

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Электроснабжение»

Л. И. Евминов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

ПРАКТИКУМ

по одноименному курсу

для студентов специальности 1-43 01 02

«Электроэнергетические системы и сети»

дневной формы обучения

Гомель 2015

УДК 621.311.018.782.3(075.8)
ББК 31.27-016.2я73
Е19

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 7 от 25.03.2014 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод»
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. В. Тодарев*

Евминов, Л. И.
Е19 Электромагнитные переходные процессы : практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / Л. И. Евминов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 92 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.

Содержит девять лабораторных работ по протеканию электромагнитных переходных процессов в реальных системах электроснабжения.

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.311.018.782.3(075.8)
ББК 31.27-016.2я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2015

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-0 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 $Y/\Delta-11$.

2.2. Векторные диаграммы при наличии трансформации

При наличии в электрической цепи силовых трансформаторов необходимо ввести дополнительные условия, для того чтобы сопоставлять 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 рис. 1.1., а между источником ЭДС и нагрузкой включим 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.

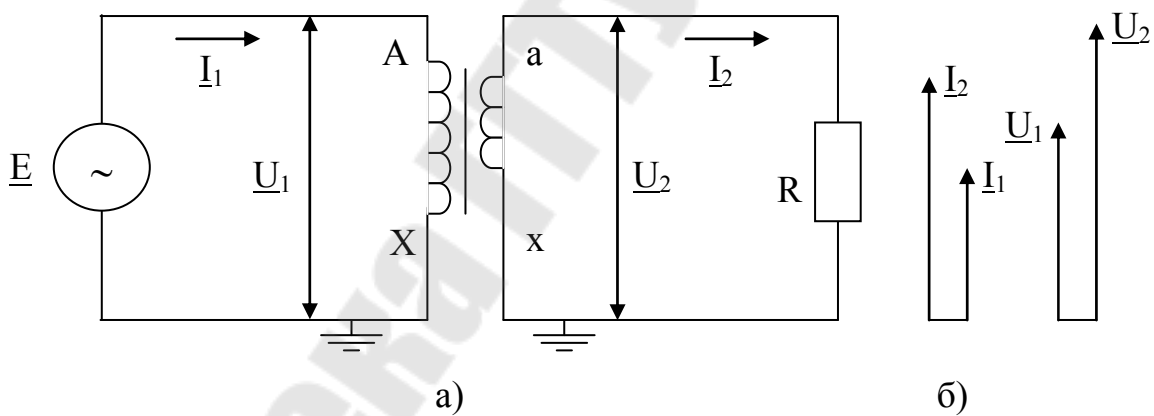


Рис. 1.1. Принцип работы трансформатора (а) и определение условных положительных направлений токов и напряжений в обмотках трансформатора; б — схема цепи; в — диаграмма токов и напряжений в обмотках трансформатора

На рис. 1.1, б показаны положительные направления токов в обмотках силового трансформатора. В первичной обмотке положительным считается направление тока от начала к концу, 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 транс-

форматора и непосредственном подключении нагрузки к генератору (рис. 1.1). При этом, поскольку магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе трансформатора обоими токами (первичным и вторичным), направлены встречно (рис. 1.1, а), для идеального трансформатора, пренебрегая током намагничивания, можно записать следующее равенство:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 0 \text{ или через магнитодвижущие силы } I_1 W_1 - I_2 W_2 = 0, \quad (1.1)$$

где Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки в магнитопроводе трансформатора;
 $I_1 W_1$ и $I_2 W_2$ – магнитодвижущие силы (МДС), 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 \underline{I}_1 и \underline{I}_2 имеют одинаковые знаки и, следовательно, будут совпадать по направлению (рис. 1.1, в). Таким образом, условно принятые положительные направления токов в обмотках трансформатора удобны тем, что векторы первичного и вторичного токов на векторной диаграмме совпадают по направлению (рис. 1.2, в). Для напряжений также удобно принять такие положительные направления, чтобы векторы первичного и вторичного напряжений на обмотках совпадали, как показано на рис. 1.1, в.

2.3. 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 рис. 1.2 при симметричной нагрузке по фазам или при трехфазном КЗ. Угловые смещения токов и напряжений по фазам на стороне I обмотки и II обмотки отсутствуют

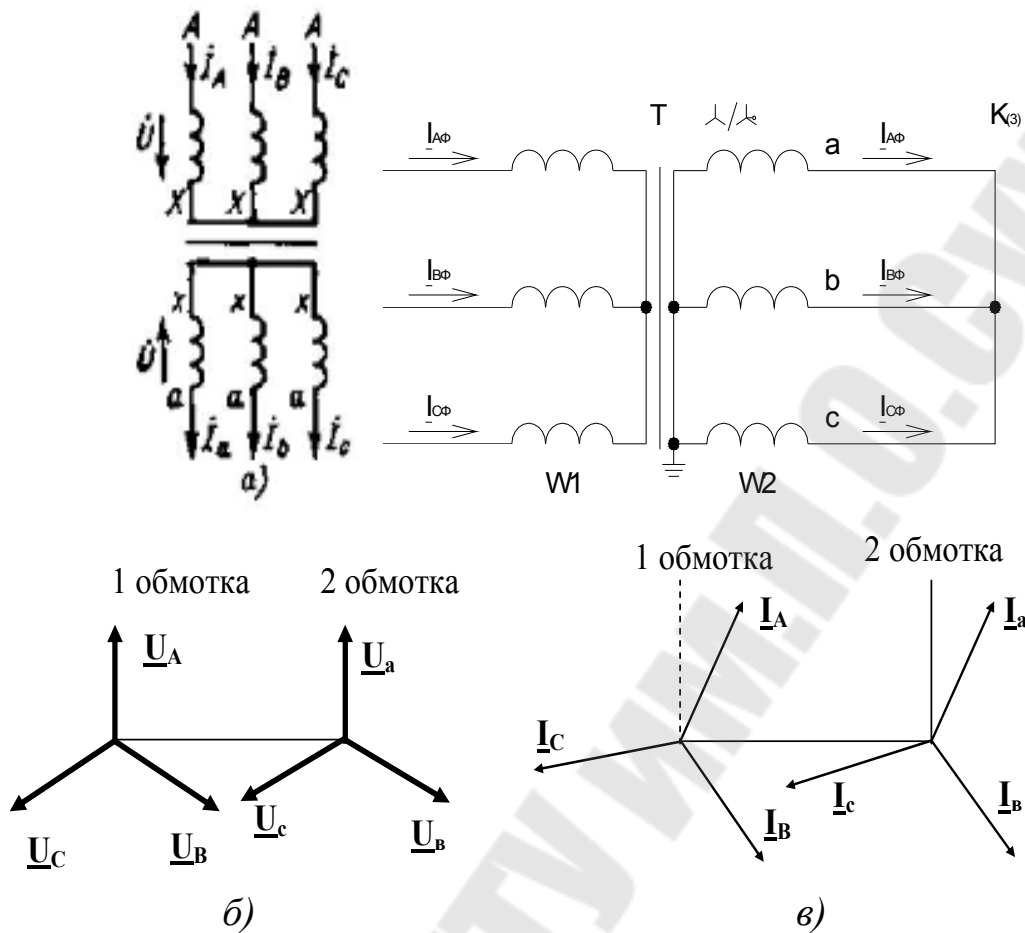


Рис. 1.2. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y_n-0 , а – схема соединения обмоток; б – векторная диаграмма напряжений; в – векторная диаграмма токов при $K_T=1$

Анализируя векторные диаграммы напряжений (рис. 1.2,б) и токов (рис. 1.2,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.

2.4. Распределение токов при трехфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Y_n-0 (рис.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 $I_{\text{ПОНН}}^{(3)}$, протекающий в любой фазе при трехфазном КЗ на стороне НН трансформатора Т определяется

$$I_{a\phi}^{(3)} = I_{b\phi}^{(3)} = I_{c\phi}^{(3)} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma}}, \text{ А}, \quad (1.4)$$

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

Z_{Σ} – полное сопротивление цепи КЗ (питающей системы и трансформатора Т), приведенное к стороне Y_0 , Ом.

Расчитанные токи трехфазного КЗ за трансформатором на стороне низшего напряжения должны быть пересчитаны на сторону высшего напряжения через коэффициент трансформации трансформатора Т K_{T}

$$I_{\text{ПОВН}}^{(3)} = \frac{I_{\text{ПОНН}}^{(3)}}{K_{\text{T}}}. \quad (1.5)$$

При построении векторных диаграмм напряжений и токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рис.1.2, б, в) для простоты условно принят коэффициент трансформации трансформатора $K_{\text{T}} = 1$.

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 а, в и с звезды $Y_{\text{н}}$ за трансформатором со схемой $Y/Y_{\text{н}}-0$ токи КЗ одинаковые в фазах по величине протекают во всех трех фазах;

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

2.5. Распределение токов при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой $Y/Y_{\text{н}}-0$

При двухфазном КЗ в точке $K^{(2)}$ между фазами в и с звезды за трансформатором со схемой $Y/Y_{\text{н}}-0$ токи КЗ одинаковые по величине протекают в двух фазах. Вектора фазных токов при этом сдвинуты на угол 180° (рис.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 Т, соединенной $Y_{н}$, Ом.

Ток КЗ, протекающий в фазе 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 $Y/Y_{н}-0$ сдвиг по фазе между токами вторичной и первичной обмоток трансформатора равен 0° (рис.1.3, б, в). Для простоты при построении векторных диаграмм токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рис.1.3, б, в) условно принимаем коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y и $Y_{н}$ равно 1.

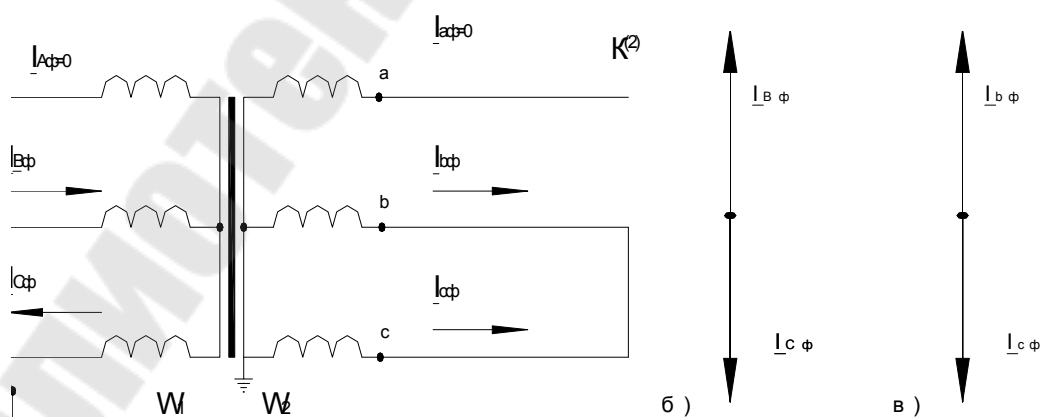


Рис.1.3. Распределение токов (а) и векторные диаграммы токов вторичной (в) и первичной обмоток (б) при двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток $Y/Y_{н}-0$ и $K_T = 1$.

2.6. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Y/Y_H-0

Рассмотрим распределение токов на стороне звезды трансформатора с соединением обмоток Y/Y_H-0 при однофазном КЗ в точке $K^{(1)}$ на стороне звезды НН (рис.1.4). Для простоты принимаем, что коэффициент трансформации трансформатора $K_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y и Y_H равно 1.

При однофазном КЗ за трансформатором 6(10)/0,4 кВ схемой соединения обмоток Y/Y_H-0 ток КЗ на стороне НН проходит только в поврежденной фазе a (рис.1.4).

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

$$I_{ВНА}^{(1)} = 2/3 \cdot I_{НН}^{(1)} / K_T; \quad I_{ВНВ}^{(1)} = I_{ВНС}^{(1)} = -1/3 \cdot I_{НН}^{(1)} / K_T, \quad (1.8)$$

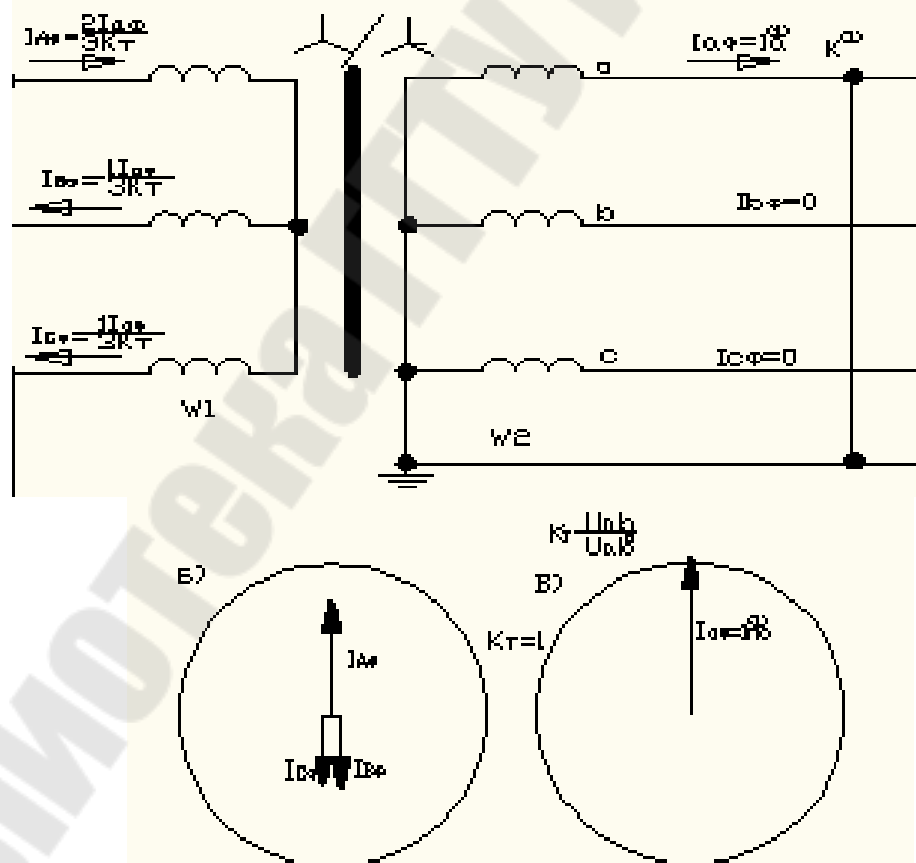


Рис.1.4. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Y/Y_H-0 и $K_T = 1$.

3. Описание лабораторного стенда

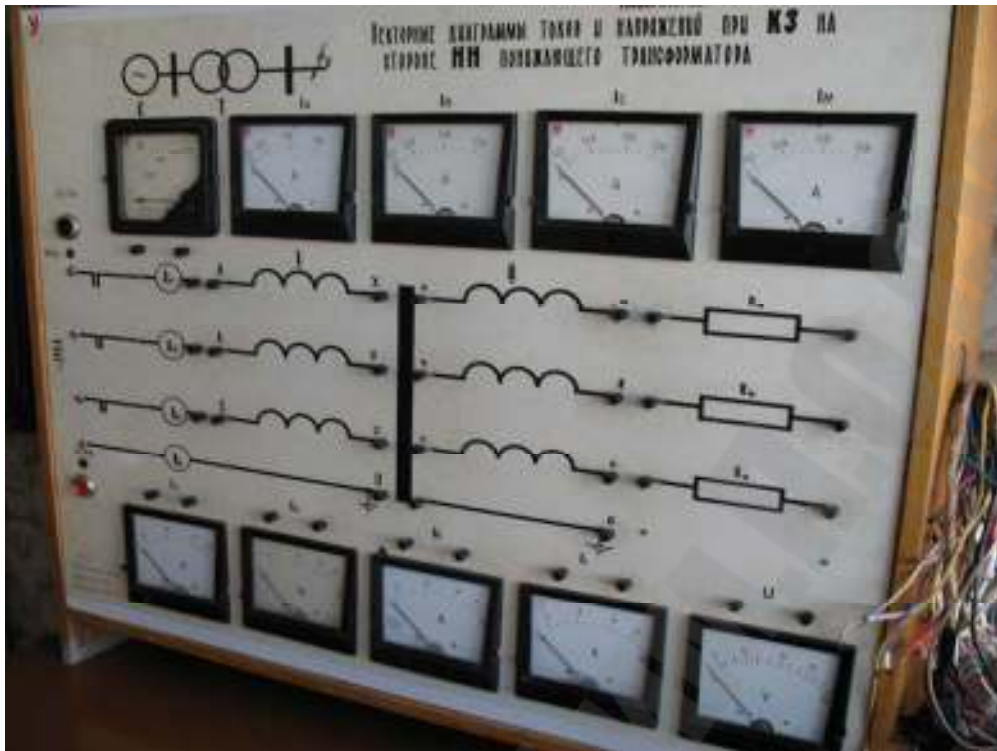


Рис.1.5. Внешний вид лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис.1.5) питается от сети напряжением 3×220 В от 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. Мнемоническая схема стенда приведена на рис.1.5.

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. В соответствии со схемой, составленной в п.1, соединить обмотки трансформатора в группу Y/Y_n-0 , предусмотрев в ней подключение измерительных приборов для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.

3. С помощью трехфазной вилки подать напряжение на стенд. Включить стенд, нажав кнопку черного цвета на стенде. При этом загорится красная сигнальная лампа на стенде.

4. Измерить линейные напряжения со стороны НН и ВН трансформатора. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

5. Вычислить коэффициент трансформации K_T трансформатора Т по выражению (1.3). Результаты вычислений занести в таблицу 1.1.

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

7. Включить стенд. При КЗ трех фаз на вторичной стороне трансформатора снять показания приборов первичной и вторичной стороны и записать показания приборов в табл. 1.2 и 1.3.

8. Отключить стенд.

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	$K_{T,ср} =$					

9. Вычислить величины токов и напряжений первичной стороны трансформатора через $K_{T,ср}$, используя результаты измерений токов и напряжений на вторичной стороне. Результаты расчетов занести в таблицу 1.2. Сравнить результаты расчетов и измерений.

10. Построить по результатам измерений векторные диаграммы фазных токов, а также фазных и линейных напряжений на первичной и вторичной стороне трансформатора.

11. Выполнить двухфазное КЗ, перемкнув две клеммы выхода резисторов R . (Варианты закорачиваемых фаз заданы в табл. 1.4)

12. Повторить пункты 7, 8, 9, 10 при двухфазном КЗ. (Результаты измерений занести в табл. 1.2, 1.3.)

13. Выполнить однофазное КЗ, перемкнув клемму выхода резистора R на нейтраль трансформатора. (Варианты закорачиваемой фазы заданы в табл. 1.4)

14. Повторить пункты 7, 8, 9, 10 при однофазном КЗ. Результаты измерений занести в табл. 1.2, 1.3.

Таблица 1.2

Результаты измерений

Первичная сторона						
Измеряемая 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

Вторичная сторона			
Измеряемая величина	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
	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 табл. 1.3.

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 работы.
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 1.2 и 1.3.
4. Построенные по результатам измерений векторные диаграммы токов, фазных и линейных напряжений вторичной и первичной обмоток, выполненных в масштабе для трехфазного, двухфазного и однофазного коротких замыканий.

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 $K_T = 10$?

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 $K_T = 10$?

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 $K_T = 10$?

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 (рис. 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.

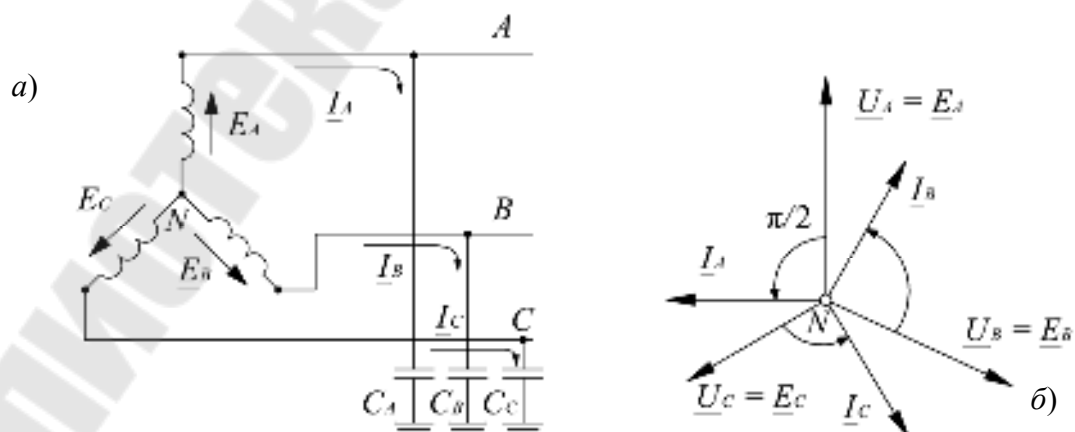


Рис. 2.1. Нормальный режим сети с изолированной нейтралью (а) и векторная диаграмма напряжений и токов (б)

Емкости между фазами для простоты не показаны, так как их влияние на ток замыкания незначительно и ими можно пренебречь. Емкостные проводимости элементов электрической системы значительно 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 (рис. 2.2, 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 (рис.2.1, б)

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

2.2. Режим замыкания на землю одной фазы

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

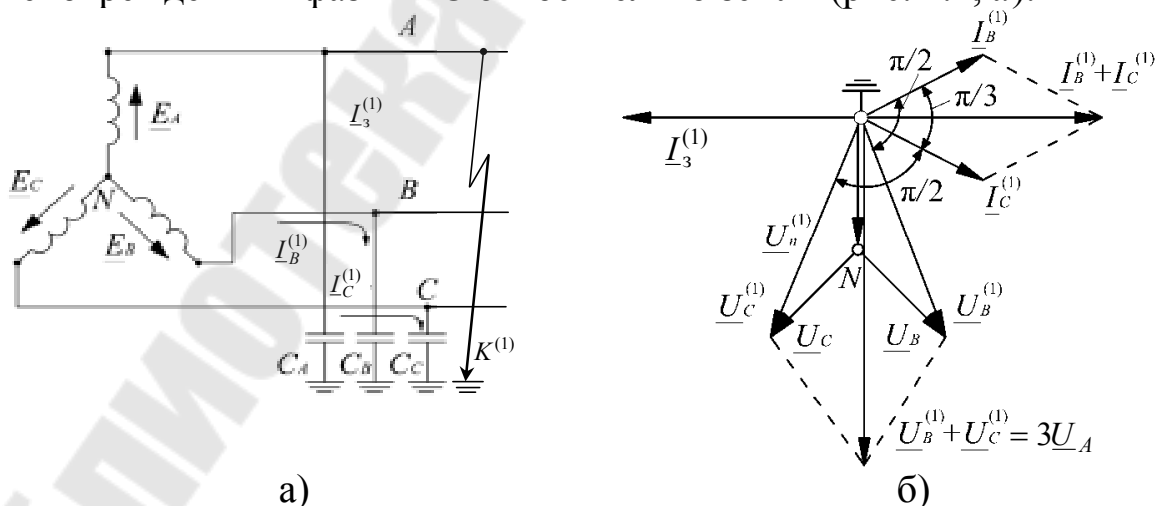


Рис.2.2. Режим замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б)

Проследим путь циркуляции тока замыкания на землю. На рис. 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 справа от места замыкания отсутствует.

При металлическом замыкании на землю ток I_A в емкости поврежденной фазы C_A 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 рис. 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 \underline{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 \underline{I}_3 , \underline{I}_B и \underline{I}_C проходят в соответствующих фазах поврежденной линии на участке между источником питания и местом присоединения конденсаторов схемы (рис. 2.2,б). Они представляют собой уравновешенную систему трех векторов, не содержащую токов нулевой последовательности

$$(\underline{I}_3 + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0).$$

На участке же между точкой повреждения К и местом присоединения конденсаторов проходит только ток I_3 по поврежденной фазе.

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:

$$\underline{I}_3 = 3 \frac{\underline{U}\phi.}{R_d - jX_{c\Sigma}}, \quad (2.4)$$

где $X_{c\Sigma}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания; $\underline{U}\phi.$ – фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю. Наибольшая величина тока замыкания на землю имеет место при металлическом замыкании ($R_d = 0$) и определяется по формуле(2.3).

Рассмотрим распределение напряжений с применением симметричных составляющих. При металлическом замыкании какой-либо фазы на землю напряжения фаз относительно земли изменяются, оставаясь неизменными относительно нейтрали системы N .

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 (рис 2.2, б).

Систему двух векторов \underline{U}_B и \underline{U}_C можно разложить на составляющие прямой \underline{U}_1 и нулевой \underline{U}_0 последовательностей. При $\underline{U}_A = 0$.

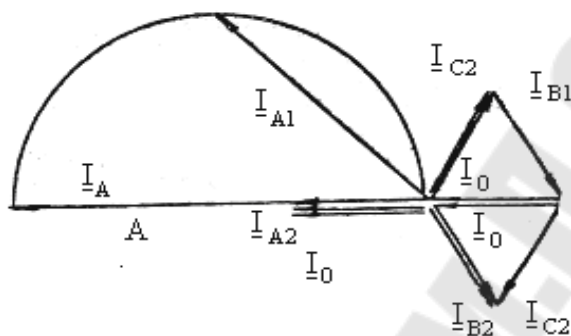
$$\begin{aligned} \underline{U}_{1A} &= (a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C)/3 = \underline{U}_A; \\ \underline{U}_{2A} &= (a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C)/3 = \underline{U}_A; \\ \underline{U}_{0A} &= \underline{U}_{0B} = \underline{U}_{0C} = \underline{U}_{0K} = (\underline{U}_B + \underline{U}_C)/3 = -\underline{U}_A; \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таким образом, 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 (рис. 2.2,б).

а)



б)

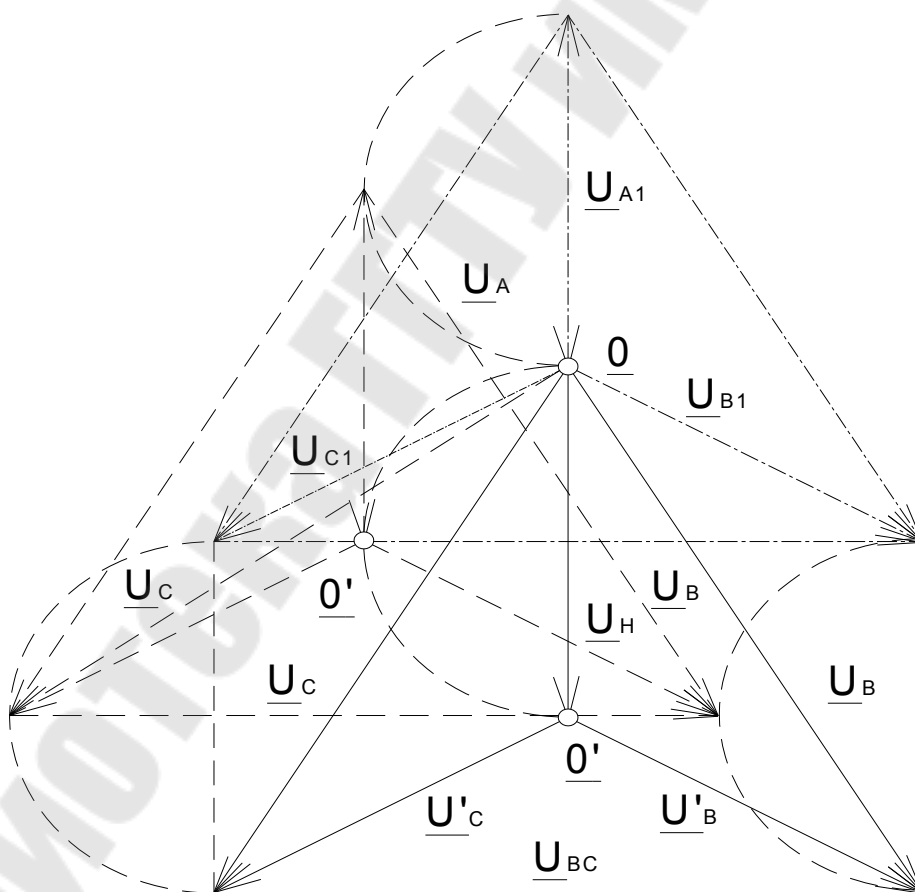


Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов и напряжений в месте простого замыкания на землю при замыкании фазы А на землю

Векторная диаграмма напряжений представлена на рис. 2.3, б. 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 $\underline{U}_{\text{Фз}}$ также скользят по полуокружностям, пристроенным к концам векторов исходных фазных напряжений (на рис.2.3 пунктиром показано положение векторов при $R_{\Pi} / X_{C\Sigma\text{сети}} = 1$).

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

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

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис. 2.4) 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. Мнемоническая схема стенда приведена на рис.2.4.



Рис.2.4. Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

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

Таблица 2.1

Варианты заданий

№ бригады	Количество секций ЛЭП	Фаза, замкнутая на землю	ЛЭП	Положение реостата R_d
1	1	А	Воздушная	1
2	2	В	Кабельная	2
3	1	С	Воздушная	3
4	2	А	Кабельная	4
5	1	В	Воздушная	5
6	2	С	Кабельная	6
7	1	А	Воздушная	4
8	2	В	Кабельная	2

2. Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали U_N нормального режима холостого хода ЛЭП. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

3. По данным измерений в масштабе построить векторную диаграмму напряжений нормального режима.

4. Собрать схему рис. 2.5, а с замыканием на землю фазы в соответствии с вариантом задания (табл. 2.1).

5. Измерить линейные и фазные напряжения, напряжение смещения нейтрали U_N , ток замыкания на землю I_3 . Результаты измерений внести в табл. 2.2.

6. По данным измерений в том же масштабе на векторной диаграмме, полученной в п. 3, построить векторную диаграмму напряжений режима замыкания на землю фазы из табл. 2.1.

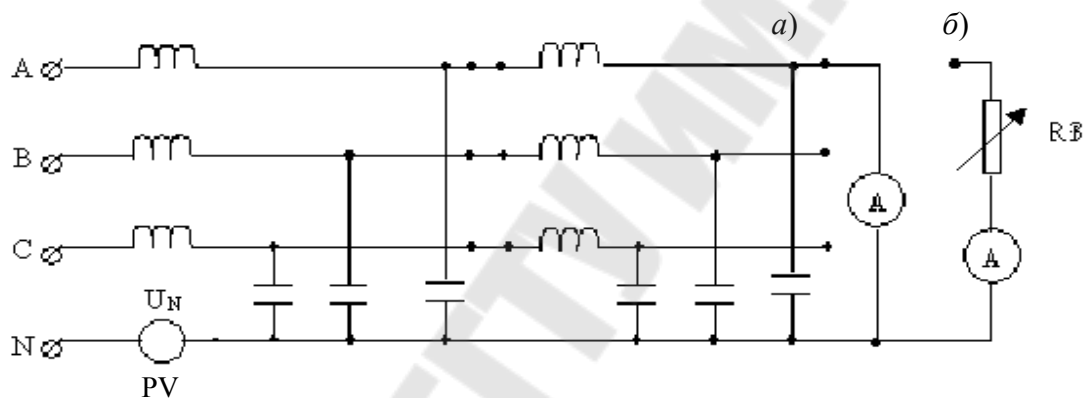


Рис. 2.5. Схема замыкания фазы на землю: а – металлическое замыкание на землю; б – замыкание через сопротивление R_3

7. По измеренному значению тока I_3 , используя метод симметричных составляющих, построить в масштабе векторную диаграмму токов.

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			

8. Для заданной фазы произвести замыкание на землю через сопротивление R_d (рис. 2.5, б). Величина сопротивления R_d должна соответствовать варианту задания (табл. 2.1). Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

9. Построить векторную диаграмму напряжений и токов при замыкании на землю через сопротивление R_d .

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Результаты измерений токов, напряжений при нормальном режиме работы сети и при различных повреждениях в табличной форме (табл. 2.2).
3. Векторные диаграммы напряжений и токов в нормальном режиме работы сети, выполненные по результатам измерений на миллиметровой бумаге в масштабе
4. Векторные диаграммы напряжений и токов при металлическом замыкании одной фазы на землю, выполненные по результатам измерений на миллиметровой бумаге в масштабе.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов при замыкании одной фазы на землю через сопротивление R_d , выполненные на миллиметровой бумаге в масштабе 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 КЗ.

2. Краткая теория

2.1. Общие замечания

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

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

Сравнительно просто расчеты несимметричных режимов в трехфазных симметричных сетях осуществляются с помощью метода симметричных составляющих. Вычисление токов и напряжений 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.

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 рис. 3.1 показан пример разложения несимметричной системы на симметричные составляющие.

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

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

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

На основании принципа независимости действия симметричных составляющих, который состоит в том, что в симметричной

трехфазной системе напряжение любой последовательности может вызвать только токи одноименной последовательности.

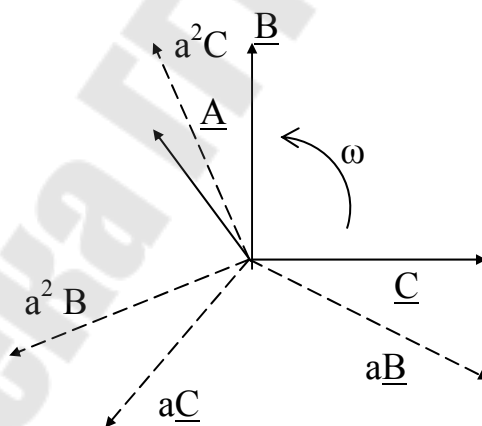
В соответствии с вышеизложенным, для произвольного несимметричного КЗ основные уравнения второго закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности будут иметь вид:

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

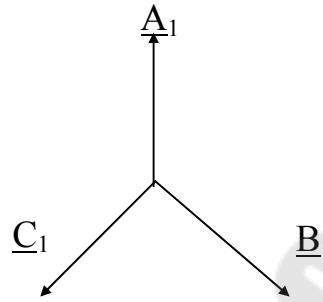
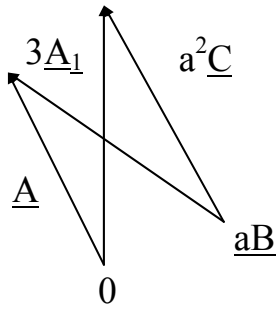
где $\underline{U}_{K1}, \underline{U}_{K2}, \underline{U}_{K0}, \underline{I}_{K1}, \underline{I}_{K2}, \underline{I}_{K0}$ – симметричные составляющие напряжений и токов; \underline{E}_{Σ} – результирующая ЭДС; $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ – результирующие сопротивления схем соответствующих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

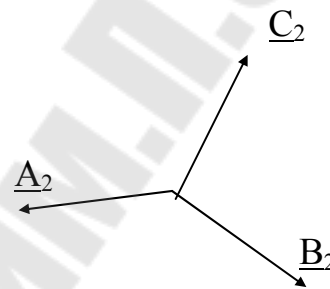
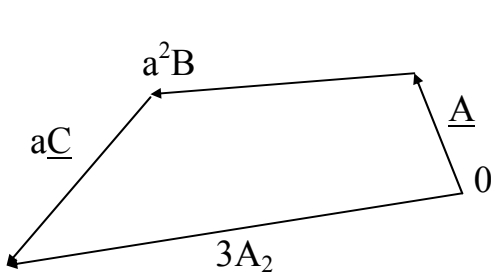
Исходная система



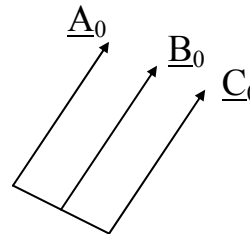
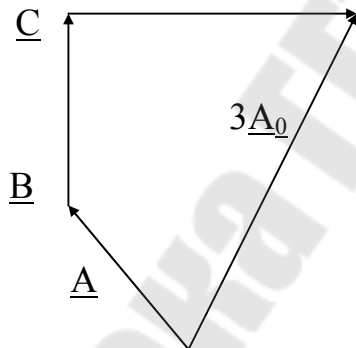
Прямая последовательность $3\underline{A}_1 = \underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}$.



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



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



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

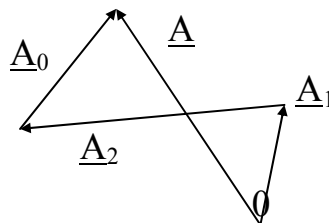


Рис. 3.1. Разложение несимметричной системы трех векторов на симметричные составляющие

2.3. Двухфазное короткое замыкание

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

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

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

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

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

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

Откуда

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

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

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

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

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

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

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

Фазные напряжения в месте КЗ:

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

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

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

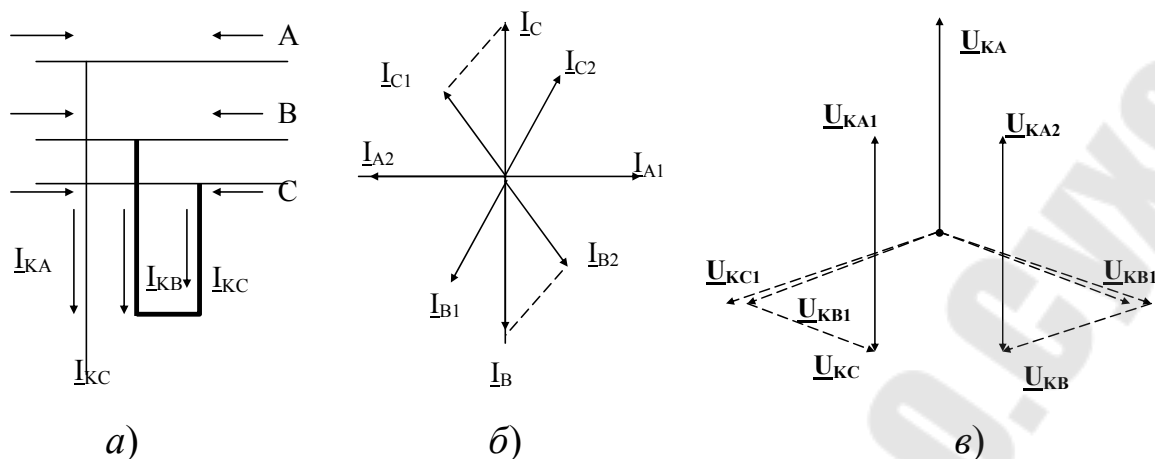


Рис. 3.2. Принципиальная схема (а), векторная диаграмма токов (б) и напряжений (в) двухфазного КЗ

3. Описание лабораторного стенда.

Лабораторный стенд (рис.3.3) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3х220 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.



Рис. 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 рис. 3.4

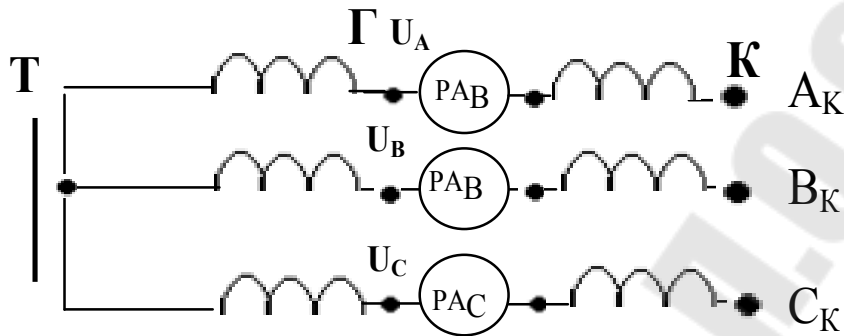


Рис. 3.4. Схема для измерения параметров двухфазного КЗ

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 A, B, C . Результаты измерений занести в табл. 3.1.

4. При двухфазном КЗ измерить линейные и фазные напряжения в точках K и Γ . Результаты измерений занести в табл. 3.1.

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

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

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений

	Измеренные величины											
	Фазные токи			Линейные напряжения						Фазные напряжения		
				Точка K			Точка Γ					
	$I_{a,A}$	$I_{b,A}$	$I_{c,A}$	$U_{ab,B}$	$U_{bc,B}$	$U_{ca,B}$	$U_{AB,B}$	$U_{BC,B}$	$U_{CA,B}$	U_a,B	U_b,B	U_c,B
$A_K - B_K$ (нечетн. бриг.)												
$A_K - C_K$ (четн. бриг.)												

Вычисленные величины					
Токи		Напряжения		Линейные напряжения	
I_1, A	I_2, A	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_{\text{AB}}, \text{В}$	$U_{\text{CA}}, \text{В}$

5. В масштабе построить векторную диаграмму токов, используя вычисленные данные п. 5.
6. В масштабе построить векторные диаграммы напряжений по данным вычислений п. 6 для точки K и для точки Γ по данным измерений п. 4.
7. Из построенной векторной диаграммы найти линейные напряжения $U_{\text{AB}}, U_{\text{BC}}, U_{\text{CA}}$ и занести их значения в табл. 3.1.

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Исходная схема с указанием граничных условий двухфазного КЗ.
3. Таблица измеренных и вычисленных величин.
4. Векторные диаграммы тока и напряжения, построенные в масштабе.
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?

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

Ознакомиться с теорией симметричных составляющих, изложенной в методических указаниях к лабораторной работе №3.

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

$$\underline{U}_{KA1} = E_{\Sigma} - j\underline{I}_{KA1} \cdot X_{1\Sigma};$$

$$\underline{U}_{KA2} = 0 - j\underline{I}_{KA2} \cdot X_{2\Sigma};$$

$$\underline{U}_{KA0} = 0 - j\underline{I}_{KA0} \cdot X_{0\Sigma},$$

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 (рис. 4.1,а) в сети с глухозаземлённой нейтралью граничными условиями будут:

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

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 (4.1): $\underline{I}_{KA} = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA}$;

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:

$$\underline{I}_{KA} = 3\underline{I}_{KA1} \cdot \underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA0} = \frac{1}{3}\underline{I}_{KA} \quad (4.2)$$

Напряжение поврежденной фазы A :

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

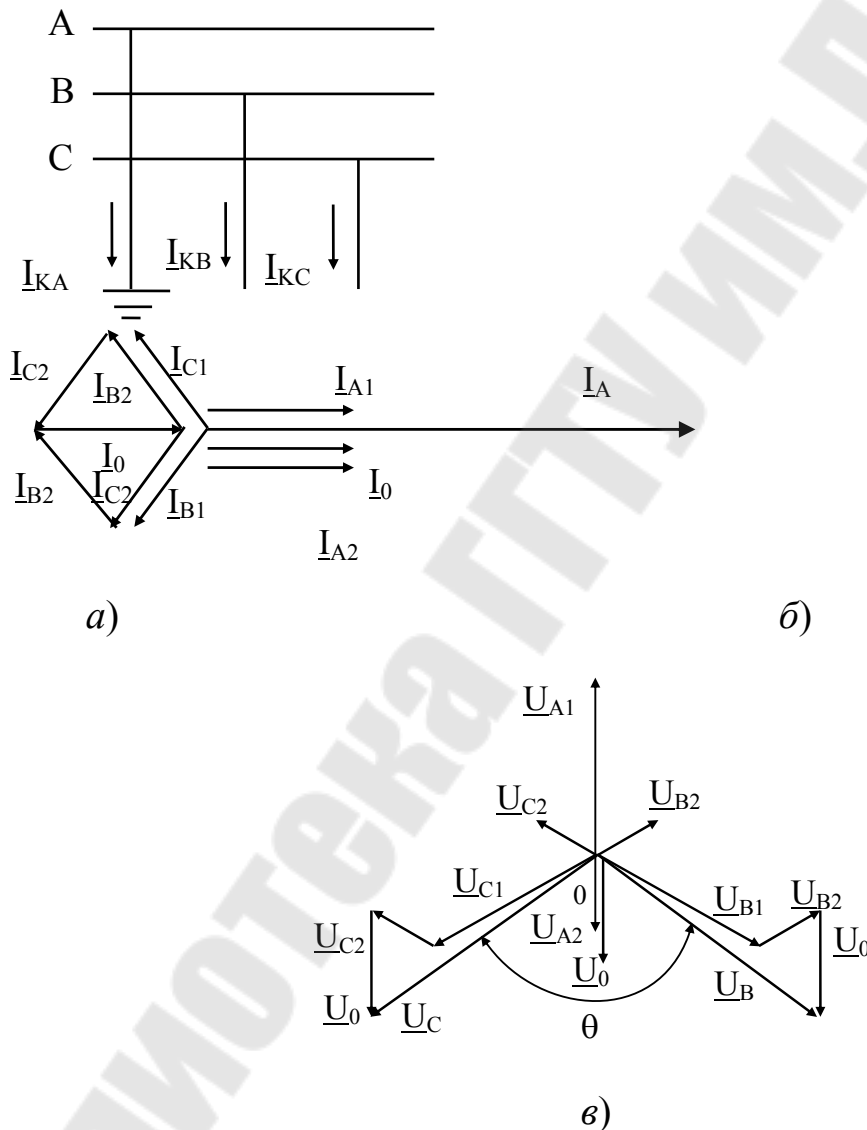


Рис. 4.1. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б), напряжений (в) однофазного КЗ

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания:

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

Фазные напряжения в месте короткого замыкания:

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

Выражения (4.2) и (4.3) позволяют построить векторные диаграммы токов (рис.4.1, б) и напряжений (рис.4.1, в).

На векторной диаграмме напряжений (рис. 4.1,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 (рис.4.2) представляет модель системы электроснабжения с понижающим трансформатором. Питание стенда осуществляется от сети лаборатории напряжением 3х220 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.

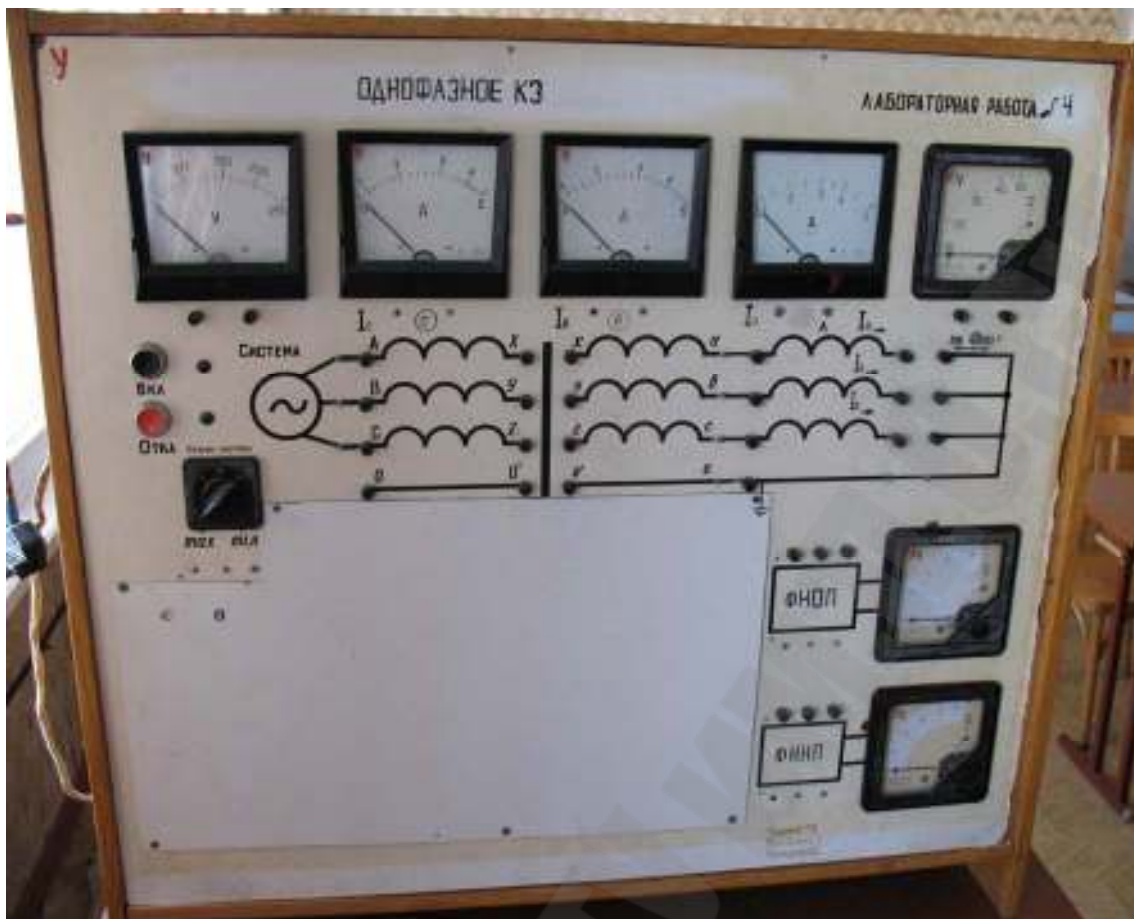


Рис.4.2. Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теорией симметричных составляющих (ЛР.2).
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.
3. Собрать схему испытаний на стенде, приведенную на рис. 4.2. В табл. 4.1 указаны положение ключа П1 режима работы питающей системы для производства измерений и фаза, на которой производится КЗ. (Номер варианта задания соответствует номеру бригады)

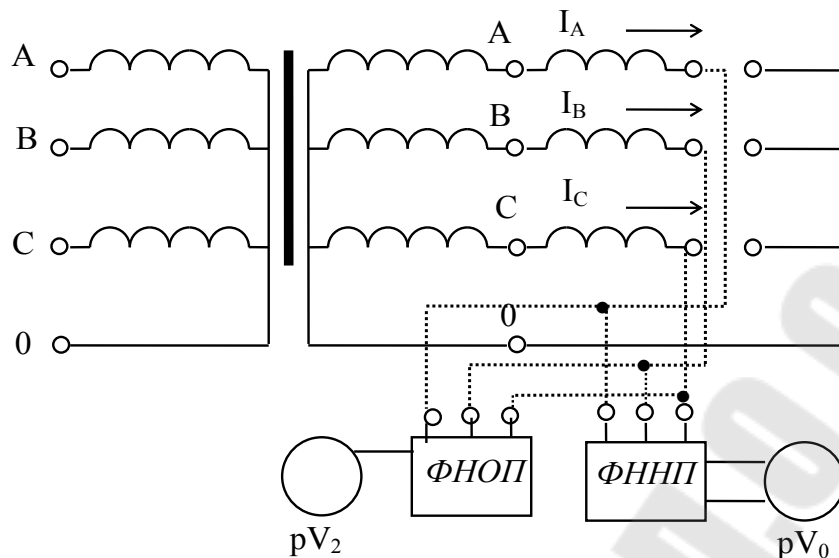


Рис. 4.3. Схема для определения параметров однофазного КЗ. ФНОП – фильтр напряжений обратной последовательности, ФННП - фильтр напряжений нулевой последовательности

4. Включить стенд и произвести измерения токов в фазах. Результаты измерений занести в табл. 4.2.

5. Вычислить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, протекающие в точке КЗ на основании теории симметричных составляющих. Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

6. Построить в масштабе по результатам измерений и вычислений векторную диаграмму токов, аналогичную приведенной на рис. 4.1, б.

7. В схему (рис. 4.3) подключить фильтры напряжений обратной ФНОП и нулевой (ФННП) последовательности. Подключение фильтров показано на рис. 4.3 пунктиром.

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 табл. 4.3.

9. В масштабе по результатам измерений и вычислений построить векторную диаграмму напряжений, аналогичную изображенной на рис. 4.1, в.

Таблица 4.1

Варианты заданий

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

Таблица 4.2

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

Таблица 4.3

Результаты измерений и вычислений

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	

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. Выводы из анализа однофазного КЗ.

6. Контрольные вопросы

1. При каком режиме работы нейтрали могут возникать однофазные КЗ?

2. Каковы граничные условия однофазного КЗ?
3. Из каких составляющих состоит ток при однофазном КЗ?
4. Какие измерения необходимо выполнить, чтобы определить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей?
5. Как вычислить напряжение при однофазном КЗ прямой, обратной и нулевой последовательностей?
6. Как построить векторную диаграмму токов однофазного КЗ?
7. Как построить векторную диаграмму напряжений при однофазном КЗ?

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 вольтамперфазометров (ВАФ) типа ВАФ-85 и ВАФ-ПАРМА в трехфазной системе электроснабжения.

2. Краткая теория

2.1. Вольтамперфазометр ВАФ-85

2.1.1. Назначение вольтамперфазометра ВАФ-85 и его технические характеристики

Прибор ВАФ-85 позволяет производить: определение чередования фаз, измерение значения и фазы напряжения и тока промышленной частоты. Большим преимуществом прибора ВАФ-85 является наличие у него токоизмерительных разъемных клещей, что позволяет производить измерения в цепях тока без их разрыва. Токоизмерительные клещи работают как трансформатор тока. Значения диапазонов измерений, классов точности, пределы допускаемых значений основной погрешности прибора указаны в табл.5.1.

Таблица 5.1

Технические характеристики ВАФ-85

Измеряемая величина	Диапазон измерений	Класс точности	Предел основной погрешности, %	Падение напряжения, мВ	Ток потребления не более, мА
Напряжение, В.	0,2-1	4,0	+4,0	-	0,5
	1-5				
	5-25				
	25-125				
	50-250				
100-500					
Ток (с разрывом цепи), мА	2-10	4,0	+4,0	50	
	10-50			20	
	50-250			20	
Ток (без разрыва цепи), мА	0,2-1	4,0	+4,0	2,5	2,5
	1-5				
	2-10				
Угол сдвига фаз, град	180 - 0 - 180	1,5	+1,5	-	100

2.1.2. Меры безопасности при работе с прибором

1. При работе с напряжением более 36 В необходимо подключать и отключать прибор при выключенном напряжении в исследуемой цепи. Не переключать прибор под напряжением.

2. Измерение тока с токоизмерительными клещами производить одной рукой во избежание прохождения тока через организм.

3. Все подключения производить только при выключенном из сети стенде.

2.1.3. Устройство и принцип действия

Прибор ВАФ-85 помещен в металлический корпус. На передней панели прибора размещены органы управления (рис.5.1). ВАФ-85 - многопредельный выпрямительный прибор. Ток в диапазонах 0,2-1; 1-5; 2-10 А измеряется без разрыва цепи с помощью токоизмерительных клещей, охватывающей проводник с током.

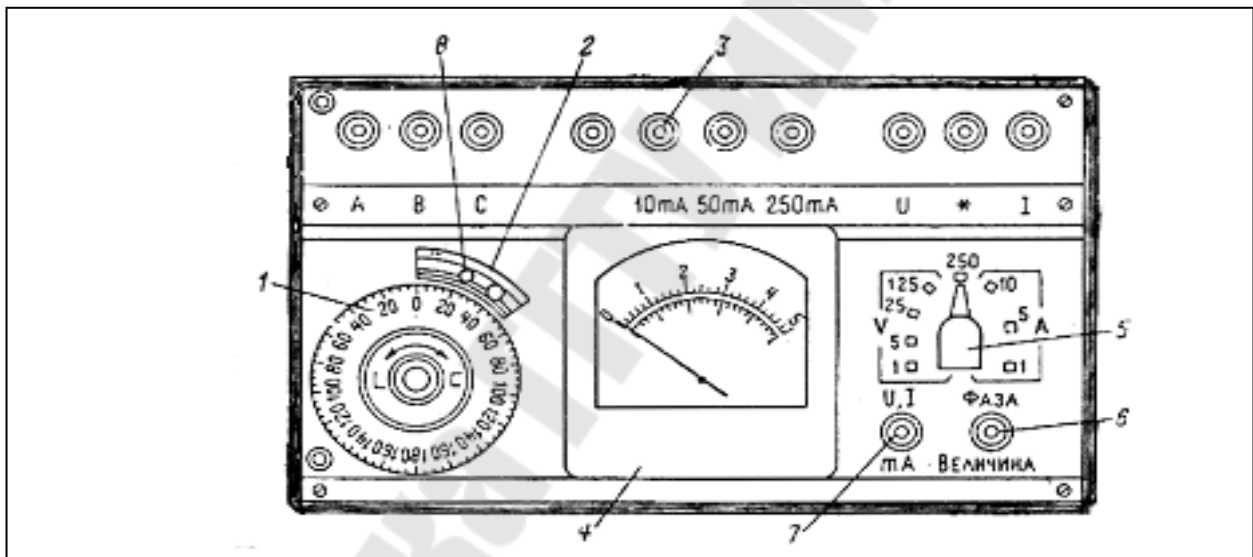


Рис.5.1. Передняя панель прибора ВАФ-85.

1 - лимб фазорегулятора; 2- подвижная планка; 3 - контактные зажимы; 4 - прибор; 5- переключатель пределов; 6- переключатель "фаза - величина"; 7 - переключатель U, I-мА; 8 - прижимной винт.

2.1.4. Подготовка прибора к работе и порядок работы

1. Для проверки правильности чередования фаз нажать кнопку верньера 9. При этом вращение свободной оси фазовращателя с лимбом по часовой стрелке указывает на правильность чередования фаз.

2. Установить или проверить правильность установки "нуля", для чего необходимо соединить перемычками клеммы фазы "А" с

"*", а фазы "В" с "U" (рис. 5.2) для измерения угла сдвига фазы по напряжению. При несовпадении нуля лимба с риской на планке установки "нуля", отпустить прижимной винт 8, установить риску планки 2 против нуля лимба 1 фазовращателя и зажать прижимной винт. Снять перемычки и приступить к измерению.

Примечание: проверку правильности установки "нуля" проводить перед каждым измерением.

3. При измерении тока в диапазонах 2-10; 10-50; 50-250 мА исследуемую цепь подсоединить к соответственно обозначенным зажимам "*" и "10 мА", или "50 мА", или "250 мА". Переключатель В,А/мА установить в положение мА, переключатель ВЕЛИЧИНА/ФАЗА – установить в положение ВЕЛИЧИНА. Отсчет производить по верхней шкале прибора.

4. Для измерения тока в диапазонах 0,2-1; 1-5; 2-10 А переключатель ВЕЛИЧИНА/ФАЗА установить в положение ВЕЛИЧИНА, а переключатель диапазонов измерений – в положение, соответствующее ожидаемому значению измеряемой величины, затем подсоединить соединительные провода к зажимам прибора. Переключатель В,А/мА установить в положение В,А. Ток измерять с помощью токоизмерительных клещей, которые вилкой присоединяются к контактными зажимам "*" и "А". При измерении тока или угла сдвига фаз меньше величины, допускаемой нижним диапазоном измерений, необходимо обвить клещи проводником с током (для этого необходимо предварительно разорвать токовую цепь), а показания прибора разделить на число витков, проходящих через окно клещей.

5. Для измерения напряжения в диапазонах 0,2-1; 1-5; 5-25; 25-125; 50-250 В Измеряемое напряжение подводится к контактными зажимам "*" и "U". Переключатель ВЕЛИЧИНА/ФАЗА установить в положение ВЕЛИЧИНА, а переключатель диапазонов измерений – в положение, соответствующее ожидаемому значению измеряемой величины, затем подсоединить соединительные провода к зажимам прибора. Переключатель В,А/мА установить в положение В,А. После окончания измерений установить переключатель диапазонов измерений в положение "500В" и отключить прибор от исследуемой цепи.

6. Для диапазонов измерений 0,2-1А и 0,2-1В отсчет производится по нижней шкале, на остальных диапазонах – по верхней шкале.

7. Для измерения угла сдвига фаз переключатель ВЕЛИЧИНА/ФАЗА установить в положение ФАЗА, а переключатель В, А/мА установить в положение В, А.

8. К контактным зажимам фаз "А", "В" и "С" подвести соответственно напряжение трехфазного тока 110 или 220 В. Переключатель диапазонов измерений установить в соответствующее положение ("125" или "250 В) в зависимости от величины подведенного к зажимам "А", "В" и "С" трехфазного напряжения.

9. Для измерения угла сдвига фаз по току отмеченная знаком "*" сторона токоизмерительных клещей должна быть обращена к генераторному концу токопровода; стержень соединительной вилки, имеющий обозначение "*", должен входить в контактный зажим, обозначенный "*" на приборе (рис. 5.3).

10. Процесс измерения угла сдвига фазы заключается во вращении лимба фазовращателя до тех пор, пока измерительный прибор не установится на нуль, после этого производить отсчет по лимбу. Угол установлен правильно, если при смещении лимба указатель измерительного механизма прибора движется в ту же сторону, что и лимб. При измерении угла сдвига фаз между двумя различными векторами вычисляется разность углов, полученных при двух измерениях.

11. При измерении угла сдвига фаз характер нагрузки определяется по соответствующему обозначению на лицевой панели прибора и лимба. Если лимб и указатель микроамперметра движутся против часовой стрелки, то нагрузка индуктивная, если по часовой стрелке то нагрузка емкостная.

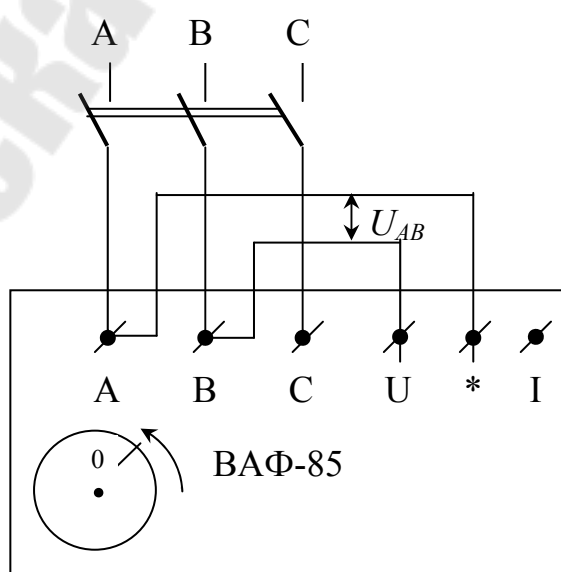


Рис.5.2. Проверка нулевого положения диска

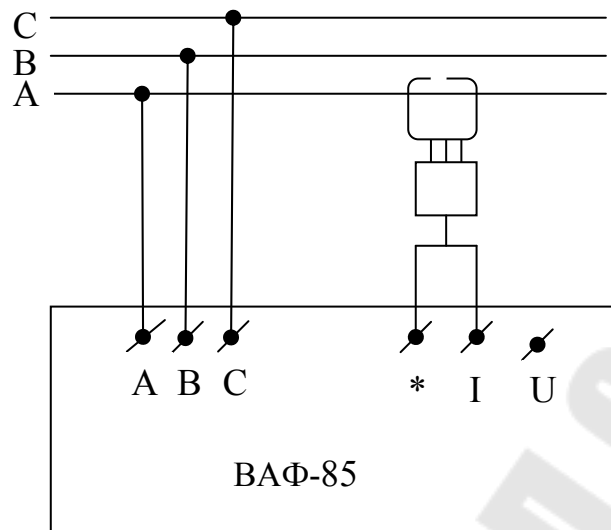


Рис.5.3. Схема подключения прибора

2.1.5. Методика снятия векторной диаграммы

1. Рассмотрим методику построения векторной диаграммы токов и напряжений с помощью ВАФ-85.

2. После проверки симметрии линейных напряжений наносят их векторную диаграмму в масштабе на миллиметровку.

3. Опорным вектором, от которого производят отсчет всех углов, в ВАФ-85 принят вектор линейного напряжения $U_{ав}$.

4. Подключают ВАФ-85 зажимами А,В,С на трехфазное напряжение 220 В в соответствии с маркировкой клемм на стенде. Проверяют правильность чередования фаз по вращению лимба (тормозная кнопка отводится) – при правильном чередовании фаз он вращается по часовой стрелке. Затем подключают токоизмерительные клещи к токовым зажимам прибора, соблюдая полярность. Разжимают клещи и охватывают ими провод, идущий от трансформатора тока, фазы А таким образом, чтобы сторона клещей, помеченная "*", была обращена к трансформатору тока или к источнику питания. Левый тумблер прибора должен стоять в положении IУ, а правый тумблер – в положении "ВЕЛИЧИНА".

5. Измерив ток, который должен быть не менее 15-20% номинального, правый тумблер переводят в положение "ФАЗА".

6. Вращением лимба против часовой стрелки добиваются, чтобы стрелка прибора подошла к нулю слева, а на лимбе против риски 220 или 110 В (в зависимости от подведенного напряжения) производят отсчет угла и квадранта (емкостного или индуктивного), в кото-

ром находится вектор тока I . При отсчете угла необходимо помнить, что он будет правильным только в том случае, если направление вращения лимба и движения к нулю стрелки совпадают. При противоположном направлении фактический угол сдвига фаз будет отличаться от отсчитанного по лимбу на 180 град.

7. Записав показания, наносят вектор тока I на векторную диаграмму, помня, отсчет углов ведется от вектора U_{ab} по часовой стрелке при индуктивной нагрузке и против часовой стрелки при емкостной нагрузке.

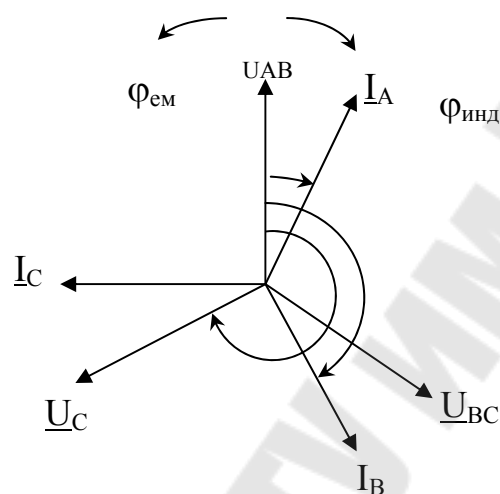


Рис.5.4. Векторная диаграмма, снятая с помощью прибора ВАФ-85

Аналогичным образом производится измерение углов сдвига токов других фаз и их нанесение на векторную диаграмму.

На рис. 5.4 приведена векторная диаграмма, снятая с помощью ВАФ-85 в трехфазной цепи с симметричной нагрузкой индуктивного характера. Стрелочками показаны направления отсчета углов при емкостном и индуктивном характере тока.

Измерить угол сдвига фаз между векторами напряжения можно, подключив измеряемое напряжение на зажимы напряжения ВАФ-85 (токоизмерительные клещи при этом не используются).

Измерения производятся в той же последовательности.

2.1.6. Порядок выполнения работы с прибором ВАФ-85.

1. Ознакомиться с назначением, техническими характеристиками прибора ВАФ-85. Изучить меры безопасности (2.1.1 и 2.1.2).
2. Изучить методику производства измерений и снятия векторных диаграмм (2.1.3, 2.1.4 и 2.1.5).

3. При отключенном стенде подключить ВАФ-85 согласно рис. 2.2. Включить стенд кнопкой SB1. Проверить правильность чередования фаз (2.1.4, п.1).

4. Проверить нулевое положение диска (2.1.4, п.2). Отключить стенд кнопкой SB1.

5. Собрать схему испытания в соответствии с номером бригады (Таблица 5.2).

6. Включить стенд кнопкой SB1.

7. Согласно (2.1.4, п.5) измерить величины фазных и линейных напряжений в линии. Результаты измерений занести в таблицу 5.2. По результатам измерений построить векторную диаграмму напряжений в масштабе.

8. Согласно (2.1.4, п.4) измерить величины фазных токов в линии, используя токоизмерительные клещи. Результаты измерений занести в таблицу 5.3.

9. Согласно (2.1.5) снять векторные диаграммы линейных и фазных напряжений при работе линии. Результаты измерений занести в таблицу 5.2. По результатам измерений построить векторную диаграмму напряжений в масштабе.

10. Согласно (2.1.5) снять векторную диаграмму фазных токов. Результаты измерений занести в таблицу 5.2. По результатам измерений построить векторную диаграмму токов в масштабе.

Таблица 5.2

Результаты измерений

	Напряжения						Токи		
	$U_{A,B}$	$U_{B,B}$	$U_{C,B}$	$U_{AB,B}$	$U_{BC,B}$	$U_{CA,B}$	$I_{A,A}$	$I_{B,A}$	$I_{C,A}$
Величина									
	$U_{A,B}$	$U_{B,B}$	$U_{C,B}$	$U_{AB,B}$	$U_{BC,B}$	$U_{CA,B}$	$I_{A,A}$	$I_{B,A}$	$I_{C,A}$
Величина									
Угол									

2.2. Вольтамперфазометр ВАФ-ПАРМА-А

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

ВАФ обеспечивает измерение параметров электрической энергии в диапазонах и с погрешностями, соответствующими приведенным в таблице 5.3.

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

ентом нелинейных искажений не более 15% или от встраиваемых источников питания постоянного тока напряжением 6 В.

При отключении сетевого шнура питания от измерительного блока ВАФ обеспечивает автоматический переход в режим работы от встроенных источников питания и обратно при его подключении.

Таблица 5.3

Измеряемый параметр	Ед. изм.	Диапазон измерения	Пределы допускаемой основной погрешности при измерении	
			относительной, %	абсолютной
Напряжение постоянного тока	В	от 0 до 460	$\pm [1 + 0,1(U_k U_{и} - 1)]$	—
Действующее значение напряжения переменного тока	В	от 0 до 460	$\pm [1 + 0,1(U_k U_{и} - 1)]$	—
Действующее значение силы переменного тока	А	от 0 до 10	$\pm [1 + 0,1(I_k I_{и} - 1)]$	—
Частота измеряемого напряжения, тока	Гц	от 45 до 65	$\pm 0,1^{2)}$	—
Угол сдвига фаз между напряжением и напряжением	градус	от -180 до +180	—	$\pm 3,6^{4)}$
Угол сдвига фаз между напряжением и током	градус	от -180 до +180	—	$\pm 3,6^{5)}$
Активная мощность	Вт	от 0 до 4600	—	$\pm 3\%$
Реактивная мощность	Вар	от 0 до 4600	—	$\pm 3\%$

где — $U_k(I_k)$ — конечное значение диапазона измерения напряжения (силы тока), $U_{и}(I_{и})$ — измеренное значение напряжения (силы тока).

¹⁾ За нормирующее значение принимается конечное значение диапазона измерения.

²⁾ При действующем значении напряжения переменного тока не менее 2 В.

³⁾ При действующем значении силы переменного тока не менее 100 мА.

⁴⁾ При действующем значении напряжения переменного тока не менее 30 В.

2.2.2. Устройство прибора и принцип действия

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

Внешний вид измерительного блока приведен на рисунке 5.5.

На передней панели (рис. 5.5) расположены:

- (5) – выключатель питания прибора;
- (6) – кнопка включения подсветки дисплея;
- (7) – двойная 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) – двойная 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;

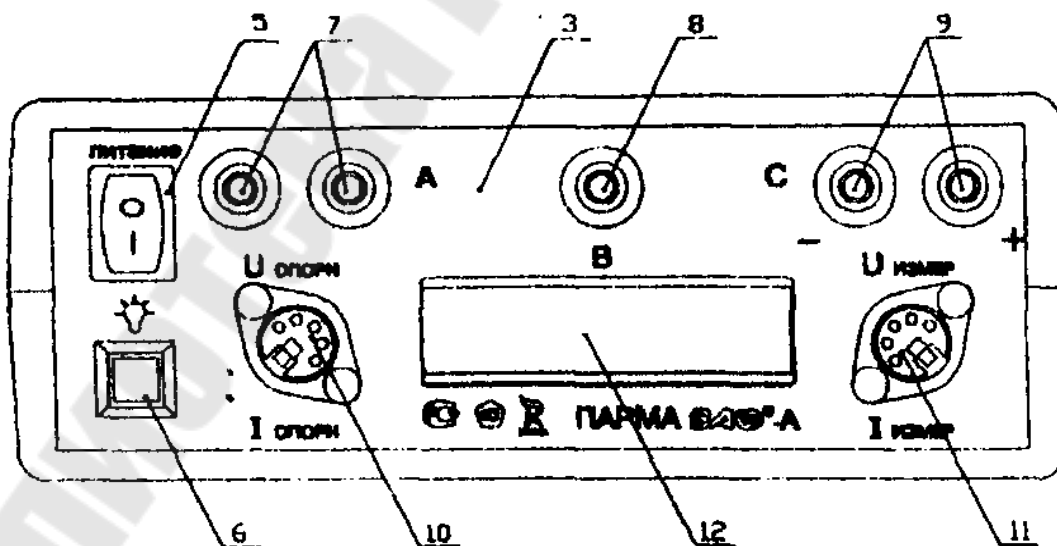


Рис. 5.5. Внешний вид измерительного блока

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

2.2.3. Порядок работы

Расположение органов настройки и включения

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 3с на дисплее индицируются заводские номера, как показано на рисунке 5.6. 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.

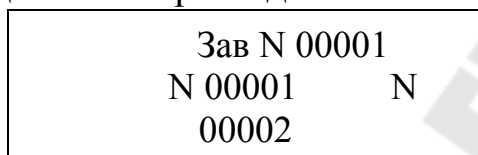


Рис. 5.6

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 5.7.

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, как показано на рисунке 5.7,а в нижней строке справа индицируется измеренное действующее значение силы переменного тока, имеющее размерность мА или А; в нижней строке слева – из-

меренное значение частоты переменного тока, имеющее размерность H_z ; в верхней строке справа – измеренное действующее значение напряжения переменного тока, имеющее размерность мV или V.

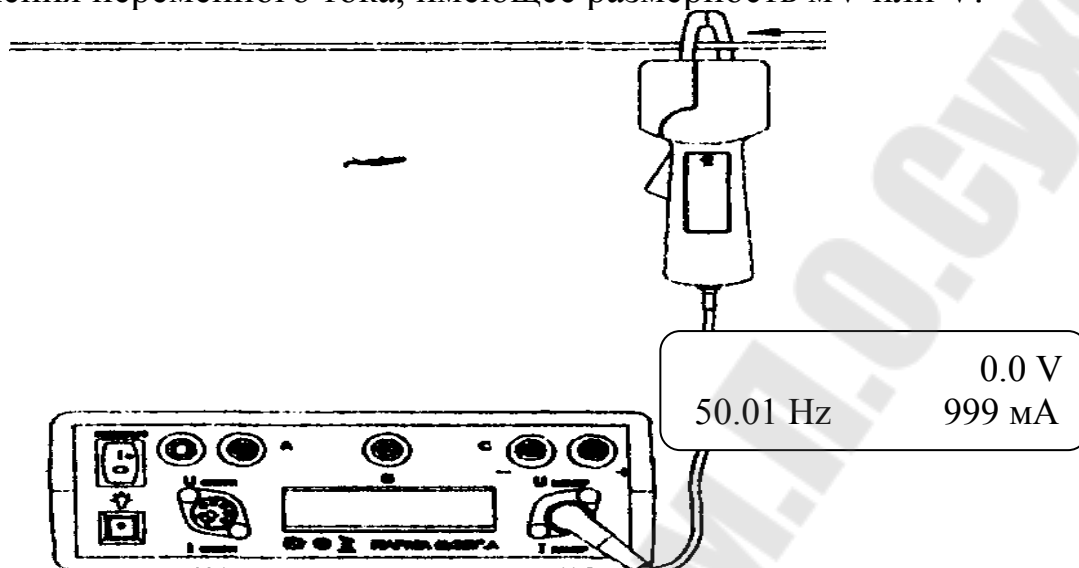


Рис. 5.7

Считайте измеренное действующее значение силы 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 5.8.

На дисплее, как показано на рисунке 5.8, 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 .

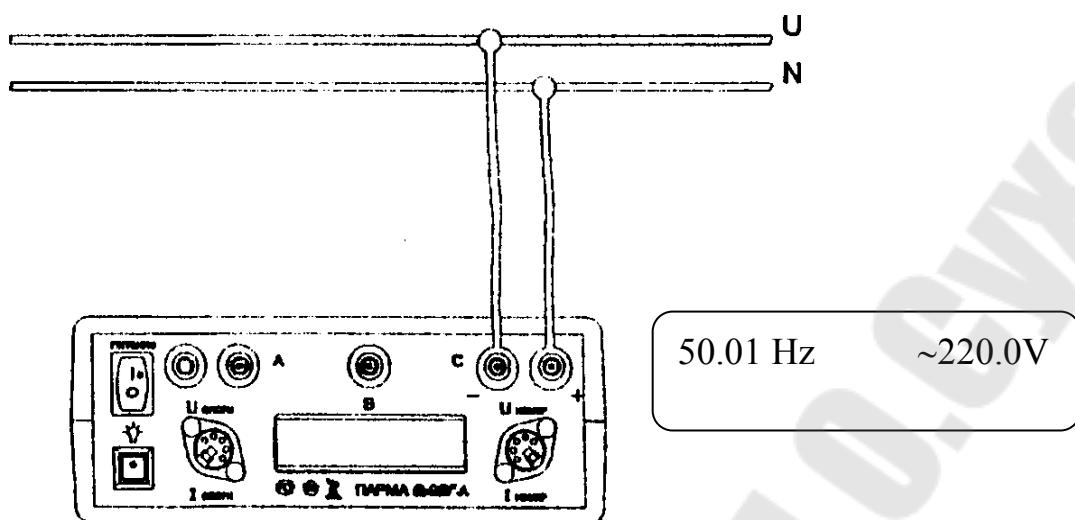


Рис.5.8.

3.3. Для измерения напряжения постоянного тока необходимо подать напряжение постоянного тока на клеммы, обозначенные $U_{\text{измер}}$ (рисунок 2.9) в соответствии с указанной полярностью.

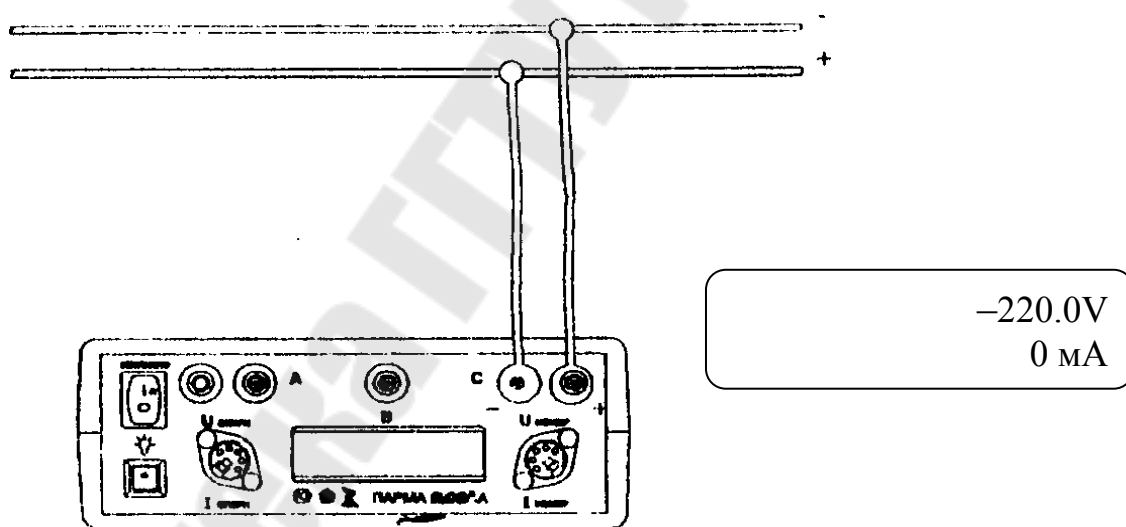


Рис. 5.9

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, как показано на рисунке 5.9, в верхней строке справа индицируется измеренное значение напряжения постоянного тока, имеющее размерность мV или V, в нижней строке справа – измерен-

ное значение силы переменного тока, имеющее размерность мА или А.

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

Измерительные клещи подключить к разъему измерительного канала, обозначенного $I_{\text{измер}}$ (рис. 5.10).

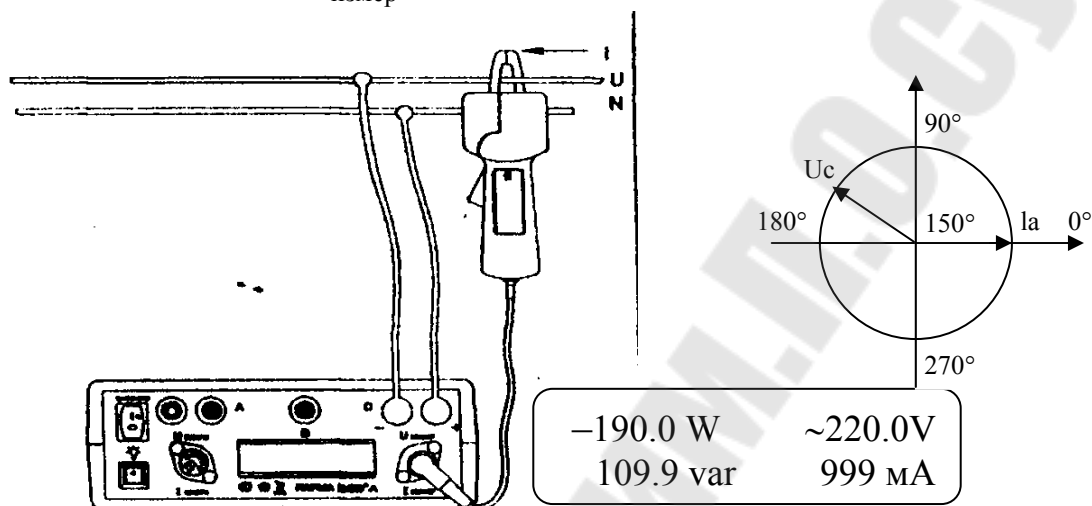


Схема подключения ВАФ в однофазной или трехфазной цепи

Рис.5.10

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 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, как показано на рисунке 5.10, *a* 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 силы переменного тока индицируются справа вверху и внизу соответственно. Значение угла сдвига фаз между напряжением и током в этом режиме работы на дисплей не индицируется, а вычисляется ВАФ автоматически.

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 $U_{\text{измер}}$ (рис. 5.11).

На дисплее, как показано на рисунке 5.11, 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 $\phi_{uu} =$; в нижней строке слева – префикс угла сдвига фаз между напряжением и током $\phi_{ui} =$. Действующие значения напряжения и переменного тока индицируются справа вверху и внизу соответственно.

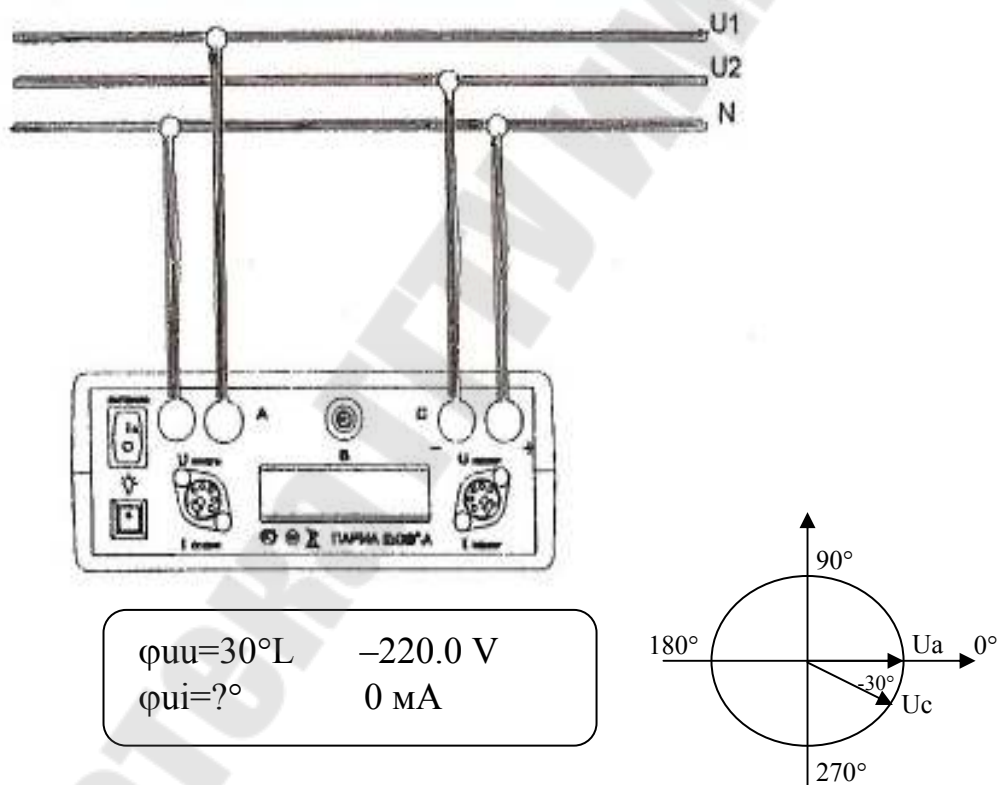


Рис. 5.11

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 $I_{\text{измер}}$ (рис. 5.12).

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, по середине окна магнитопровода.

Подайте напряжение переменного тока на клеммы обозначенные $U_{\text{опорн}}$ (рис. 5.12).

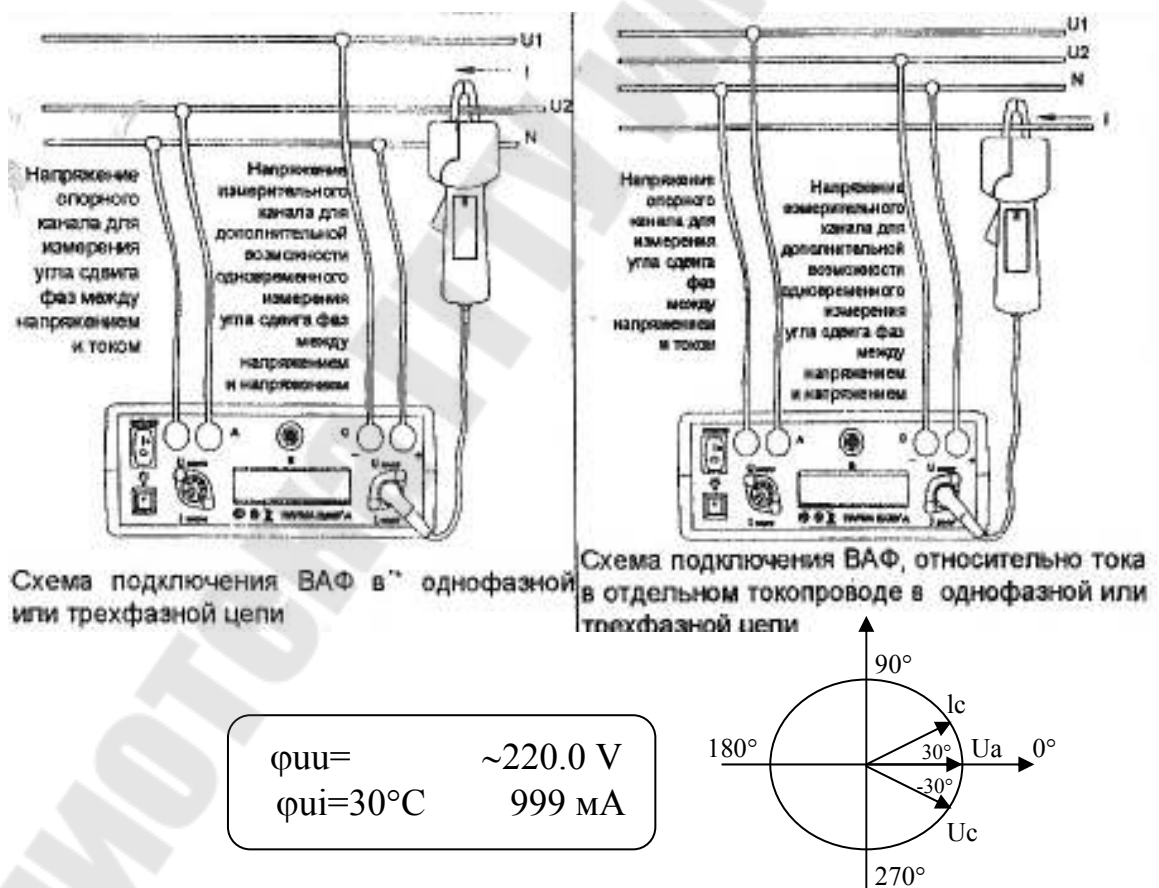


Рис. 5.12

На дисплее, как показано на рисунке 5.12 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 2.15а. Латинская буква С обозначает, что измеренный ВАФ угол сдвига фаз находится от 0 до 180° .

3.7. Определение последовательности чередования фаз

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 5.13. Правильное определение последовательности чередования фаз возможно только при условии, что все три фазы подключены в соответствии с маркировкой на ВАФ.

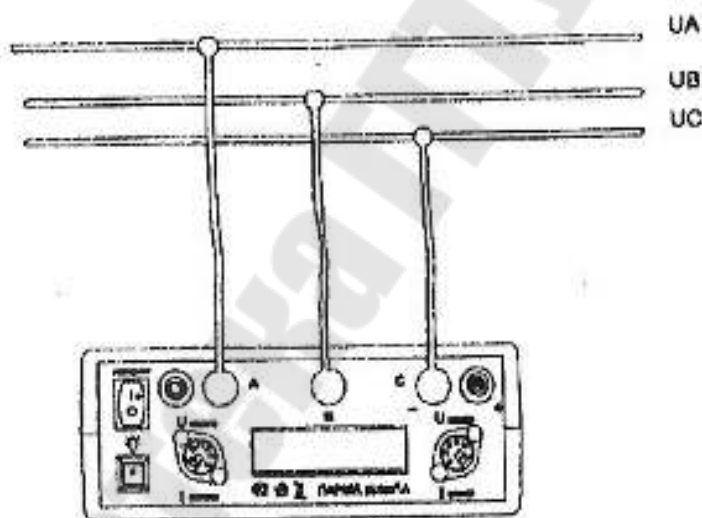


Рис. 5.13

В случае если проводники трехфазной системы не подключены к клеммам "А" или "С" на дисплей выводится одно из сообщений, как показано на рисунке 5.14.

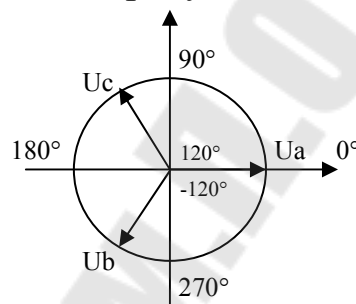
нет фазы А

нет фазы С

Рис. 5.14

Результат определения последовательности чередования фаз выводится в текстовом виде, как показано на рисунке 5.15.

ПРЯМОЕ
ЧЕРЕДОВАНИЕ ФАЗ



ОБРАТНОЕ
ЧЕРЕДОВАНИЕ ФАЗ

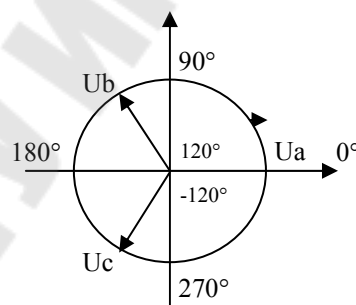


Рис. 5.15

3.7.8. Порядок выполнения работы с прибором ВАФ-Парма

1. Изучить назначение, техническими характеристиками прибора ВАФ-Парма. Изучить меры безопасности (2.1.1 и 2.1.2).
2. Изучить методику производства измерений напряжений, токов, порядка чередования фаз и снятия векторных диаграмм (П.3).
3. Включить стенд в соответствии с вариантом задания (табл. 5.6).
4. Согласно (П.3, п.3.7) определить последовательность чередования фаз. Результаты проверки занести в таблицу 5.4.
5. Согласно (П.3, п.3.2) измерить величины фазных и линейных напряжений в линии. Результаты измерений занести в таблицу 5.4. По результатам измерений построить векторную диаграмму напряжений в масштабе.

6. Согласно (П.3, п.3.1) измерить величины фазных токов в линии и частоту в сети, используя токоизмерительные клещи. Результаты измерений занести в таблицу 5.4. По результатам измерений построить векторную диаграмму токов в масштабе.

7. Согласно (П.3, п.3.4) измерить активную и реактивную мощности в линии, используя токоизмерительные клещи. Результаты измерений занести в таблицу 5.5.

8. Согласно (П.3, п.3.5) снять векторные диаграммы линейных и фазных напряжений при работе линии. Результаты измерений занести в таблицу 5.5. По результатам измерений построить векторную диаграмму напряжений в масштабе.

9. Согласно (П.3, п.3.6) снять векторную диаграмму фазных токов. Результаты измерений занести в таблицу 5.4. По результатам измерений построить векторную диаграмму токов в масштабе.

Таблица 5.4

Результаты измерений

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

4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Измерения вольтамперфазометром ВАФ-85
 - 2.1. Схема подключения прибора ВАФ-85 при проверке нулевого положения диска и снятии векторных диаграмм.
 - 2.2. Результаты измерений (Табл.5.3)
 - 2.3. Векторные диаграммы токов и напряжений в соответствии с вариантом задания, выполненные в масштабе по результатам измерений.
3. Измерения вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А.
 - 3.1. Схемы подключения прибора ВАФ-ПАРМА-А при измерениях напряжений, токов, мощностей и порядка чередования фаз.

3.2. Результаты измерений (Табл.5.4)

3.3. Векторные диаграммы токов и напряжений в соответствии с вариантом задания (табл. 5.5), выполненные в масштабе по результатам измерений.

Таблица 5.5

Варианты заданий

№ бригады	Режим работы сети	Включить			Положение переключателя
		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,Н;

2. Установить перемычки А1-А2, В1-В2 и С1-С2. Измерения производить на клеммах А1,В1,С1,Н

5. Контрольные вопросы

1. Назначение вольтамперфазометра ВАФ-85.
2. Назначение вольтамперфазометра ВАФ-ПАРМА-А.
3. Какие электрические величины можно измерять вольтамперфазометром ВАФ-85 и в каких пределах?
4. Какие электрические величины можно измерять вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
5. Каковы основные условия техники безопасности при работе с вольтамперфазометром ВАФ?
6. Какова последовательность действий перед началом измерений прибором ВАФ-85?
7. Каковы общие правила при использовании токоизмерительных клещей для измерений токов?
8. Как проверить правильность чередования фаз вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
9. Как проверить правильность чередования фаз вольтамперфазометром ВАФ-85?
10. Как произвести измерение напряжений вольтамперфазометром ВАФ-85?
11. Как произвести измерение напряжений вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
12. Как произвести измерение токов вольтамперфазометром ВАФ-85?
13. Как произвести измерение токов вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
14. Как произвести измерение мощности вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
15. Как произвести измерение частоты вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
16. Как произвести снятие векторных диаграмм напряжений вольтамперфазометром ВАФ-85?
17. Как произвести снятие векторных диаграмм токов вольтамперфазометром ВАФ-85?
18. Как произвести снятие векторных диаграмм напряжений вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?
19. Как произвести снятие векторных диаграмм токов вольтамперфазометром ВАФ-ПАРМА-А?

Лабораторная работа № 6

ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

1. Цель работы

Построение векторных диаграмм токов и напряжений, эпюр распределения напряжений отдельных последовательностей при возникновении однократной продольной несимметрии.

2. Краткая теория

В настоящей работе рассматриваются два вида 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:

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

где $\Delta \underline{U}_{LA1}$, $\Delta \underline{U}_{LA2}$, $\Delta \underline{U}_{L0}$ – симметричные составляющие падения напряжения фазы А на несимметричном участке системы; $X_{L1\Sigma}$, $X_{L2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ – 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 (рис. 6.1,а) характеризуется следующими граничными условиями:

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

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

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

Используя (6.2) и (6.3), определим I_{LA2} и I_{L0} :

$$\underline{I}_{LA2} = -\frac{\Delta U_{LA1}}{jX_{L2\Sigma}}; \quad \underline{I}_{L0} = -\frac{\Delta U_{LA1}}{jX_{L0\Sigma}}. \quad (6.4)$$

В соответствии с (6.2) можно записать:

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

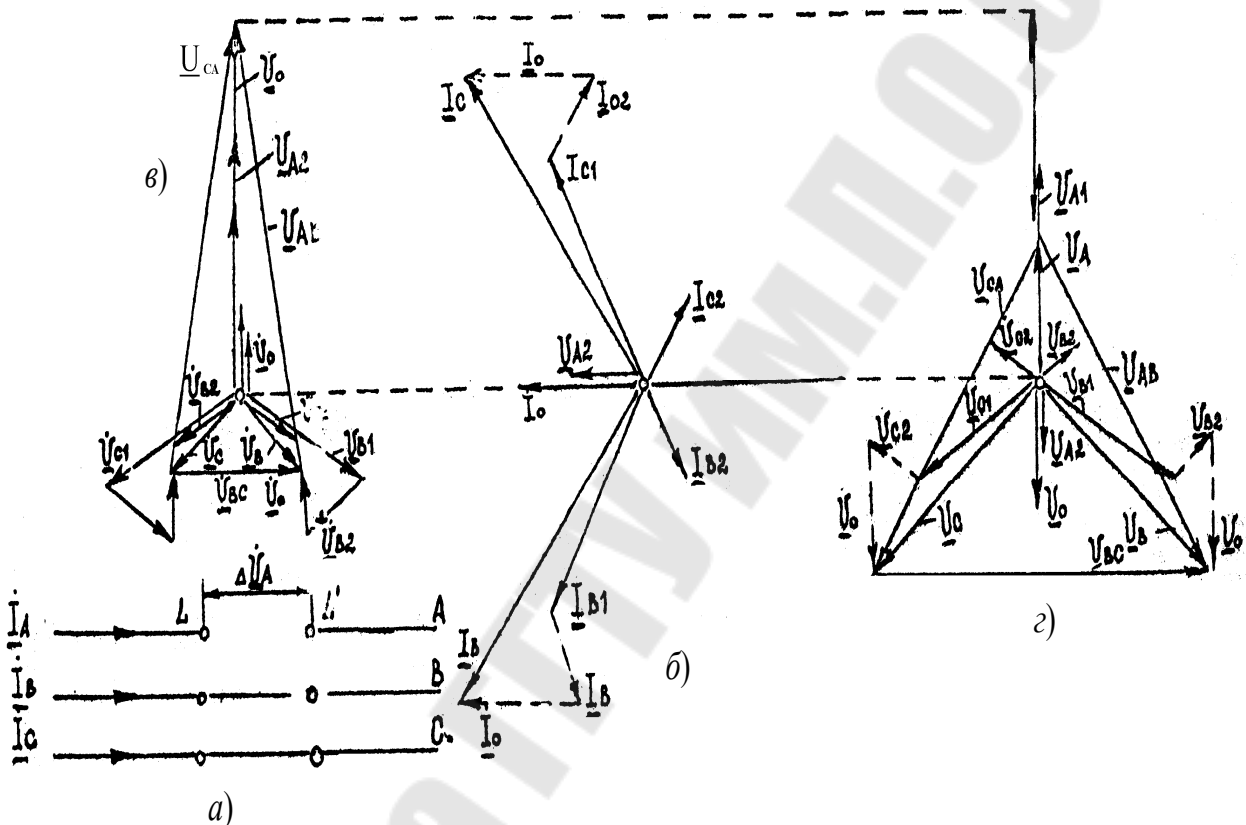


Рис. 6.1. Разрыв одной фазы трёхфазной цепи: *a* – исходная схема; *б* – векторная диаграмма токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи; *в* и *г* – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно, в точках *L* и *L*¹)

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:

$$\underline{I}_{LA1} = -\frac{\underline{E}_{AC}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{AL}^{(1)})}. \quad (6.7)$$

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:

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

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

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 (6.14) 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:

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

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

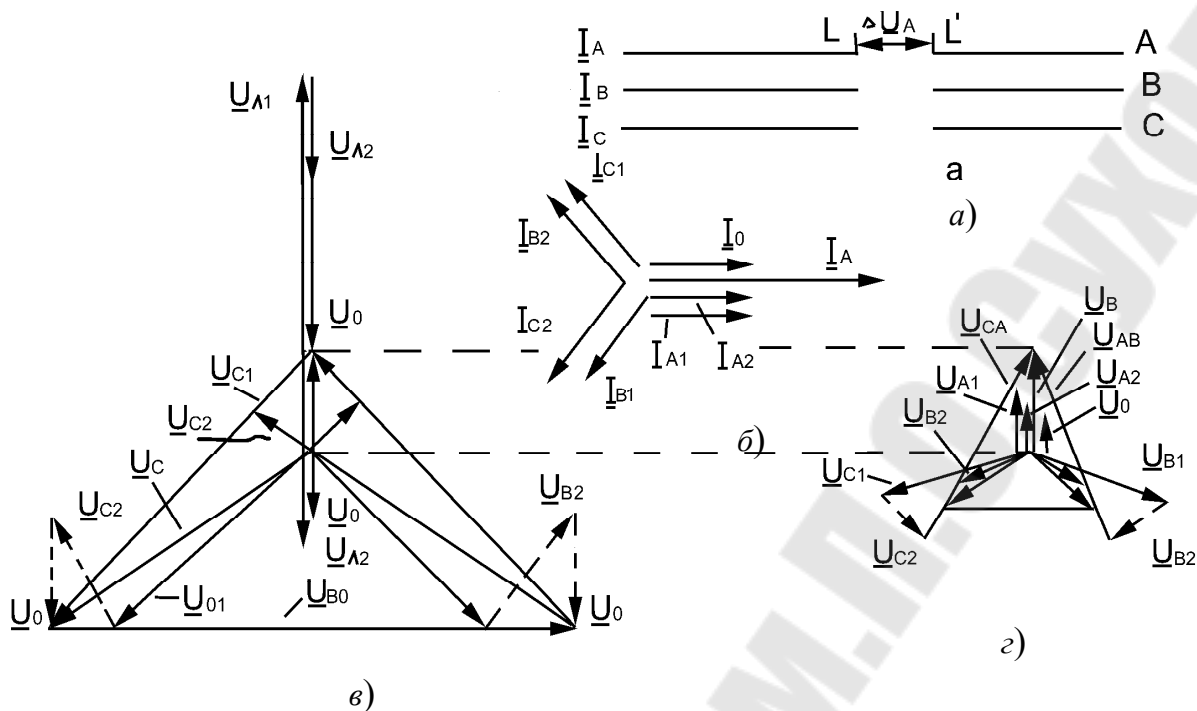


Рис. 6.2. Разрыв двух фаз трехфазной цепи: а – исходная схема; б – векторная диаграмма токов в месте разрыва; в и г – векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно в точках L и L')

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:

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

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

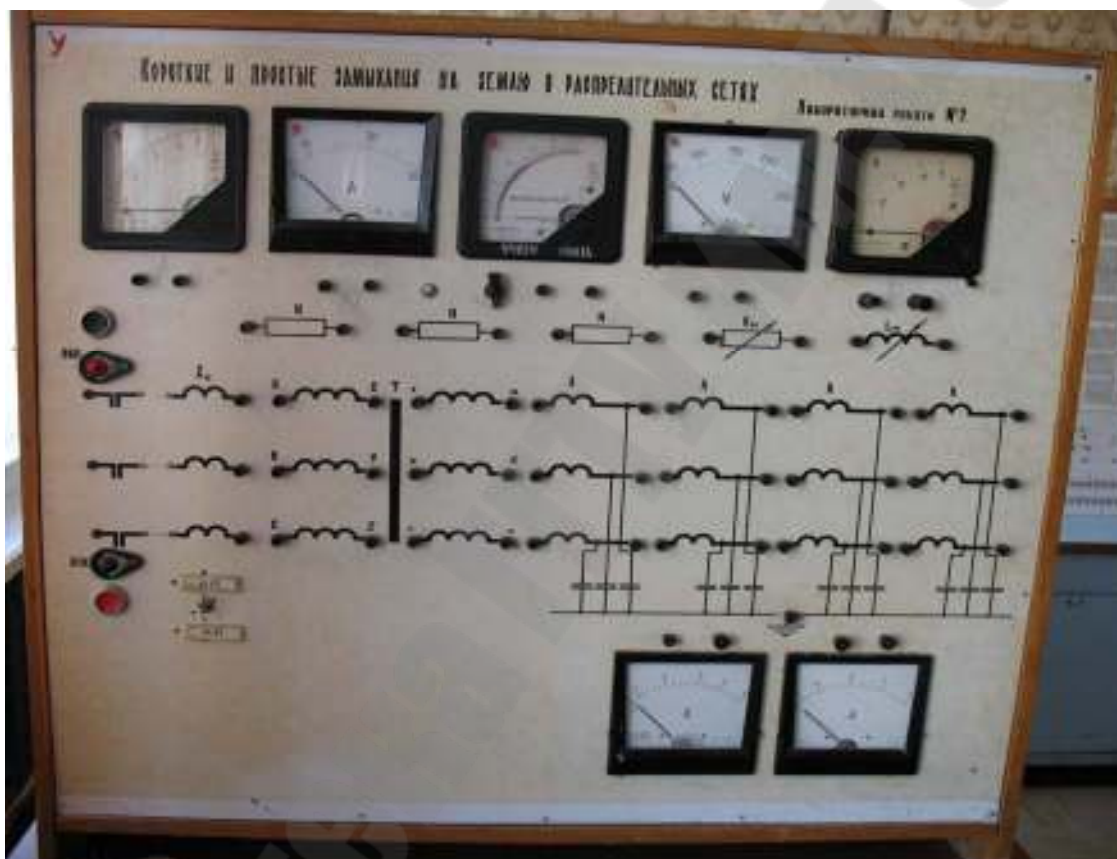


Рис. 6.3. Лабораторный стенд

Лабораторный стенд (рис.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.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с целью работы, изучить схему, представленную на лабораторном стенде (рис. 6.3) и оборудование для выполнения работы.
2. 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,
3. Собрать комплексную схему для разрыва одной фазы.
4. Измерить токи и напряжения по фазам в месте разрыва
5. По данным измерений построить векторную диаграмму токов в месте возникшей несимметрии.
6. Собрать комплексную схему для разрыва двух фаз при глухом заземлении нейтрали.
7. Измерить токи и напряжения по фазам в месте разрыва
8. По данным измерений построить векторную диаграмму токов в месте возникшей несимметрии.

5. Содержание отчета

1. 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

9. Укажите основные соотношения теории симметричных составляющих при разложении трехфазной системы на симметричные составляющие при продольной несимметрии.
10. Каковы граничные условия и соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте обрыва одной фазы?
11. Каковы граничные условия и соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте обрыва двух фаз?
12. В чем состоит правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии?
13. Каков режим работы нейтрали при рассмотрении разрыва двух фаз?

14. Как влияет изменение режима работы нейтрали трансформаторов на ток в здоровых фазах при разрыве одной фазы?

15. 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 при двухфазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью с помощью теории симметричных составляющих.

2. Краткие теоретические сведения

Ознакомьтесь с теорией симметричных составляющих, изложенной в методических указаниях к лабораторной работе №3.

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

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

Найдем симметричные составляющие напряжений:

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

с учетом граничных условий (7.1): $\underline{U}_{KA1} = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA}$;

б) обратной последовательности:

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

в) нулевой последовательности:

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

Таким образом:

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

Основные уравнения между ЭДС и падениями напряжений отдельных последовательностей будут:

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

$$\underline{U}_{KA0} = 0 - j\underline{I}_{KA0}X_{0\Sigma}.$$

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

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

Из теории симметричных составляющих для тока фазы А имеем:

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

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

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

Аналогично определим ток обратной последовательности:

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

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

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

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

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

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

Токи поврежденных фаз в месте КЗ будут:

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

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

Модули выражений (7.8) одинаковые и составляют:

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

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 ∞ .

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.

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

3. Описание лабораторного стенда



Рис.7.1. Лабораторный стенд

Лабораторный стенд (рис.7.1) 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

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

Варианты заданий

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

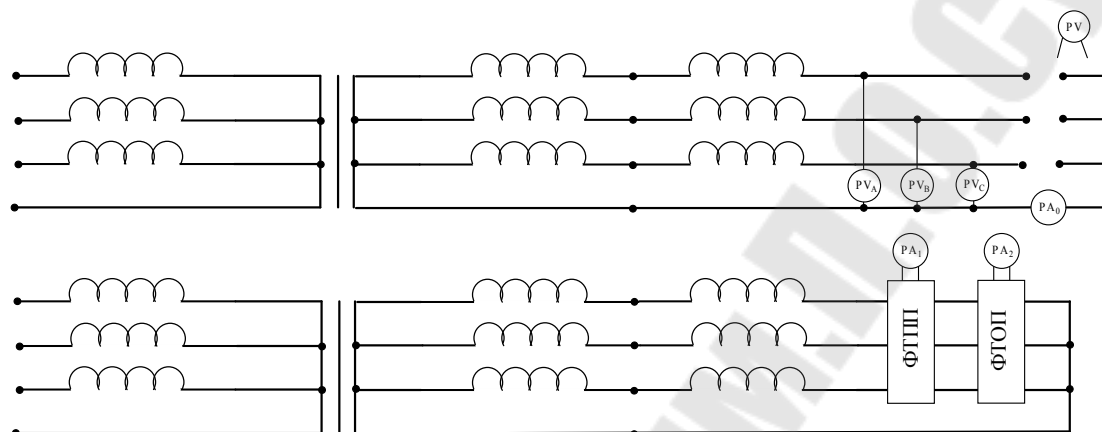


Рис. 7.2. Схема измерения фазных напряжений U_A , U_B , U_C , линейных напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. ФТПП, (ФТОП) - фильтры токов прямой и обратной последовательностей

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

Таблица 7.2

Результаты измерений и вычислений

КЗ фаз на зем- лю	Измерено					Вычислено			
	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_1 , В	U_2 , В	U_0 , В
							Фор- мула, ре- зультат	Фор- мула, ре- зультат	Фор- мула, ре- зультат

4. Определить напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке КЗ на основании теории симметричных составляющих. Результаты вычислений занести в табл. 7.2.

5. По результатам измерений и вычислений построить в масштабе векторную диаграмму напряжений, аналогичную приведенной на рис. 7.3,б.

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

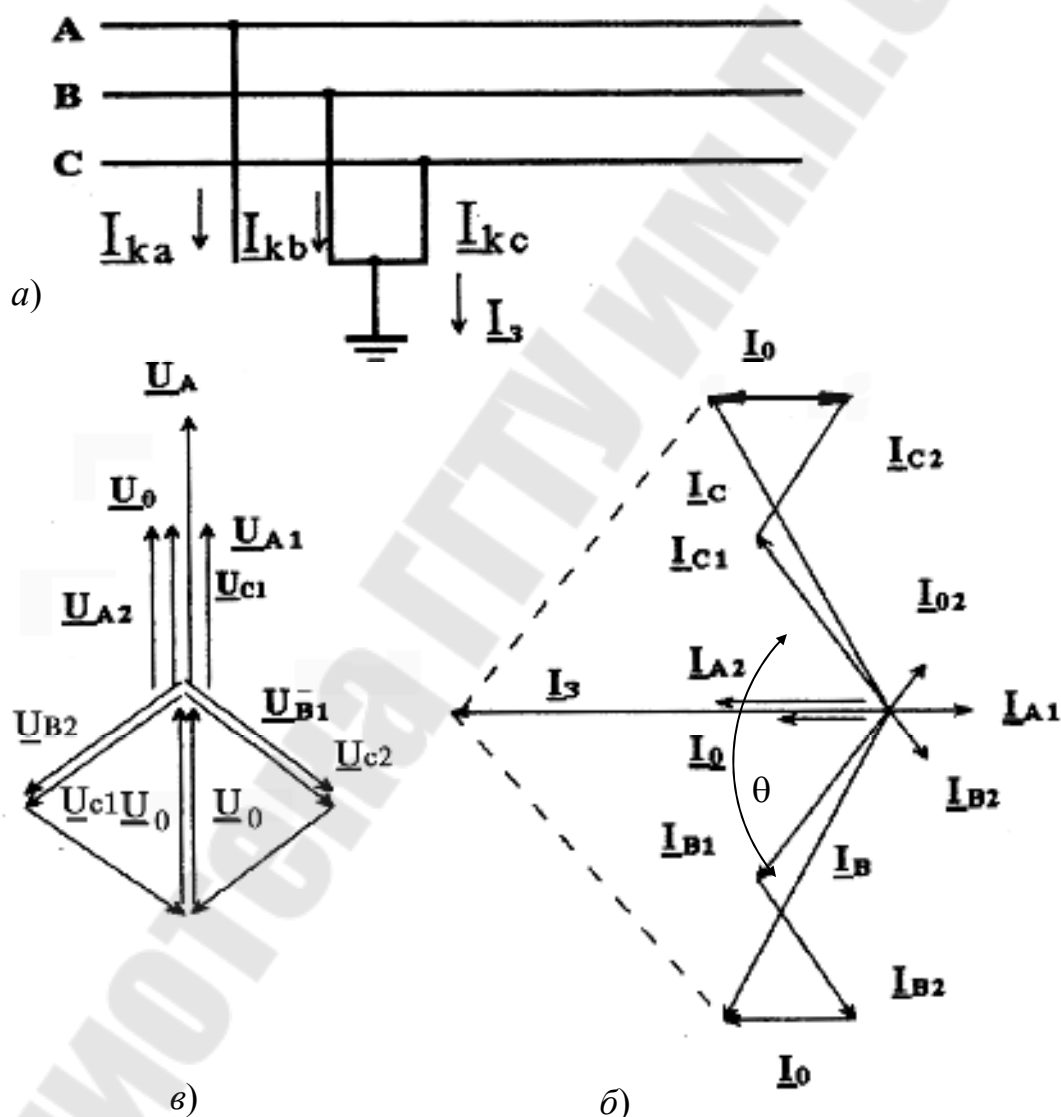


Рис. 7.3. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы токов (б), напряжений (в) двухфазного КЗ на землю

Результаты измерений

КЗ фаз на зем- лю	Измерено					
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_1, A	I_2, A	I_0, A

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

5. Содержание отчета

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

6. Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа № 8

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

1. Цель работы

Построение векторных диаграмм токов и напряжений при переходе через трехфазный трансформатор при различных видах КЗ.

2. Краткая теория

2.1. Общие положения

Ознакомиться с общими положениями и векторными диаграммами токов и напряжений при переходе через трансформатор со схемой Y/Y_n-12 по методическим указаниям к лабораторной работе №1 (п. 2.1 и 2.2).

2.2. Схема соединения обмоток трансформатора Δ/Y_n-11

На рис. 8.1, представлена схема соединений трансформатора Δ/Y_n-11 , и векторные диаграммы напряжений и 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 одинаковы по величине.

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

При трехфазном КЗ в точке $K^{(3)}$ между фазами A , B и C звезды за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 токи КЗ одинаковые по величине протекают во всех трех фазах (рис.8.1,а). Вектора фазных токов при этом равны по величине и сдвинуты на угол 120° (рис.8.1,в). При построении векторных диаграмм токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рис.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 рис. 8.1,а приведена принципиальная схема трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n-11 . При известных фазных токах $\underline{I}_{a\phi}$, $\underline{I}_{b\phi}$ и $\underline{I}_{c\phi}$ ток в линейных проводах за треугольником имеем при $K_T = 1$

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

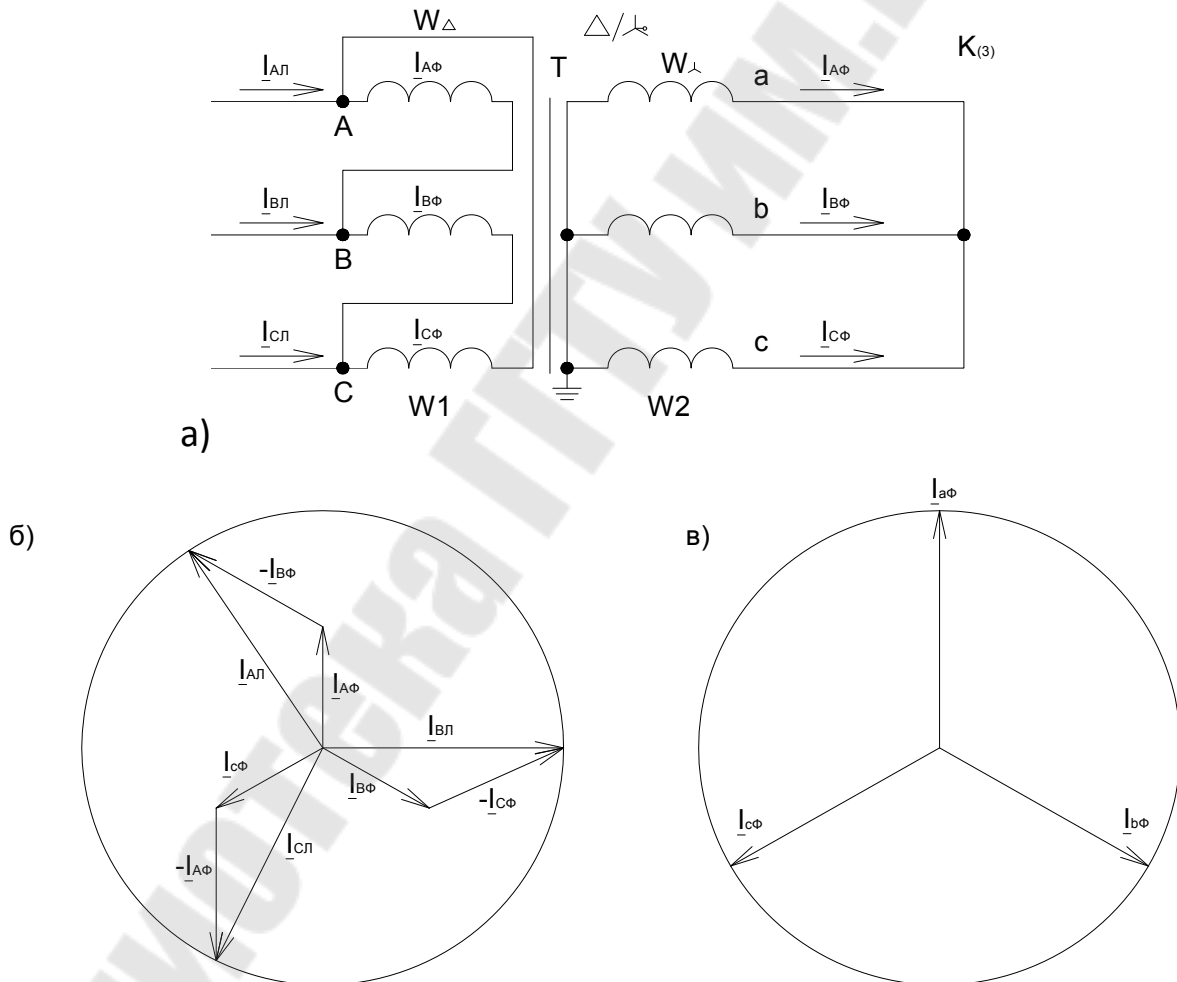


Рис.8.1. Распределение токов (а) и векторные диаграммы токов вторичной (в) и первичной обмоток (б) при трехфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Δ/Y_n и $K_T=1$

При построении векторных диаграмм токов (рис.1.26, б, в) следует обратить внимание, что вектора токов $I_{a\phi}$ и $I_{A\phi}$ 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 $I_{A\phi} = I_{a\phi}/\sqrt{3}$ (рис.8.1, б, в).

Т.е. при реальном K_T имеем увеличение токов I_{Al} , I_{Bl} , I_{Cl} в $\sqrt{3}$ раз (рис.8.1, б) и их уменьшение $\sqrt{3}$ раз за счет соотношения $\sqrt{3}W_Y/W_\Delta$, (рис.8.1, б и 8.1, 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

$$I_{Al}^{(3)} = \frac{I_{a\phi}^{(3)} \sqrt{3}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{I_{a\phi}^{(3)}}{K_T}; I_{Bl}^{(3)} = \frac{I_{b\phi}^{(3)} \sqrt{3}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{I_{b\phi}^{(3)}}{K_T}; I_{Cl}^{(3)} = \frac{I_{c\phi}^{(3)} \sqrt{3}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{I_{c\phi}^{(3)}}{K_T} \quad (8.4)$$

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

При двухфазном КЗ в точке $K^{(2)}$ между фазами В и С звезды за трансформатором со схемой Δ/Y_n-11 токи КЗ одинаковые по величине протекают в двух фазах. Вектора фазных токов при этом сдвинуты на угол 180° (рис.8.2,в).

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 Т.

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

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

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

$$I_{AL} = (I_{A\Phi} - I_{B\Phi}) / \sqrt{3}, \quad I_{BL} = (I_{B\Phi} - I_{C\Phi}) / \sqrt{3}, \quad I_{CL} = (I_{C\Phi} - I_{A\Phi}) / \sqrt{3}. \quad (8.6)$$

При двухфазном КЗ между фазами *B* и *C* ток КЗ в фазе *A* со стороны звезды отсутствует, т.е. $I_{a\phi} = 0$, $I_{в\phi} = -I_{с\phi}$ (рис. 8.2,б,в), поэтому при $K_T \neq 1$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{AL}^{(2)} &= -\underline{I}_{в\phi}^{(2)} / \sqrt{3} K_T, \\ \underline{I}_{BL}^{(2)} &= 2\underline{I}_{в\phi}^{(2)} / \sqrt{3} K_T, \\ \underline{I}_{CL}^{(2)} &= -\underline{I}_{с\phi}^{(2)} / \sqrt{3} K_T. \end{aligned} \quad (8.6)$$

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 $I_{ПО}^{(2)}$ на стороне *Y* и совпадает с ним по фазе (рис.8.2,б).

Как видно из рис. 8.2,а ток в треугольнике делится на две части: одна замыкается по обмотке фазы *в* и другая – по последовательно включенным обмоткам фаз *с* и *а*. Поскольку сопротивление второй цепи в два раза больше, ток в обмотке фазы *в* равен $I_{с\phi} = 2I_{ПО}^{(2)} / 3$, а в обмотках фаз *а* и *с* $I_{a\phi} = I_{b\phi} = I_{ПО}^{(2)} / 3$. (рис.8.2,в)

Для простоты при построении векторных диаграмм токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (рис.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

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

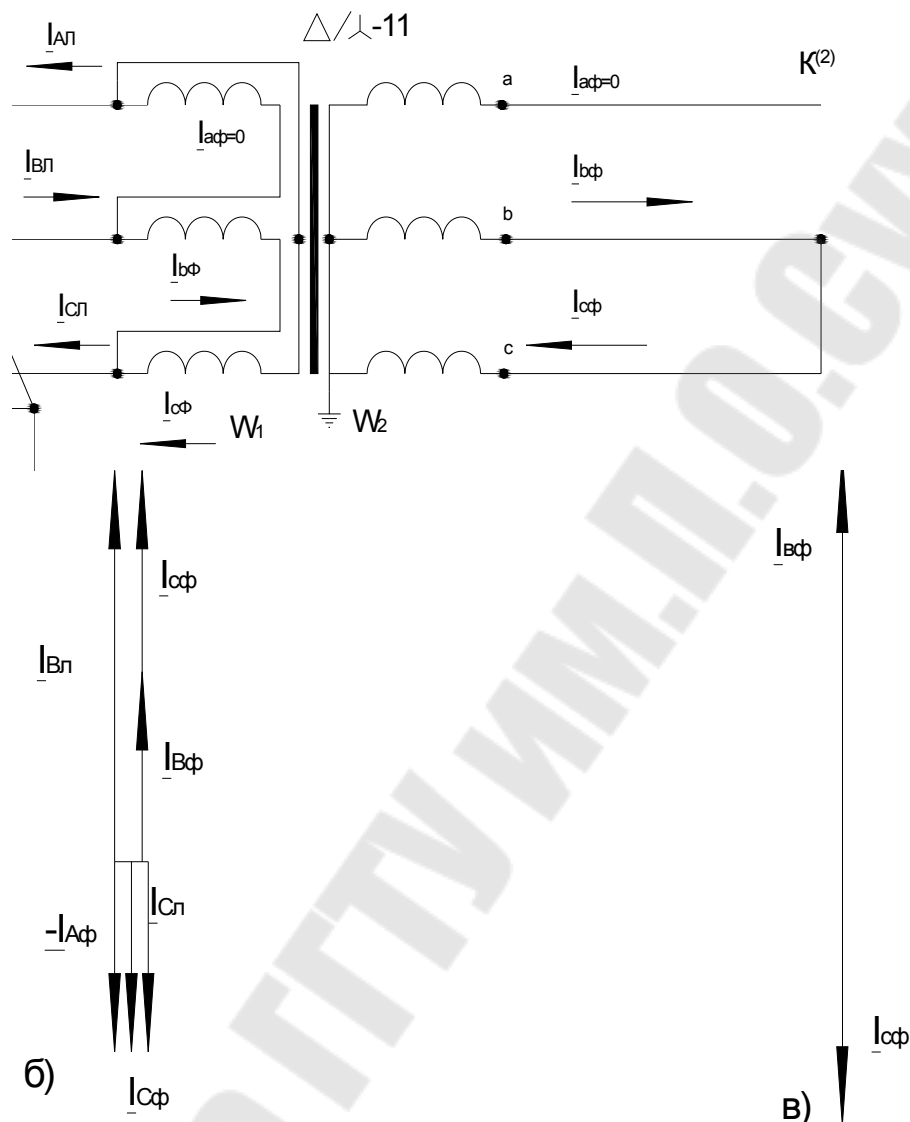


Рис.8.2. Распределение токов (а) и векторные диаграммы токов вторичной (в) и первичной обмоток (б) при двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Δ/Y_n-11 и $K_T = 1$.

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 . (рис.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 (рис.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

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

Токи однофазного КЗ за трансформатором со схемой Δ/Y_H-0 на стороне ВН проходят в двух фазах a и b , они равны по величине и противоположно направлены (рис.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:

$$I_{Aл} = I_{aф} - I_{cф} \quad I_{Bл} = I_{bф} - I_{aф} \quad I_{Cл} = I_{cф} - I_{bф}; \quad (8.7)$$

Учитывая соотношения (8.7), при однофазном КЗ $I_{bф} = 0$ и $I_{cф} = 0$, имеем при $K_T = 1$ и $w_{\Delta}/w_Y = \sqrt{3}$

$$I_{Aл} = I_{aф}/\sqrt{3}; \quad I_{Bл} = -I_{aф}/\sqrt{3} \quad I_{Cл} = 0. \quad (8.8)$$

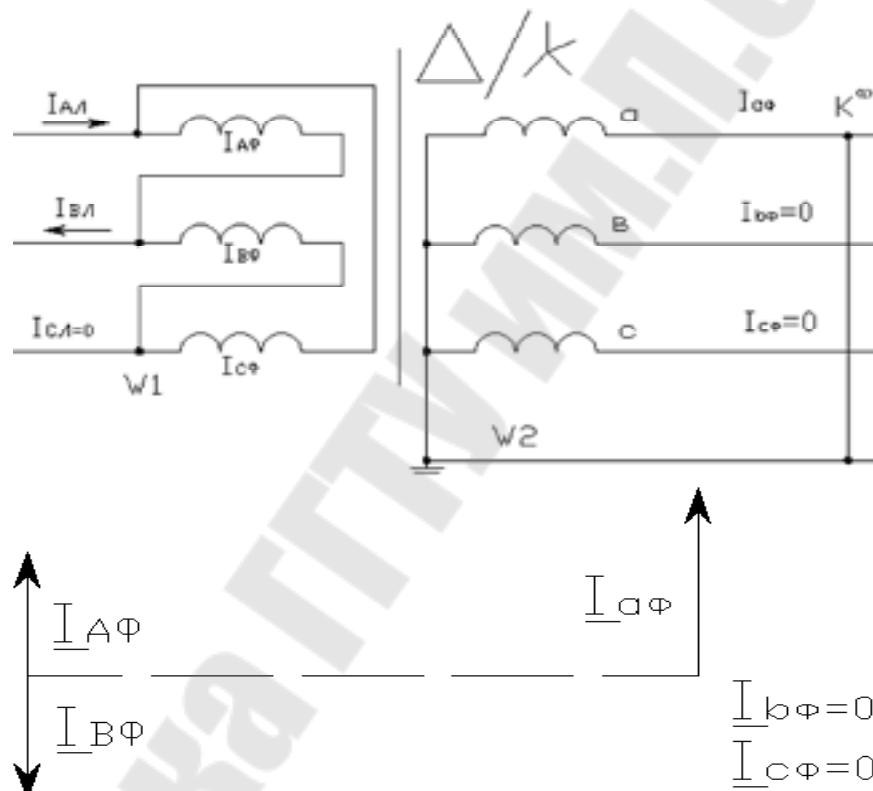


Рис.8.3. Распределение токов при однофазном КЗ за трансформатором со схемой соединений Δ/Y_H-11 и $K_T = 1$.

3. Описание лабораторного стенда.

Лабораторный стенд (рис.8.4) 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.

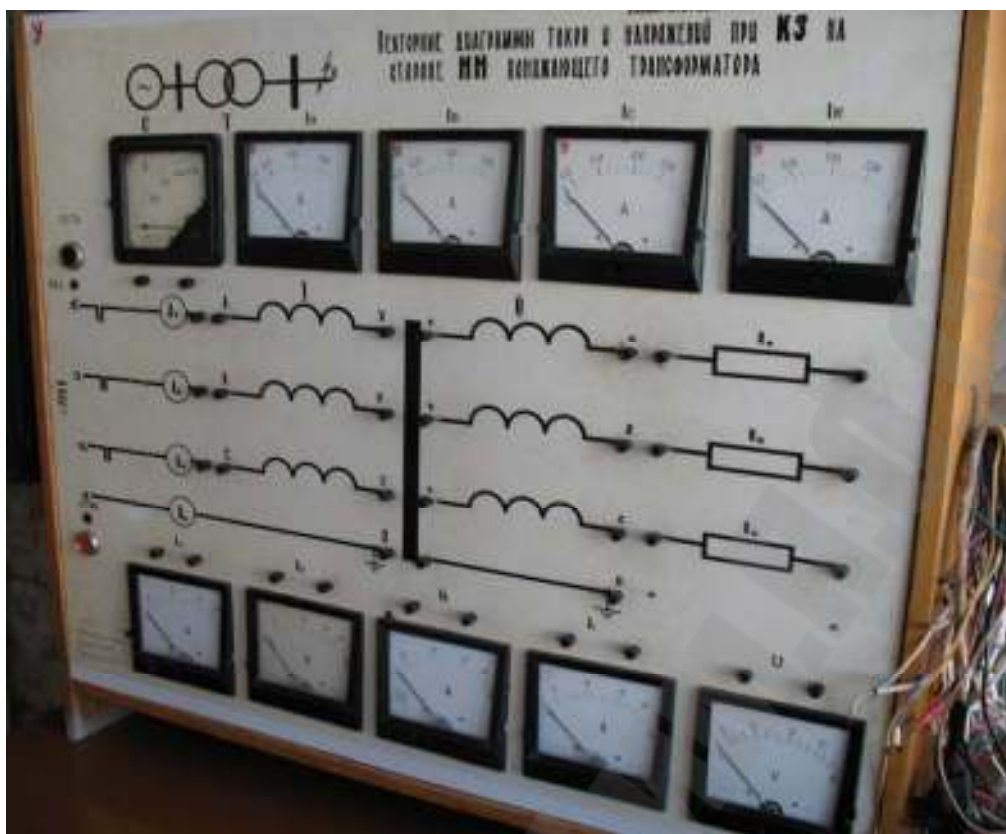


Рис.8.4. Внешний вид лабораторного стенда

4. Порядок выполнения работы

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

При КЗ трех фаз на вторичной стороне трансформатора записать в табл. 8.2 показания приборов первичной и вторичной стороны.

2. Нарисовать схему соединения обмоток трансформатора в группу Δ/Y_n-0 с приборами, необходимыми для измерения фазных и линейных напряжений и фазных токов.

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

4. 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.

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

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

7. Повторить пункты 4.5.6 при однофазном КЗ. (Варианты закорачиваемых фаз заданы в табл. 8.2). Результаты измерений занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Схема соединения обмоток трансформатора и виды КЗ Δ / Y_n-11

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			

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

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
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 8.2.
4. Векторные диаграммы токов и фазных и линейных напряжений вторичной и первичной обмоток, выполненных в масштабе при различных видах КЗ.
5. Письменный ответ на п. 10, 11, 12 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 Δ / Y_n-11 ?
5. По каким причинам токи трехфазных КЗ на стороне вторичной обмотки трансформатора одинаковы при соединении обмоток трансформатора Δ / Y_n-11 и Y / Y_n-12 ?

6. Чему равен угол сдвига между первичными и вторичными токами трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток трансформатора в группу Δ / Y_n-11 ?
7. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора при трехфазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?
8. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора при двухфазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?
9. В каких фазах протекает ток на первичной стороне трансформатора при однофазном КЗ на вторичной обмотке трансформатора?
10. Чему равны токи на стороне ВН 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 трехфазных КЗ и коэффициенте трансформации $K_T = 10$?
11. Чему равны токи на стороне ВН 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 двухфазных КЗ и коэффициенте трансформации $K_T = 10$?
12. 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 рис. 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 – расчетные – первичная, вторичная и типовая мощности трансформатора; R_d – сопротивление включенное в цепь нагрузки.

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

Таблица 9.1

**Расчетные соотношения при чисто активной нагрузке
и идеальных вентилях**

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

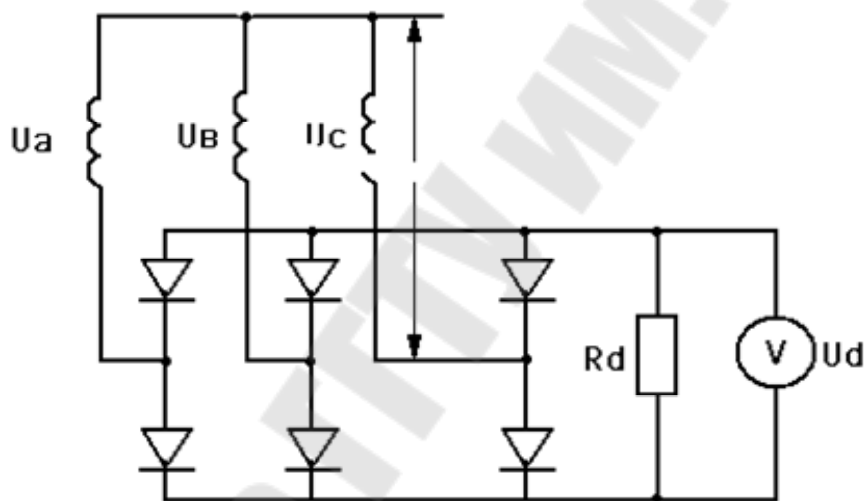


Рис. 9.1. Трехфазная мостовая схема (схема Ларионова)

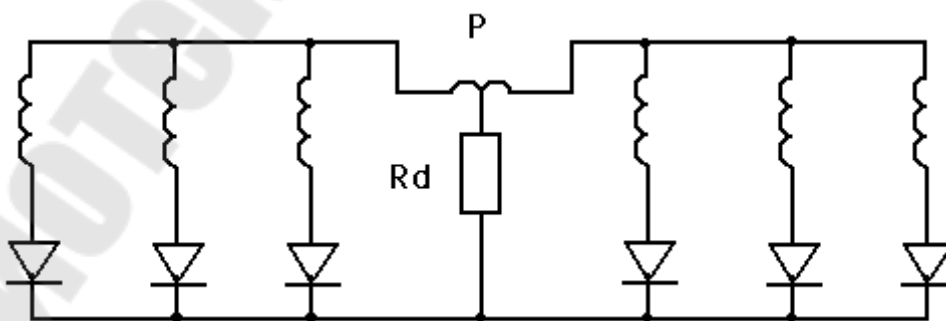


Рис. 9.2. Трехфазная схема с уравнительным реактором

2.3. Расчет тока КЗ на стороне выпрямленного тока

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

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

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

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

Для схемы с уравнительным реактором $n = 6$

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

Для трехфазной мостовой схемы $n = 3$

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

Ток КЗ в схеме с уравнительным реактором

$$Id_{дур} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \frac{S_{нм}}{X_*};$$

Ток КЗ в мостовой схеме:

$$Id_m = \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \frac{S_{нм}}{X_*}.$$

С учетом активных сопротивлений

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

$$Id_m = 1,35 \frac{U_2}{\sqrt{R_k^2 + X^2}};$$

установившийся ток КЗ имеет пульсирующий характер.

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис.9.3) 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.



Рис.9.3. Лабораторный стенд

4. Порядок выполнения работы

4.1. Мостовая схема

1. Собрать схему испытания мостовой трехфазной схемы выпрямления, приведенной на рис. 9.4.
2. Включить стенд, записать показания приборов в табл. 9.2.
3. Вычислить значения U_d/U_2 ; $U_{обр}/U_d$; I_2/I_d ; P_d ; S_2 ; S_2/P_d и сравнить результаты вычислений с аналогичными отношениями, приведенными в табл. 9.1. Результаты вычислений записать в табл. 9.1.
4. Произвести КЗ (между выводами R_d).

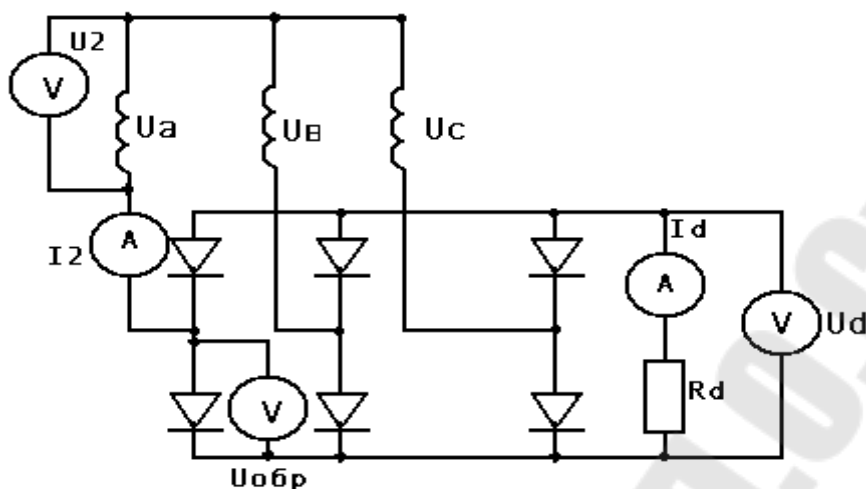


Рис. 9.4 Подключение приборов для испытания мостовой схемы

Таблица 9.2

Результаты измерений и вычислений

Измеренные величины	Схема выпрямления	
	Мостовая	С уравни- тельным реактором
$U_2, В$		
$I_2, А$		
$I_d, А$		
$U_d, В$		
$U_{обр}, В$		
Вычисленные величины		
U_d/U_2		
U_d/U_2 (табл. 9.1)		
$P_d, Вт$		
$S_2, ВА$		
S_2/P_d		
S_2/P_d , (табл. 9.1)		

4.2. Схема с уравнительным реактором

1. Собрать схему испытания схемы с уравнительным реактором (рис. 9.5), соблюдая полярность вторичных обмоток трансформатора.

2. Включить стенд, записать показания приборов в табл. 9.2.

3. Вычислить значения U_d/U_2 ; $U_{обр}/U_d$; I_2/I_d ; P_d ; S_2 ; S_2/P_d и сравнить результаты вычислений с аналогичными отношениями, приведенными в табл. 9.1. Результаты вычислений записать в табл. 9.2.

4. Произвести КЗ между выводами R_d .

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

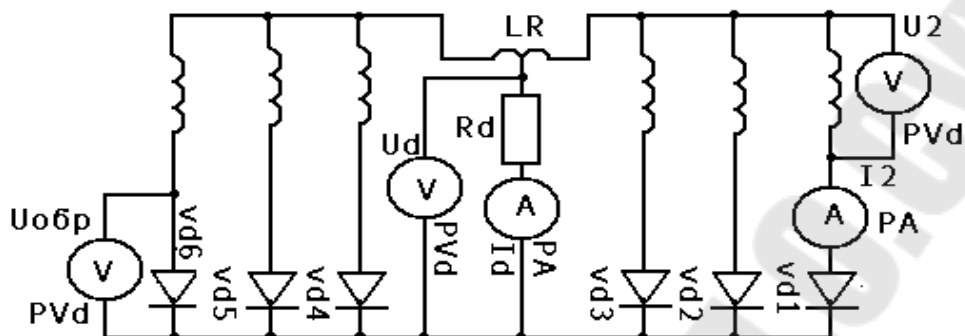


Рис. 9.5. Подключение приборов для испытания схемы с уравнительным реактором

5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема испытаний мостовой схемы выпрямления.
3. Схема испытаний схемы с уравнительным реактором.
4. Результаты испытаний и вычислений в табличной форме.
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. Вентили какой схемы выпрямления работают в более легком режиме по току?
5. Вентили какой схемы выпрямления работают в более легком режиме по напряжению?
6. Каковы исходные данные для расчета токов КЗ на стороне выпрямленного тока?
7. Каков порядок расчета тока КЗ на стороне выпрямленного тока?
8. При какой схеме выпрямления ток КЗ будет больше при прочих одинаковых условиях?

Содержание

Лабораторная работа № 1 Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_{H-0}	3
Лабораторная работа № 2 Простые замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью.....	15
Лабораторная работа № 3 Двухфазное короткое замыкание.....	25
Лабораторная работа № 4 Однофазное короткое замыкание.....	34
Лабораторная работа № 5 ВАФ.....	41
Лабораторная работа № 6 Однократная продольная несимметрия.....	61
Лабораторная работа № 7 Двухфазное короткое замыкание на землю.....	69
Лабораторная работа № 8 Векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_{H-0}	76
Лабораторная работа № 9 Короткие замыкания на стороне выпрямленного тока.....	86

Евминов Леонид Иванович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ**

**Практикум
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 26.01.15.

Пер. № 115Е.
<http://www.gstu.by>