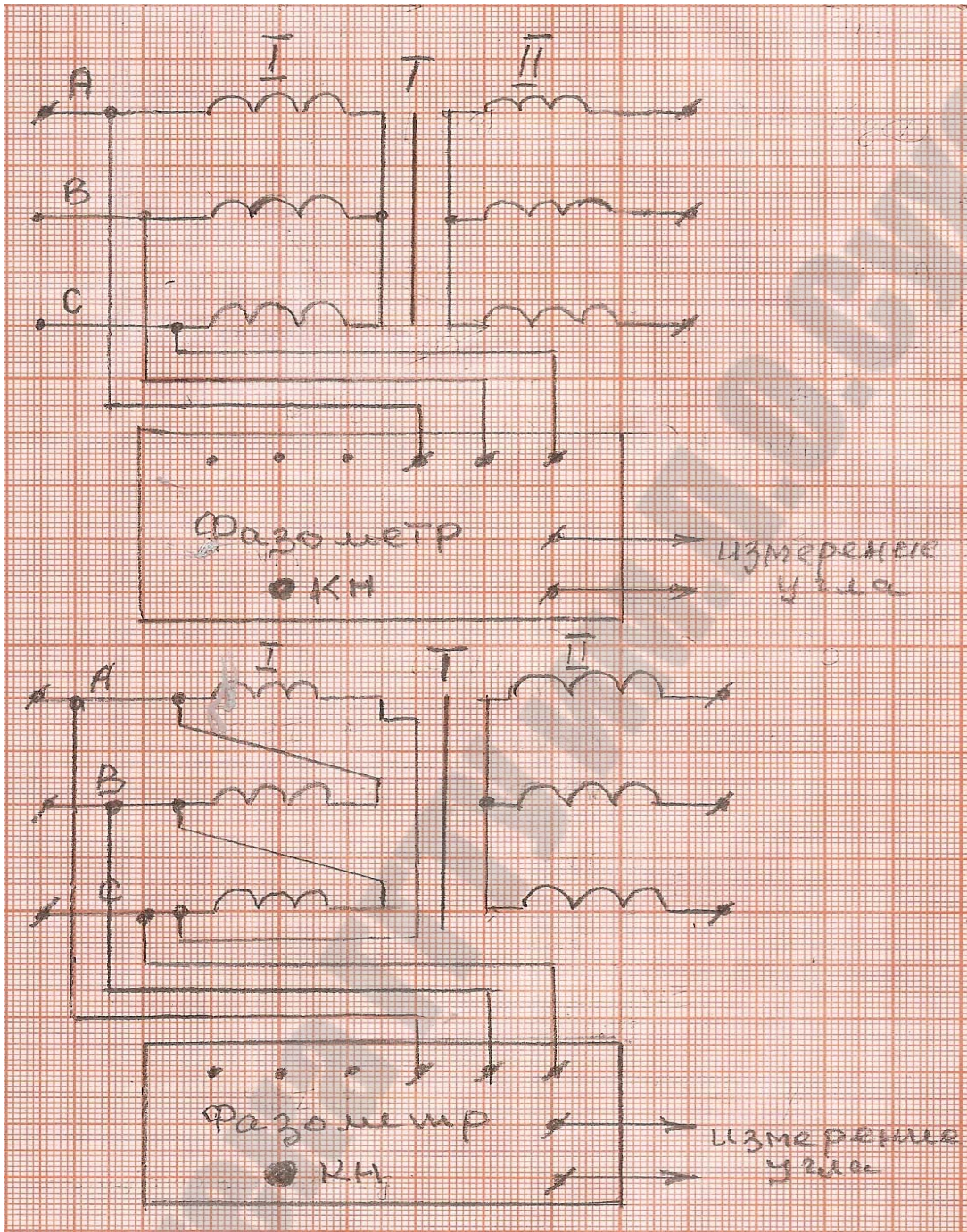


Рисунок 7.6 – Схема для снятия напряжений с соединением обмотки трансформатора Т в звезду Y (а) и треугольник Δ (б)

1.3. Начертить в масштабе векторную диаграмму напряжений по результатам измерений таблицы 7.3. Векторная диаграмма напряжений при симметричном режиме трехфазной системы представлена на рисунке 7.5

Для напряжений симметричного режима трехфазной системы порядок чередования фаз А-В-С, а углы сдвига между фазными напряжениями равен 120^0 и линейными напряжениями равен 120^0 .

Для симметричной трехфазной системы $U_{\text{ЛИН}} = \sqrt{3}U_{\text{ФАЗН}}$ (7.17)

- 1.4. Собрать схему соединения обмоток трансформатора Т в схему Δ , представленную на рисунке 7.6,б.
- 1.5. Результаты измерений напряжений занести в таблицу 7.3.
- 1.6. Начертить в масштабе векторную диаграмму напряжений по результатам измерений схему Δ таблицы 7.3.

4.2. Построение векторной диаграммы напряжений нормального режима

- 2.1. Произвести анализ основных соотношений и построения векторных диаграмм напряжений и токов при двухфазном КЗ на землю фаз В и С в сети с глухозаземленной нейтралью по п.2.2.
- 2.2. Изучить получение с помощью теории симметричных составляющих основных соотношений между токами и напряжениями и их симметричными составляющими при двухфазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью по п.2.2
- 2.3. Собрать схему испытаний при КЗ фаз В и С на землю, приведенную на рисунке 7.7 для чего:
- 2.4. Включить стенд и произвести измерения фазных напряжений. Результаты измерений занести в таблицу 7.4. Результаты измерений и вычислений
- 2.5. Определить напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке КЗ на основании теории симметричных составляющих по выражению 7.10. Результаты вычислений занести в таблицу 7.4.
- 2.6. По результатам измерений и вычислений построить в масштабе векторную диаграмму напряжений, аналогичную диаграмме напряжений, приведенной на рисунке 7.3.
- 2.7. Измерить ток прямой, обратной и ток нулевой последовательности, при КЗ на землю фаз В и С Проверить соответствие результатов измерений формуле 7.11. Результаты измерений занести в таблицу 7.4.
- 2.8. По результатам измерений вычислить ток нулевой последовательности, используя формулу 7.16. Результаты вычислений занести в таблицу 7.4

2.9. По результатам измерений в масштабе, используя метод симметричных составляющих, построить векторную диаграмму токов, аналогичную диаграмме токов, приведенной на рисунке 7.4.

Таблица 7.4

						Вычислено			
$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$U1, В$ Формула, результат	$U2, В$ Формула, результат	$U0, В$ Формула, результат	$I0, А$ Формула, результат

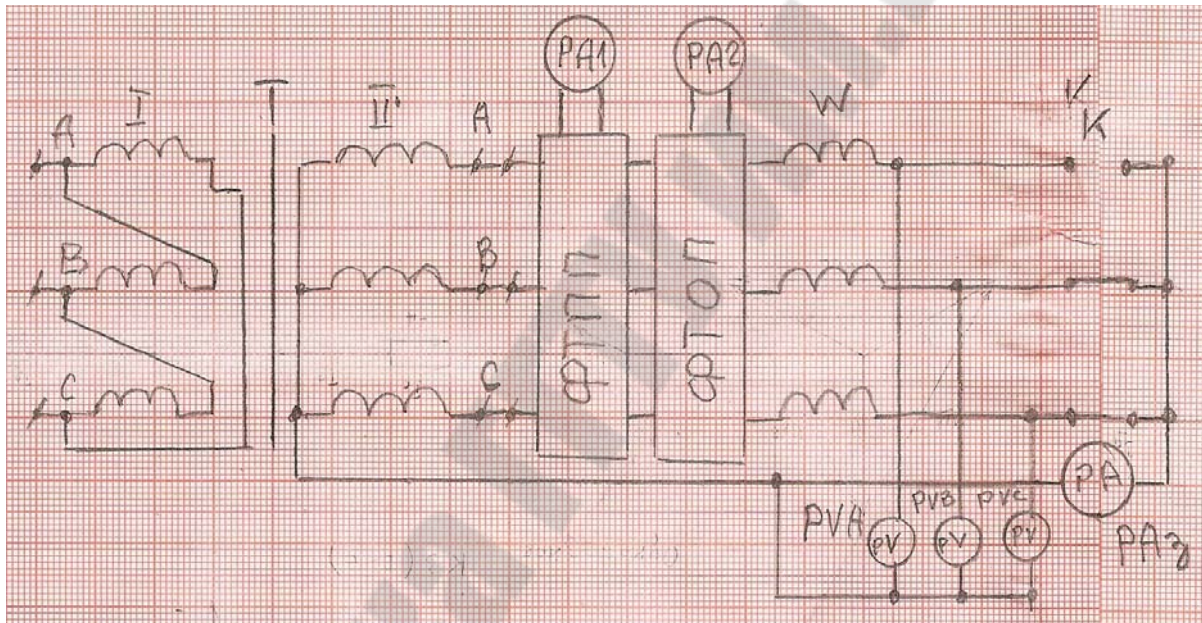


Рисунок 7.7 – Схема измерения фазных напряжений U_A, U_B, U_C и токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. ФТПП, ФТОП – фильтры токов прямой и обратной последовательностей

5. Пример расчета 7.1. Определить сверхпереходный и ударный токи в месте двухфазного КЗ в точке $K^{(1,1)}$ для схемы рисунке 7.8,а. По результатам вычислений построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для двухфазного КЗ на землю. Расчет токов КЗ произвести в именованных единицах без учета активных сопротивлений элементов системы электроснабжения. При решении примера расчета 7.1 использовать технические данные, приведенные в таблице 7.5, где номер варианта соответствует номеру бригады.

Питающая система G $S_{кв G}^{(3)} = \text{МВ} \cdot \text{А}$; $X_{1*} =$; $X_{2*} =$
 Трансформатор Т $S_T = 0 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $U_K = \%$; /04 кВ.

Решение

-Составим схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рисунки 7.8, б, в, г).

-Схема замещения прямой последовательности (рисунок 7.8, б) повторяет схему для расчета трехфазного КЗ, но содержит источник $U_{к1}$.

-Схема замещения обратной последовательности (рисунок 7.8, в) отличается от схемы замещения прямой последовательности отсутствием в ней ЭДС генерирующих ветвей.

-Определим параметры схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

-Прямая последовательность

$$X_{C1} = X_{1*} \cdot \frac{U^2}{S_{кв G}^{(3)}} =$$

$$X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_T} = \text{Ом}$$

$$X_{Л1} = X_0 L = \text{Ом}$$

-Суммарное сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = X_{C1*} + X_{T1*} + X_{Л1*} = \text{Ом}.$$

-Обратная последовательность

$$X_{C2} = X_{2*} \cdot \frac{U^2}{S_{кв G}^{(3)}} = \text{Ом}; \quad X_{T2*} = X_{T1*} = 0.00352 \text{ Ом}; \quad X_{Л2*} = X_{Л1*} = \text{Ом},$$

-Суммарное сопротивление обратной последовательности

$$X_{2\Sigma} = X_{C2} + X_{T2} + X_{Л2} = \text{Ом}.$$

-Составление схемы замещения нулевой последовательности (рисунок 7.8,г) начинают от точки К считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение нулевой последовательности $U_{к0}$. Под действием напряжения $U_{к0}$ через элементы, соединенные в звезду с заземленной нейтралью и имеющие электрическую связь с точкой КЗ, будут протекать токи нулевой последовательности. Поэтому в схему замещения включаются лишь линия (одноцепная) и трансформатор. Генератор из схемы замещения исключается, так как токи нулевой последовательности не выходят за треугольник трансформатора.

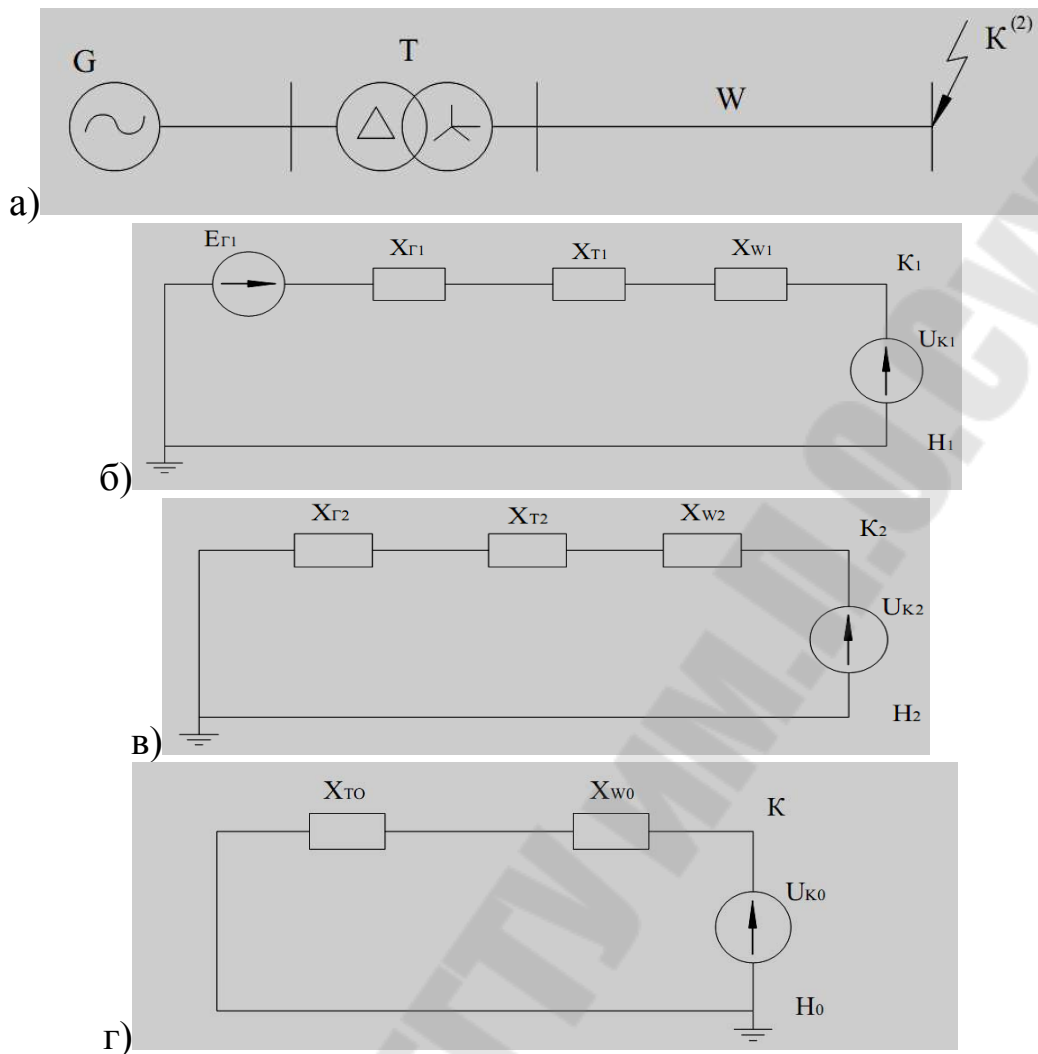


Рисунок 7.8 – Расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательности к примеру 7.1.

-Определяем параметры схемы замещения нулевой последовательности

$$X_{T0} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_T} = \text{Ом}$$

$$X_{L0} = X_0 L = \text{Ом} \text{ (одноцепная линия без тросов) .}$$

-Суммарное сопротивление нулевой последовательности

$$X_{0\Sigma} = X_{T0} + X_{L0} = \text{Ом} .$$

-Ток трехфазного КЗ будет

$$I_{\text{по}}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} X_{1\Sigma}} = \text{кА}$$

-Построим векторную диаграмму напряжений (б) при двухфазном КЗ на землю к примеру 7.1. (рисунок 7.3).

-Определяем симметричные составляющие напряжений в месте КЗ по таблице 7.2

$$\underline{U}_{K0}; \underline{U}_{K2}; \underline{U}_{K\alpha 1}$$

-Задавшись масштабом, произведем построение векторной диаграммы напряжений при двухфазном КЗ на землю к примеру 7.1. (рисунок 7.3).

-Построение векторной диаграммы токов при двухфазном КЗ на землю (рисунок 7.4).

-Определяем симметричные составляющие токов в месте КЗ по таблице 7.2 $I_1^{(1,1)}$; $I_2^{(1,1)}$; $I_0^{(1,1)}$.

-Задавшись масштабом, произведем построение векторной диаграммы токов при двухфазном КЗ на землю (рисунок 7.4).

-Определяем коэффициент m для $K^{(1,1)}$ из таблицы 7.2.

-Определяем ток, протекающий в поврежденных фазах по формуле (7.8)

-Определяем ток, протекающий в земле по формуле (7.16)

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Векторные диаграммы напряжений при симметричном режиме трехфазной системы
3. Схема и граничные условия двухфазного КЗ на землю.
4. Схема для определения параметров двухфазного КЗ на землю.
5. Результаты измерений и вычислений в табличной форме.
6. Построение векторной диаграммы напряжений при двухфазном КЗ на землю по результатам измерений.
7. Построение векторной диаграммы токов при двухфазном КЗ на землю по результатам измерений.
8. Решение примера расчета 7.1 и построение векторных диаграмм напряжений и токов при двухфазном КЗ на землю по результатам вычислений примера расчета 7.1.

6. Контрольные вопросы

1. Чему равен угол между фазными напряжениями при симметричном режиме трехфазной системы?
2. Чему равен угол между линейными напряжениями при симметричном режиме трехфазной системы?
3. Как влияет на фазу и величину линейных напряжений группа соединения обмоток трансформатора?

4. Каковы граничные условия двухфазного КЗ на землю?
5. Какое напряжение необходимо измерить для вычисления симметричных составляющих напряжений при КЗ на землю фазы А?
6. Как вычислить напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей при двухфазном КЗ на землю?
7. Как построить векторные диаграммы напряжений при двухфазном КЗ на землю?
8. Как вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей при двухфазном КЗ на землю?
9. Какое соотношение имеет место между токами прямой, обратной и нулевой последовательностей при двухфазном КЗ на землю?
10. Как вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей при двухфазном КЗ на землю?
11. Как построить векторные диаграммы токов при двухфазном КЗ на землю?

Технические данные к задаче 7.1

Таблица 7.5

Номер бригады	Параметры системы			Линия	Трансформатор		
	Мощность КЗ системы, МВА	Сопротивление прямой последоват. Хс1, О.Е.	Сопротивление обратной последоват. Хс2, О.Е.		Длина, км	Напряжение, кВ	Мощность, кВА
1	10	0,12	0,2	10	10\0,4	2500	4
2	9	0,2	0,3		10\0,4	1600	5
3	8	0,1	0,2	15	10\0,4	1000	6
4	7	0,11	0,21	12	10\0,4	630	7
5	6	0,12	0,15	9	6\0,4	1250	8
6	5	0,13	0,21	8	6\0,4	400	5,5
7	4	0,14	0,25	7	6\0,4	250	5
8	3	0,15	0,22	10	6\0,4	630	4,5

Лабораторная работа № 8

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КЗ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С СОЕДИНЕНИЕМ ОБМОТОК Δ/Y_n-11

1. Цель работы: построение векторных диаграмм токов и напряжений при переходе через трехфазный трансформатор с соединением обмоток Δ/Y_n-11 при различных видах КЗ.

2. Краткая теория

2.1. Общие положения

Ознакомьтесь с общими положениями и векторными диаграммами токов и напряжений при переходе через трансформатор со схемой Y/Y_n-0 по методическим указаниям к лабораторной работе №1 п. 2.1 и 2.2.

2.2. Схема соединения обмоток трансформатора Δ/Y_n-11

На рисунке 8.1, представлена схема соединений трансформатора Δ/Y_n-11 , и векторные диаграммы токов, соответствующие данной схеме соединения. На стороне высшего напряжения, где обмотки соединены в треугольник, междуфазные напряжения в $\sqrt{3}$ раз превышают фазные напряжения. Векторы междуфазных напряжений стороны высшего напряжения опережают на 30° аналогичные векторы междуфазных напряжений стороны низшего напряжения, что и соответствует схеме соединений Δ/Y_n-11 . На стороне же низшего напряжения, где обмотки соединены в звезду, междуфазные и фазные напряжения разнятся по величине в $\sqrt{3}$ раз.

2.3. Распределение токов при трехфазном КЗ за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 .

При трехфазном КЗ в точке $K^{(3)}$ между фазами а, в и с звезды за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 токи КЗ одинаковые по величине протекают во всех трех фазах (рисунок 8.1,а). Вектора фазных токов при этом равны по величине и сдвинуты на угол 120° (рисунок 8.1,в). При построении векторных диаграмм токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рисунок 8.1,б,в) для простоты условно принят коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$. Если число витков фазных обмоток соответственно равны W_Y и W_Δ , то коэффициент трансформации для трансформатора со схемой Δ/Y_n-11

$$K_T = \frac{\sqrt{3} \cdot W_Y}{W_\Delta} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}} \quad (8.1)$$

Рассчитанные токи КЗ за трансформатором на стороне низшего напряжения должны быть пересчитаны на сторону высшего напряжения для выбора уставок защит на стороне ВН, учитывая особенности, связанные с группой соединения обмоток трансформатора. На рисунке 8.1,а приведена принципиальная схема трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n-11 . При известных фазных токах $I_{a\phi}$, $I_{b\phi}$ и $I_{c\phi}$ ток в линейных проводах за треугольником имеем при $K_T = 1$

$$\begin{aligned} I_{Aл} &= I_{A\phi} - I_{B\phi} = (I_{a\phi}/\sqrt{3} - I_{b\phi}/\sqrt{3}); \\ I_{Bл} &= I_{B\phi} - I_{C\phi} = (I_{a\phi}/\sqrt{3} - I_{c\phi}/\sqrt{3}); \\ I_{Cл} &= I_{A\phi} - I_{C\phi} = (I_{c\phi}/\sqrt{3} - I_{a\phi}/\sqrt{3}). \end{aligned} \quad (8.2)$$

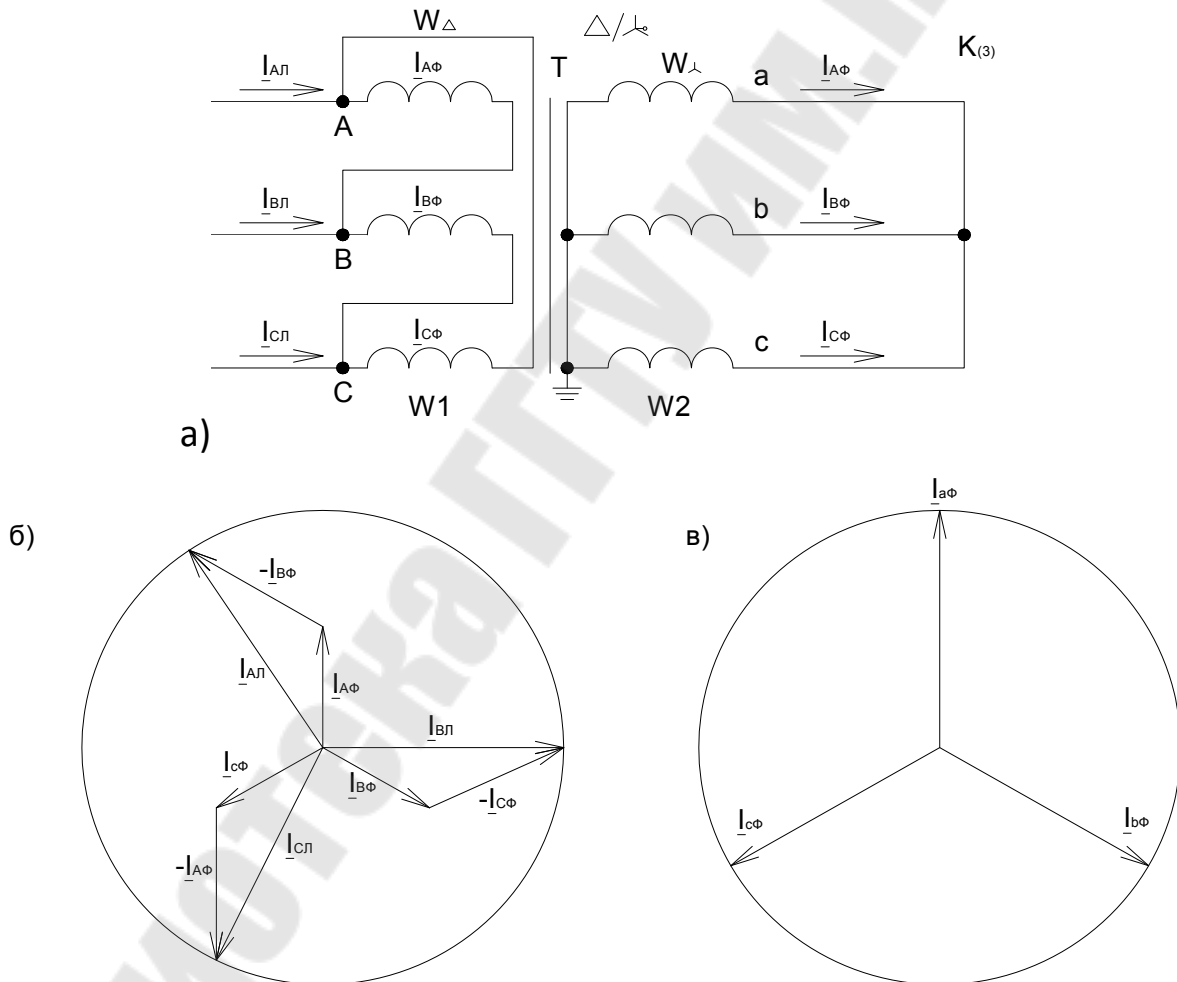


Рисунок 8.1 – Распределение токов (а) и векторные диаграммы токов вторичной (в) и первичной обмоток (б) при трехфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Δ/Y_n и $K_T=1$

При построении векторных диаграмм токов (рисунок 8.1,б,в) следует обратить внимание, что вектора токов $\underline{I}_{a\phi}$ и $\underline{I}_{A\phi}$ совпадают по фазе и при $K_T = 1$ отличаются по величине в $\sqrt{3}$ раз за счет соотношения $\sqrt{3}W_Y/W_\Delta$, т.е. при $K_T = 1$ имеем $I_{A\phi} = I_{a\phi}/\sqrt{3}$ (рисунок 8.1, б, в).

Т.е. при реальном K_T имеем увеличение токов $\underline{I}_{AЛ}; \underline{I}_{ВЛ}; \underline{I}_{СЛ}$ в $\sqrt{3}$ раз (рисунок 8.1,б) и их уменьшение $\sqrt{3}$ раз за счет соотношения $\sqrt{3}W_Y/W_\Delta$, (рисунок 8.1,б, в).

Ток КЗ, протекающий в любой фазе трансформатора Т на стороне ВН при трехфазном КЗ на стороне НН трансформатора Т определяется

$$I_{A\phi}^{(3)} = I_{B\phi}^{(3)} = I_{C\phi}^{(3)} = \frac{I_{a\phi}^{(3)}}{\sqrt{3}K_T}, A, \quad (8.3)$$

Таким образом, при трехфазном КЗ за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 токи, протекающие на стороне ВН при КЗ на стороне НН трансформатора такие же, что и при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_n-0 , но сдвиг по фазе между токами вторичной и первичной обмоток составляет 30° . Токи трехфазного КЗ на стороне НН трансформатора пересчитываются через коэффициент трансформации трансформатора K_T

$$I_{AЛ}^{(3)} = \frac{I_{a\phi}^{(3)}\sqrt{3}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{I_{a\phi}^{(3)}}{K_T}; I_{ВЛ}^{(3)} = \frac{I_{в\phi}^{(3)}\sqrt{3}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{I_{в\phi}^{(3)}}{K_T}; I_{СЛ}^{(3)} = \frac{I_{с\phi}^{(3)}\sqrt{3}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{I_{с\phi}^{(3)}}{K_T} \quad (8.4)$$

2.4. Распределение токов при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 (рисунок 8.2,а).

При двухфазном КЗ в точке $K^{(2)}$ между фазами v и c (рисунок 8.2,в) звезды токи КЗ одинаковые по величине протекают в двух фазах. Векторы фазных токов при этом сдвинуты на угол 180° .

Рассчитанные токи КЗ за трансформаторами на стороне низшего напряжения должны быть пересчитаны на сторону высшего напряжения. При этом следует учесть особенности, связанные с группой соединения обмоток трансформатора.

При двухфазном КЗ на стороне звезды, например между фазами v и c (рисунок 8.2,а), ток в неповрежденной фазе $I_{a\phi} = 0$, а токи в поврежденных фазах v и c равны току КЗ, т. е.

$$I^{(2)}_{в\phi} = -I^{(2)}_{с\phi} = I^{(2)}_{по} \quad (8.5)$$

В общем случае для трансформатора со схемой Δ/Y_n-11 фазные токи стороны треугольника ВН связаны с токами стороны звезды следующими выражениями при $K_T=1$

$$I_{AЛ} = (\underline{I}_{A\phi} - \underline{I}_{B\phi}) / \sqrt{3}, \quad \underline{I}_{ВЛ} = (\underline{I}_{B\phi} - \underline{I}_{C\phi}) / \sqrt{3}, \quad \underline{I}_{СЛ} = (\underline{I}_{C\phi} - \underline{I}_{A\phi}) / \sqrt{3}. \quad (8.6)$$

При двухфазном КЗ между фазами v и c ток КЗ в фазе A со сторо-

ны звезды отсутствует, т.е. $I_{af}=0$, $I_{bf} = -I_{cf}$ (рисунок 8.2,б,в), поэтому при $K_T \neq 1$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{AL}^{(2)} &= -\underline{I}_{\text{вф}}^{(2)} / \sqrt{3} K_T, \\ \underline{I}_{BL}^{(2)} &= 2\underline{I}_{\text{вф}}^{(2)} / \sqrt{3} K_T, \\ \underline{I}_{CL}^{(2)} &= -\underline{I}_{\text{сф}}^{(2)} / \sqrt{3} K_T. \end{aligned} \quad (8.7)$$

Таким образом, при двухфазном КЗ между фазами *в* и *с* звезды за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 на стороне треугольника токи КЗ проходят во всех трех фазах. Причем, в одной фазе течет ток в два раза больше, чем ток двух других фаз, и в $2/\sqrt{3}$ раз больший тока $I_{\text{по}}^{(2)}$ на стороне *Y* и совпадает с ним по фазе (рисунок 8.2, б).

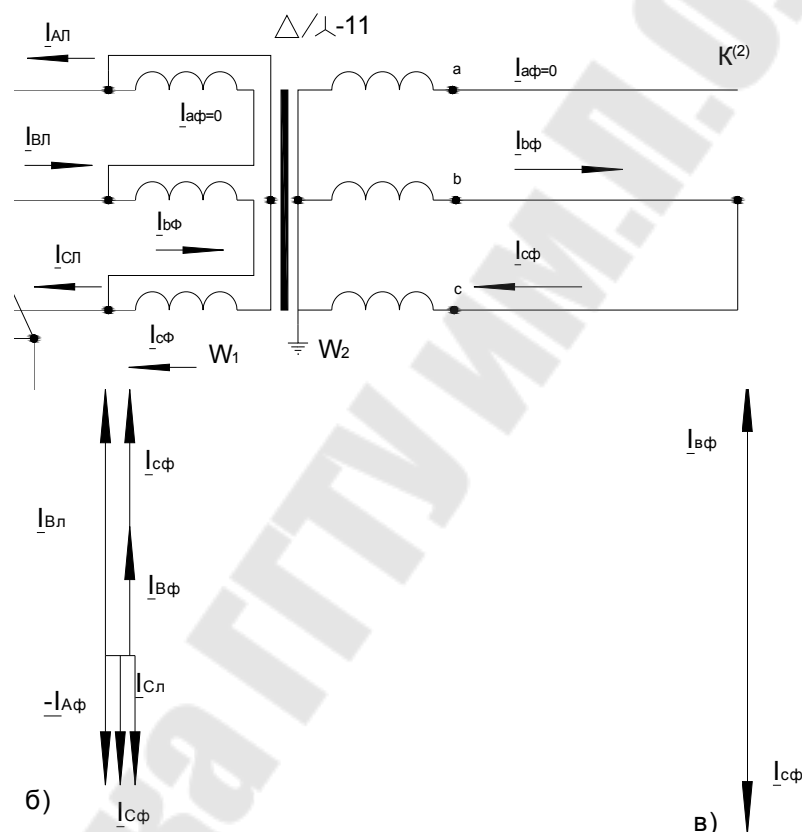


Рисунок 8.2 – Распределение токов (а) и векторные диаграммы токов вторичной (в) и первичной обмоток (б) при двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Δ/Y_n-11 и $K_T = 1$.

Как видно из рисунка 8.2,а ток в треугольнике делится на две части: одна замыкается по обмотке фазы *В* другая – по последовательно включенным обмоткам фаз *С* и *А*. Поскольку сопротивление второй цепи в два раза больше, ток в обмотке фазы *В* равен $I_{\text{сф}} = 2I_{\text{по}}^{(2)}/3$, а в обмотках фаз *А* и *С* $I_{\text{аф}} = I_{\text{бф}} = I_{\text{по}}^{(2)}/3$. (рисунок 8.2,в)

Для простоты при построении векторных диаграмм токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рисунок 8.2,б,в) условно принят коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$.

При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y и Δ равно 1, а токов в фазах

$$I_{a\phi} / I_{A\phi} = w_{\Delta} / w_Y = \sqrt{3}, \text{ так как } w_{\Delta} = \sqrt{3} w_Y$$

2.5. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Δ/Y_n .

При однофазном КЗ в точке $K^{(1)}$ между фазой a и землей на стороне Y_n протекает в одной фазе a . (рисунок 8.3,в).

Рассмотрим распределение токов на стороне звезды трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n-11 при однофазном КЗ в точке $K^{(1)}$ на стороне звезды НН (рисунок 8.3). Для простоты принят коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$. При этом отношение токов в фазах обмоток с соединением Δ/Y_n-11 равно

$$I_Y / I_{\Delta} = w_{\Delta} / w_Y = \sqrt{3}$$

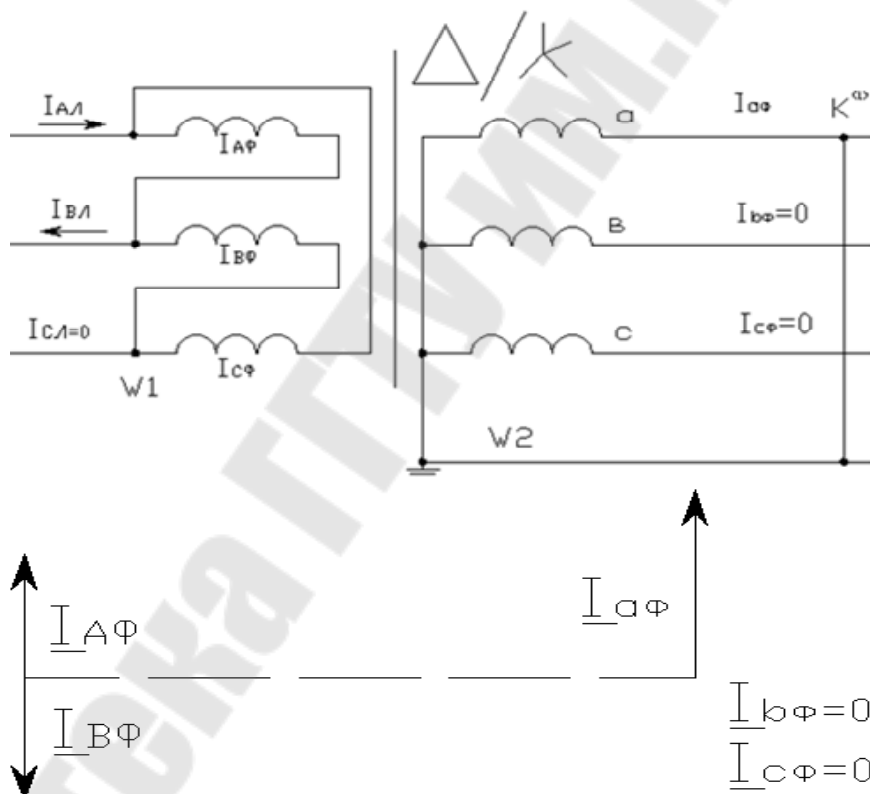


Рисунок 8.3 – Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Δ/Y_n-11 и $K_T = 1$.

Токи однофазного КЗ за трансформатором со схемой Δ/Y_n-0 на стороне ВН проходят в двух фазах a и c , они равны по величине и противоположно направлены (рисунок 8.3,б).

В общем случае при нормальном режиме и симметричной нагрузке имеем симметричные звезды линейных и фазных токов. При этом величины линейных токов могут быть определены:

$$I_{Al} = I_{a\phi} - I_{c\phi} \quad I_{Bl} = I_{b\phi} - I_{a\phi} \quad I_{Cl} = I_{c\phi} - I_{b\phi}; \quad (8.8)$$

Учитывая соотношения (8.8), при однофазном КЗ $I_{b\phi} = 0$ и $I_{c\phi} = 0$, имеем при $K_T = 1$ и $w_{\Delta}/w_Y = \sqrt{3}$

$$I_{Al} = I_{a\phi}/\sqrt{3}; \quad I_{Bl} = -I_{a\phi}/\sqrt{3} \quad I_{Cl} = 0. \quad (8.9)$$

3. Описание лабораторного стенда.

Лабораторный стенд (рисунок 8.4) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3x220 В. Подключение стенда к сети осуществляется трехфазной вилкой. На стенде смонтированы кнопки включения и отключения стенда, сигнальные лампы включенного и отключенного положения стенда, а также необходимые приборы для измерений.

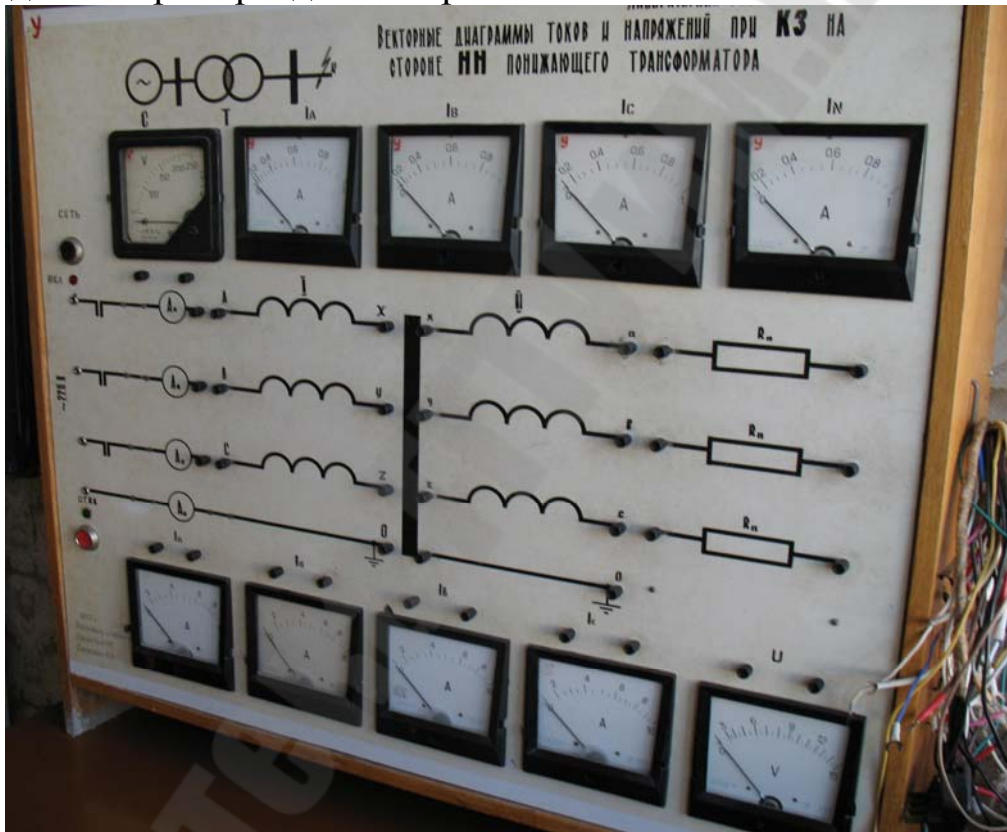


Рисунок 8.4 – Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

1. Составить схему соединения обмоток трансформатора в группу Δ/Y_n-11 с приборами, необходимыми для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.

2. Соединить обмотки трансформатора в группу Δ/Y_n-0 , предусмотрев в ней необходимые измерительные приборы для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.

3. Измерить величину линейных напряжений со стороны Δ и на стороне Y_n и вычислить коэффициент трансформации трансформатора T по выражению (8.1).

4. При КЗ трех фаз на вторичной стороне трансформатора записать в таблицу 8.1 показания приборов первичной и вторичной сторон.

5. Вычислить величины токов и напряжений первичной стороны трансформатора через K_T , используя результаты измерений токов и напряжений на вторичной стороне. Сравнить результаты расчетов и измерений.

6. Построить по результатам измерений при трехфазном КЗ векторные диаграммы фазных токов, а также фазных и линейных напряжений на первичной и вторичной стороне.

7. Повторить пункт 4, 5, 6 при двухфазном КЗ. (Варианты закорачиваемых фаз заданы в таблице 8.2). Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

8. Повторить пункты 4.5.6 при однофазном КЗ. (Варианты закорачиваемой фазы заданы в таблице 8.3). Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты измерений при соединении обмоток трансформатора Δ / Y_n-11 и различных видах КЗ

Измеряемая величина	Первичная сторона		
	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
I_A, A			
I_B, A			
I_C, A			
I_0, A			
U_A, B			
U_B, B			
U_C, B			
U_{AB}, B			
U_{BC}, B			
U_{CA}, B			
Вторичная сторона			
I_a, A			
I_b, A			

I_c, A			
U_a, B			
U_b, B			
U_c, B			
U_{ab}, B			
U_{bc}, B			
U_{ca}, B			
I_0, A			

Таблица 8.2

Варианты заданий

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

4. Содержание отчета

1. Название, цель работы и номер бригады.
2. Схема соединения обмоток трансформатора в группу Δ / Y_n-11 с приборами, необходимыми для измерения фазных и линейных напряжений, а также фазных токов.
3. Результаты измерений по пунктам рабочего задания в виде таблицы 8.1.
4. Векторные диаграммы токов и фазных и линейных напряжений вторичной и первичной обмоток, выполненных в масштабе, принятом в Л.Р. 1 при различных видах КЗ.
5. Письменный ответ на п. 9,10, 11 контрольных вопросов

5. Контрольные вопросы

1. Каким образом обозначаются начала и концы первичной и вторичной обмоток трансформатора?

2. Как вычисляется коэффициент трансформации трехфазного трансформатора при соединении его обмоток в группу Δ/Y_n-11 ?
3. Чему равен угол сдвига между первичными и вторичными линейными напряжениями трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток трансформатора в группу Δ/Y_n-11 ?
4. По каким причинам токи трехфазных КЗ на стороне вторичной обмотки трансформатора одинаковы при соединении обмоток трансформатора Δ/Y_n-11 и Y/Y_n-0 ?
5. Чему равен угол сдвига между первичными и вторичными токами трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток трансформатора в группу Δ/Y_n-11 ?
6. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора в группу Δ/Y_n-11 при трехфазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?
7. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора в группу Δ/Y_n-11 при двухфазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?
8. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора в группу Δ/Y_n-11 при однофазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?
9. Чему равны токи на стороне ВН трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n-11 , если фазные токи на стороне НН в равны $I_a = I_b = I_c$ = (соответствует номеру бригады в Амперах) при трехфазных КЗ и коэффициенте трансформации $K_T = 10$?
10. Чему равны токи на стороне ВН трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n-11 , если фазные токи на стороне НН в равны $I_a = I_b$ (соответствует номеру бригады в Амперах) при двухфазных КЗ и коэффициенте трансформации $K_T = 10$?
11. Чему равны токи на стороне треугольника трансформатора с соединением Δ/Y_n-11 , если фазные токи на стороне НН в равны $I_a = I_b = I_c$ = (соответствует номеру бригады в Амперах) при однофазных КЗ и коэффициенте трансформации $K_T = 10$?

Лабораторная работа № 9

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ НА СТОРОНЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА

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

2 Краткая теория

2.1. Общие положения

Потребителям необходим выпрямленный ток по двум причинам:

1. Многие энергоемкие технологические процессы требуют выпрямленного тока (электролиз, электрохимические процессы).

2. Выпрямленный ток обеспечивает большие удобства в управлении электродвигателями в тяговом и промышленном приводе при необходимости регулирования вращающего момента и частоты вращения в широких пределах.

Поэтому около одной трети всей вырабатываемой в стране электроэнергии используется потребителями выпрямленного тока. Ранее применялись электромеханические преобразователи, например система асинхронный двигатель – генератор постоянного тока, а с 30-х годов – вентильные преобразователи (ртутные, полупроводниковые).

2.2. Промышленные схемы выпрямления тока

В промышленных силовых установках применяются трехфазные схемы выпрямления. Рассмотрим наиболее распространенные силовые схемы выпрямления (трехфазные, двухполупериодные). Принципиальные схемы выпрямления: трехфазная мостовая схема (схема Ларионова) и трехфазная схема с уравнительным реактором приведены на рисунках 9.1 и 9.2.

При рассмотрении схем примем следующие условные обозначения, применяемые в технической литературе: U_d – среднее значение выпрямленного напряжения; I_d – среднее значение выпрямленного тока; m – число фаз выпрямления; i_a – мгновенное значение прямого тока вентилей; $U_{обр}$ – максимальное значение обратного напряжения на вентиле вторичной обмотки; U_2 , I_2 – действующие значения фазных напряжений и токов вторичной обмотки трансформатора; S_1 , S_2 , S_m – рас-

четные – первичная, вторичная и типовая мощности трансформатора;
 R_d – сопротивление включенное в цепь нагрузки.

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

Таблица 9.1 – Расчетные соотношения при чисто активной нагрузке и идеальных вентилях

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

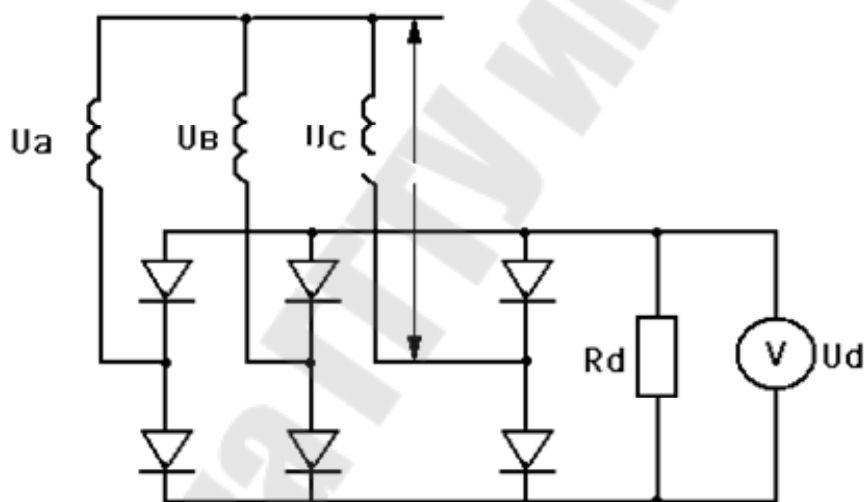


Рисунок 9.1 – Трехфазная мостовая схема (схема Ларионова)

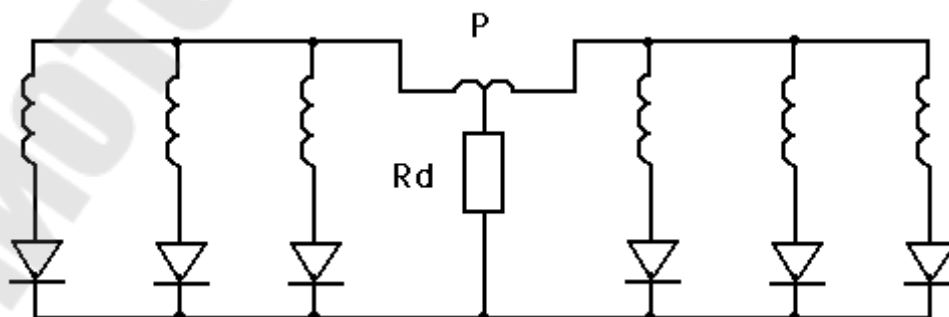


Рисунок 9.2 – Трехфазная схема с уравнивающим реактором

2.3. Расчет тока КЗ на стороне выпрямленного тока

Для расчета принимается наиболее тяжелый режим, когда угол управления при КЗ равен нулю.

Среднее значение установившегося тока КЗ равно сумме средних значений токов в n вентилях, питающих место КЗ:

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

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

Для схемы с уравнительным реактором $n = 6$

$$Idyp = 6 \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi x_2} = 2,7 \frac{U_2}{x_2}. \quad (9.1)$$

Для трехфазной мостовой схемы $n = 3$

$$Idm = 3 \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi x_2} = 1,35 \frac{U_2}{x_2}. \quad (9.2)$$

Ток КЗ в схеме с уравнительным реактором

$$Idyp = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \frac{S_{nm}}{X_*}; \quad (9.3)$$

Ток КЗ в мостовой схеме:

$$Idm = \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \frac{S_{nm}}{X_*}. \quad (9.4)$$

С учетом активных сопротивлений

$$Idyp = 2,7 \frac{U_2}{\sqrt{Rk^2 + Xk^2}}; \quad (9.5)$$

$$Idm = 1,35 \frac{U_2}{\sqrt{Rk^2 + X^2}}; \quad (9.6)$$

Установившийся ток КЗ имеет пульсирующий характер.

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 9.3) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда

осуществляется от сети лаборатории напряжением 3x220 В. Подключение стенда к сети осуществляется трехфазной вилкой. На стенде смонтированы кнопки включения и отключения стенда, сигнальные лампы включенного и отключенного положения стенда, а также необходимые приборы для измерений.

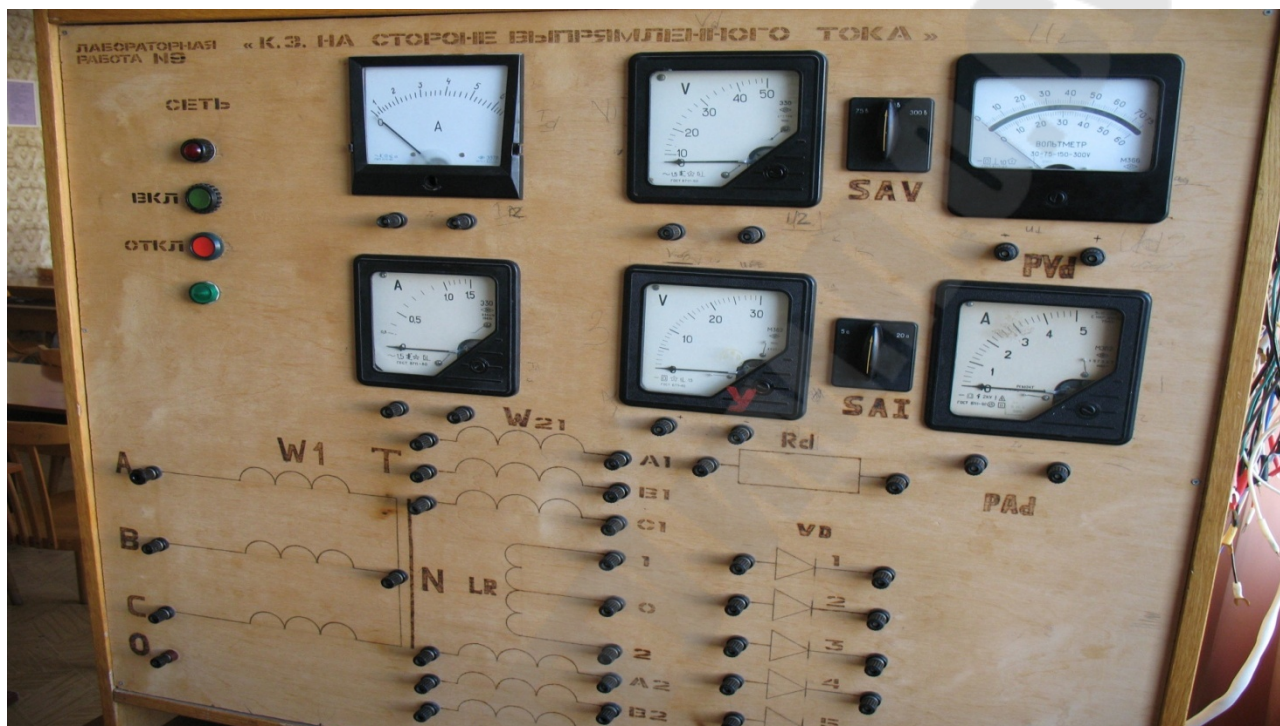


Рисунок 9.3 – Лабораторный стенд к ЛР№9

4. Порядок выполнения работы

4.1. Мостовая схема

1. Собрать схему испытания мостовой трехфазной схемы выпрямления, приведенной на рисунке 9.4.
2. Включить стенд, записать показания приборов в таблицу 9.2.
3. Вычислить значения U_d/U_2 ; и сравнить результаты вычислений с аналогичными отношениями, приведенными в таблице 9.1. Результаты вычислений записать в таблицу 9.2.

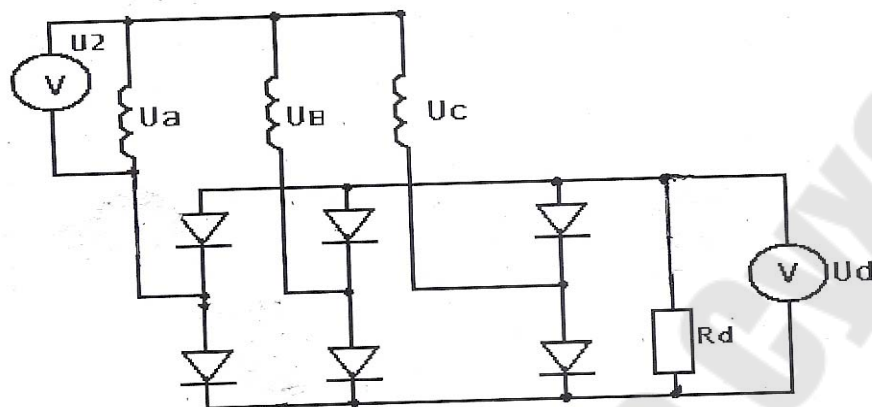


Рисунок 9.4 – Подключение приборов для испытания мостовой схемы

Результаты измерений и вычислений Таблица 9.2

Измеренные величины	Схема выпрямления	
	Мостовая	С уравнительным реактором
$U_2, В$		
$U_d, В$		
Вычисленные величины		
U_d/U_2		
U_d/U_2 (табл. 9.1)		

4.2. Схема с уравнительным реактором

1. Собрать схему испытания схемы с уравнительным реактором (рисунок 9.5), соблюдая полярность вторичных обмоток трансформатора.
2. Включить стенд, записать показания приборов в таблицу 9.2.
3. Вычислить значения U_d/U_2 ; и сравнить результаты вычислений с аналогичными отношениями, приведенными в таблицы 9.1. Результаты вычислений записать в таблицу 9.2.

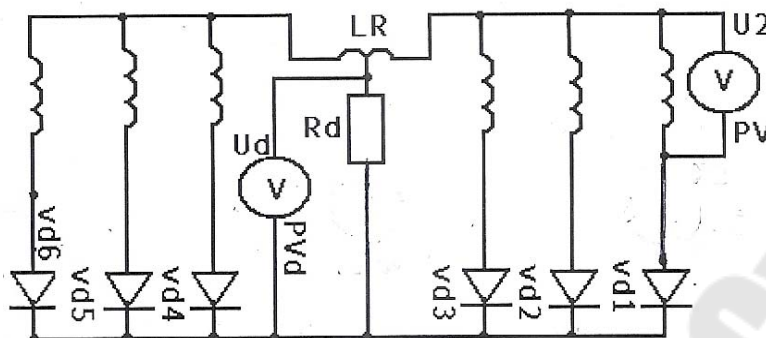


Рисунок 9.5 – Подключение приборов для испытания схемы с уравнительным реактором

Пример 9.1. Рассчитать ток КЗ на стороне выпрямленного тока полупроводникового преобразовательного агрегата с $U_d = 515\text{В}$.

Номинальный выпрямленный ток $I_d = 2000\text{ А}$; номинальная мощность трансформатора выпрямительного агрегата по данным завода-изготовителя $S_{HT} = 1210\text{ кВ}\cdot\text{А}$; напряжение КЗ трансформатора $U_k = 6,6\%$; мощность потерь КЗ $P_k = 20\text{ кВт}$; напряжение питающей сети 6 кВ и мощность КЗ питающей системы $S_{kc} = 157\text{ МВ}\cdot\text{А}$, схема соединения вторичных обмоток трансформатора – мостовая и с уравнительным реактором.

Решение

1. Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_{2\phi} = 515/1.17 = 440\text{ В}$.

2. Принимаем базисное напряжение $U_b = U_{2\phi} = 440\text{ В}$.

3. Индуктивное сопротивление питающей системы, приведенное к U_b :

$$x_{bc} = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_2)^2}{S_{kc}} = \frac{(\sqrt{3} \cdot 0,44)^2}{157} = 0,0037\text{ Ом.}$$

4. Индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к U_b :

$$x_{бГ1} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{(\sqrt{3}U_b)^2}{S_{HT}} = \frac{6,6 \cdot (\sqrt{3} \cdot 0,44)^2}{100 \cdot 1,21} = 0,032\text{ Ом.}$$

5. Активное сопротивление трансформатора (P_k , кВт; S_{HT} , кВ·А):

$$R_{бГ4} = \frac{P_k}{S_{HT}} \cdot \frac{U_b^2}{S_{HT}} = \frac{20}{1210} \cdot \frac{440^2}{1210 \cdot 1000} = 0,0264\text{ Ом.}$$

6. Активное сопротивление ошиновки, аппаратуры, переходных и разъемных контактов и переходного сопротивления в месте КЗ:

$$R_{II} = 0,015\text{ Ом.}$$

7. Суммарное индуктивное сопротивление до точки К:

$$x_c = x_{bc} + x_{бГ4} = 0,0037 + 0,032 = 0,0357\text{ Ом.}$$

8. Суммарное активное сопротивление:

$$R_c = 0.0264 + 0.015 = 0.0414 \text{ Ом.}$$

9. Ток КЗ в точке К:

$$I_{dk} = 2,7 \frac{U_{2\phi}}{\sqrt{R_c^2 + x_c^2}} = 2,7 \frac{440}{\sqrt{0,0357^2 + 0,0414^2}} = 2,7 \frac{440}{0,0547} = 21718 \text{ А.}$$

Таблица 9.3 – К Задаче 9.1

№ брига- ды	I_d, A	S_T, kVA	$U_{KT}, \%$	$P_K, кВт$	$U_{сис}, кВ$	S_{KC}, MVA
1	1000	1200	5.5	20	6	100
2	1200	1300	6.5	22	10	120
3	1400	1500	7.5	26	35	130
4	1600	1800	7.0	30	10	140
5	1800	2000	6.5	35	6	150
6	2000	2200	6.0	40	10	160
7	2200	2400	5.5	50	35	180

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схемы испытаний мостовой схемы и схемы с уравнивающим реактором.
3. Результаты испытаний и вычислений в табличной форме.
4. Решение задачи 9.1 при мостовой схеме и схеме с уравнивающим реактором, по техническим данным таблицы 9.4. Номер варианта соответствует номеру бригады.
5. Письменный ответ на вопросы 4, 5.

6. Контрольные вопросы

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

При какой схеме выпрямления ток КЗ будет больше при прочих одинаковых условиях? Содержание

1. Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n-0 .
2. Простые замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью.
3. Двухфазное короткое замыкание
4. Однофазное короткое замыкание
5. Измерение электрических величин и снятие векторных диаграмм в системе электроснабжения с помощью вольтамперфазометра
6. Продольная несимметрия
7. Двухфазное короткое замыкание на землю
8. Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n-11
9. Короткое замыкание на стороне выпрямленного тока Короткое замыкание на стороне выпрямленного тока

Евминов Леонид Иванович

**ЭЛЕКТОМАГНИТНЫЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
для студентов специальностей
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 10.03.22.

Рег. № 83Е.

<http://www.gstu.by>