

РАБОТА № 2.
**ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ
 ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Оглавление

1.	Цель работы	2	38 ¹
2.	Программа работы	2	38
3.	Основы теории	2	38
	3.1. Понятия о выводах обмоток и направлениях ЭДС	–	38
	3.2. Схемы и группы соединения обмоток	–	40
	3.3. Условия включения трансформаторов на параллельную работу	–	45
4.	Экспериментальное исследование	3	46
	4.1. Проверка маркировки выводов обмоток	3	46
	4.2. Проверка схем и групп соединения обмоток	5	48
	4.3. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами	7	49
	4.4. Анализ уравнивающего тока параллельно работающих трансформаторов	10	52
5.	Содержание отчета	12	53
6.	Контрольные вопросы	12	53
	Приложение. Формулы для расчета значений напряжений U_{bB}, U_{bC}, U_{cB}	–	54
	Рис. 2.1. Проверка маркировки выводов обмоток	4	47
	Рис. 2.2. К иллюстрации метода двух вольтметров проверки схем и групп соединения обмоток	5	47
	Рис. 2.3. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений: <i>a</i> – У/Д-11; <i>б</i> – Д/Д-0	6, 7	42, 43
	Рис. 2.4. Схема лабораторной установки для исследования трансформаторов при параллельное работе	8	50
	Рис. 2.5. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор” (ФОТО)	13	–
	Рис. 2.6. Общий вид стенда “Трансформатор” (ФОТО)	14	–

¹ Номера страниц в учебном пособии:

Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ, 2002. – 166 с. <http://zabudsky.ru/soderghanie.html>

1. Цель работы

Овладеть методикой маркировки выводов обмоток трехфазных трансформаторов. Научиться опытным путем определять группы соединений обмоток. Усвоить условия параллельной работы трансформаторов и уметь теоретически установить распределение нагрузки между ними.

2. Программа работы

2.1. Проверить маркировку выводов обмоток двух трехфазных трансформаторов, предназначенных для параллельной работы.

2.2. Реализовать для трехфазного трансформатора схемы и группы соединений обмоток $Y/D-11$ и $D/D-0$ и проверить правильность соединения опытным путем (*студентам может быть предложена проверка других схем и групп соединений*).

2.3. Подключить трансформаторы, соединенные по схеме $D/D-0$, параллельно к питающей сети. Подключить нагрузку к трансформаторам и экспериментально определить распределение ее между ними. Построить **график зависимости вторичных токов трансформаторов от общего тока нагрузки, а также внешние характеристики трансформаторов**. Теоретически проверить распределение мощности и токов между параллельно работающими трансформаторами.

2.4. В режиме холостого хода параллельно работающих трансформаторов измерить уравнивающий ток, протекающий по их обмоткам. Определить величину уравнивающего тока аналитически.

3. Основы теории [9, с. 38..46]

.....

4. Экспериментальное исследование

4.1. Проверка маркировки выводов обмоток

У трехфазных трансформаторов, предназначенных для включения на параллельную работу, маркировка выводов обмоток указана, поэтому необходимо только убедиться, что она выполнена правильно.

Прежде всего следует проверить обозначения начал и концов обмотки ВН. Для этого фазные обмотки ВН соединяют “звездой”, подключают фазу $B-Y$ к сети с напряжением 127 В (рис. 2.1а) и измеряют напряжения и ЭДС U_{BY} , E_{AX} , E_{CZ} , U_{AB} , U_{BC} . Так как магнитный поток в среднем стержне трансформатора, где расположена обмотка фазы $B-Y$, в два раза больше, чем магнитные потоки в крайних стержнях, и имеет противоположное им направление, то измеренные при правильной маркировке обмоток напряжения и ЭДС будут равны: $E_{BY} \approx U_{BY}$, $E_{XA} = E_{ZC} \approx 0,5U_{BY}$, $U_{AB} = U_{BC} = 1,5U_{BY}$.

Если маркировка обмоток выполнена неправильно, то одно из напряжений U_{AB} или U_{BC} (или оба) будут равны $0,5U_{BY}$. Например, для рис. 2.1б $U_{AB} = 0,5U_{BY}$, $U_{BC} = 1,5U_{BY}$. Результаты измерений и заключение по ним записываются в табл. 2.1.

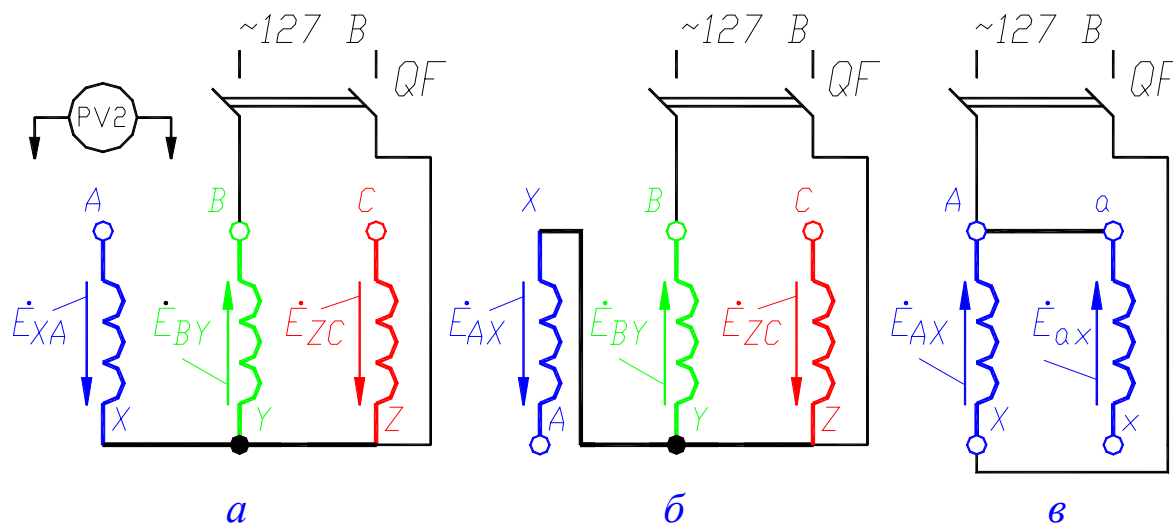


Рис. 2.1. Проверка маркировки выводов обмоток:

а, б – высокого напряжения; в – низкого напряжения

Таблица 2.1

Трансформатор	U_{BY} ,	U_{AX}	U_{CZ}	U_{AB}	U_{BC}	Заключение
	B	B	B	B	B	
I						
II						

Маркировку обмоток НН проверяют поочередно для каждой фазы. На рис. 2.16 приведена схема для проверки маркировки фазы $a-x$ обмотки НН (аналогично и для других фаз). При правильной маркировке фазы $a-x$ напряжение $U_{Xx} = U_{AX} - U_{ax}$. Результаты измерений записываются в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Транс- форматор	Фаза $A-X$			Фаза $B-Y$			Фаза $C-Z$			Заклю- чение
	U_{ax}	U_{AX}	U_{Xx}	U_{by}	U_{BY}	U_{Yy}	U_{CZ}	U_{CZ}	U_{Zz}	
	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
I										
II										

4.2. Проверка схем и групп соединения обмоток

На практике проверку схем и групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов выполняют по методу двух вольтметров, который основан на измерении напряжений между соответствующими выводами обмоток трансформатора с последующим их сравнением с расчетными значениями (рис. 2.2; [9], табл. П.1 на с. 54, 55) Измеренные напряжения должны быть равны расчетным для заданной группы соединений.

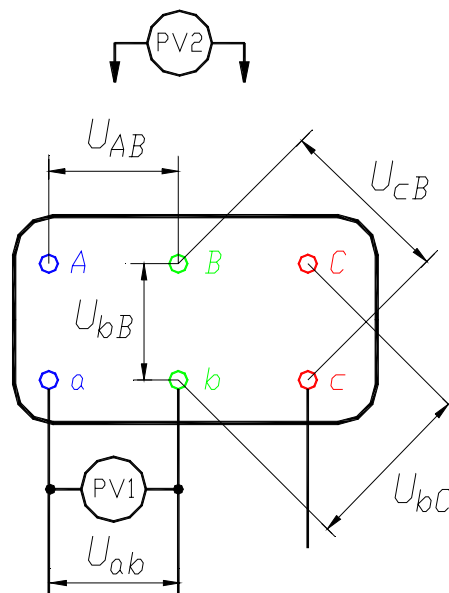


Рис. 2.2. К иллюстрации метода двух вольтметров проверки схем и групп соединения обмоток

В данной работе следует проверить две схемы и группы соединения $Y/\Delta-11$ и $\Delta/\Delta-0$ (студентам может быть предложено осуществить и проверить другие схемы и группы соединений). Расчетные напряжения определяются по формулам (см. [9], табл. П.1 на с. 54, 55):

а) для группы *У/Д-11*

$$U_{bB} = U_{cB} = U_{ab} \sqrt{1 - k_L \sqrt{3} + k_L^2}, \quad U_{bC} = U_{ab} \sqrt{1 + k_L^2};$$

б) для группы *Д/Д-0*

$$U_{bC} = U_{cB} = U_{ab} \sqrt{1 - k_L + k_L^2}, \quad U_{bB} = U_{ab}(k_L - 1),$$

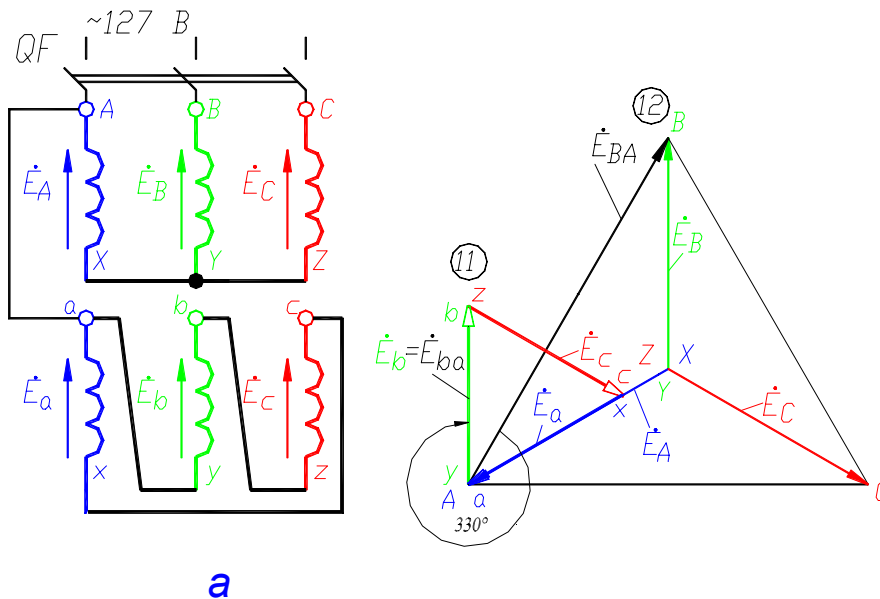
где $k_L = U_{AB}/U_{ab}$ – **линейный** коэффициент трансформации.

Схема измерений для трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток *У/Д-11* и *Д/Д-0* приведена соответственно на рис. 2.3а и на рис. 2.3б. Первичная обмотка (ВН) подключается к трехфазной сети с напряжением 127 В. Результаты измерений и расчетов сводятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Схема и группа соединения	Трансформатор I *					Трансформатор II *				
	U_{AB}	U_{ab}	U_{bB}	U_{bC}	U_{cB}	U_{AB}	U_{ab}	U_{bB}	U_{bC}	U_{cB}
	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
<i>У/Д-11</i>										
<i>Д/Д-0</i>										

* **Примечание.** В верхнюю часть ячеек записываются измеренные значения напряжения, а в нижнюю их часть – расчетные.



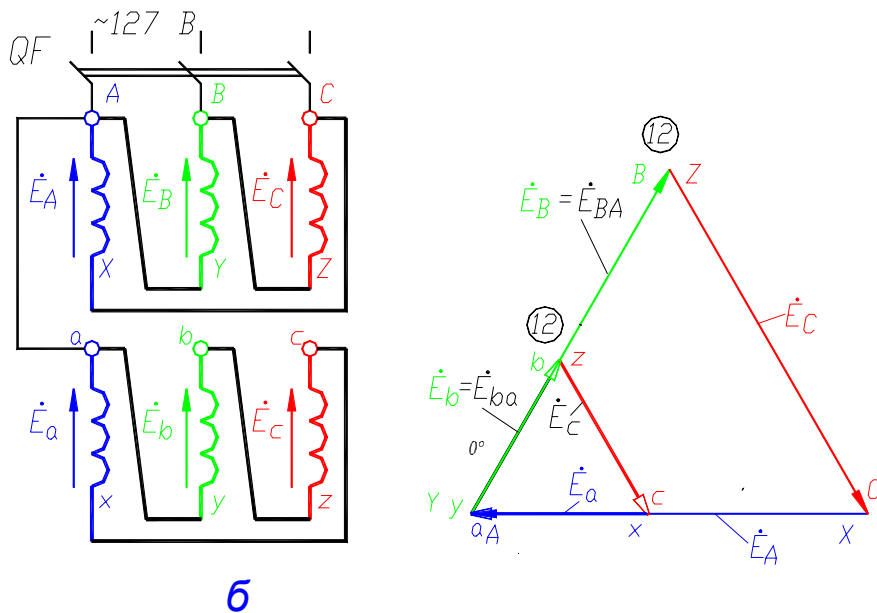


Рис. 2.3. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений:
а – У/Д-11; **б** – Д/Д-0

4.3. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

Схема включения трансформаторов на параллельную работу приведена на рис. 2.4. Перед включением трансформаторов необходимо проверить равнопотенциальность выводов обмоток, к которым подключены зажимы выключателя $QS1$. Для этого при отключенных автомате QF и выключателях $QS2$ и $QS1$ замыкают перемычкой зажимы (например C_1 и C_2) выключателя $QS1$. Далее включают автомат QF и измеряют напряжение между парами выводов A_1, A_2 , затем – B_1, B_2 . Если фазы напряжений вторичных обмоток трансформаторов совпадают, то напряжения между этими парами выводов будут равны нулю, что имеет место при одинаковых группах соединений и коэффициентах трансформации. Если напряжения не равны нулю, то это означает, что схема собрана неправильно. *До устранения неисправностей включать трансформаторы на параллельную работу нельзя.*

Убедившись в правильности фазировки, следует отключить автомат QF и снять перемычку. Далее для включения трансформаторов I и II на параллельную работу с общей активной нагрузкой $RR_{н2}$ необходимо последовательно (один за другим) включить автомат QF и выключатели $QS1$ и $QS2$.

После этого, постепенно увеличивая нагрузку, записывают значения: первичных токов I_{I} и I_{II} (показания амперметров $PA4$ и $PA5$), вторичных токов I_{2I} и I_{2II} (показания амперметров $PA6$ и $PA7$), общего тока нагрузки $I_{н2}$ (среднее арифметическое значение показаний амперметров $PA8, PA9$ и $PA10$), первичного и вторичного напряжений U_1 и U_2 (показания вольтметров $PV1$ и $PV2$). Трансформаторы загружают до номинального тока.

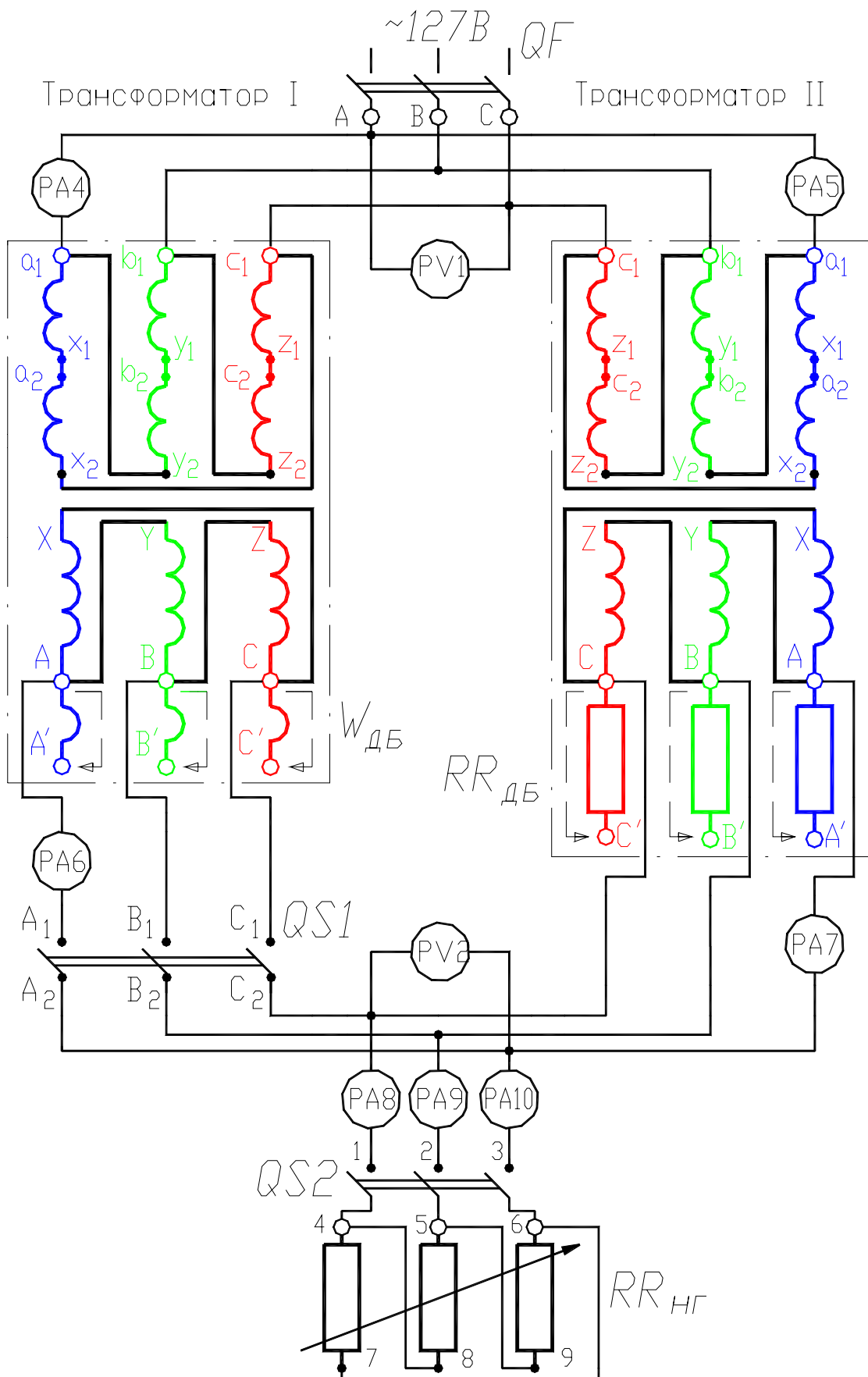


Рис. 2.4. Схема лабораторной установки для исследования трансформаторов при параллельное работе

Опыт проводят три раза при соблюдении следующих условий:

1. Равенство коэффициентов трансформации ($k_I = k_{II}$) и напряжений короткого замыкания ($U_{\kappa I} = U_{\kappa II}$) (при этом добавочные витки $W_{\delta\delta}$ и добавочное сопротивление $RR_{\delta\delta}$ отключены).

2. Равенство коэффициентов трансформации ($k_I = k_{II}$) и неравенство напряжений короткого замыкания ($U_{\kappa I} \neq U_{\kappa II}$) (при этом добавочные витки $W_{\delta\delta}$ отключены, а добавочное сопротивление $RR_{\delta\delta}$ включено).

3. Неравенство коэффициентов трансформации ($k_I \neq k_{II}$) и равенство напряжений короткого замыкания ($U_{\kappa I} = U_{\kappa II}$) (при этом добавочные витки $W_{\delta\delta}$ включены, а добавочное сопротивление $RR_{\delta\delta}$ отключено).

Результаты измерений записывают соответственно в табл. 2.4а, табл. 2.4б и табл. 2.4в (снимаются 5 точек при различных значениях общего тока нагрузки $I_{нз}$, в том числе фиксируется точка при номинальных токах трансформаторов).

Таблица 2.4а

1. ($k_I = k_{II}$) ($U_{\kappa I} = U_{\kappa II}$)										
Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
U_2	$I_{нз}$	$P_{нз}$	U_1	I_{1I}	I_{2I}	S_I	U_1	I_{1II}	I_{2II}	S_{II}
PV2	PA8	–	PV1	PA4	PA6	–	PV1	PA5	PA7	–
B	A	Bm	B	A	A	$B \cdot A$	B	A	A	$B \cdot A$

Таблица 2.4б

2. ($k_I = k_{II}$) ($U_{\kappa I} \neq U_{\kappa II}$)										
Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
U_2	$I_{нз}$	$P_{нз}$	U_1	I_{1I}	I_{2I}	S_I	U_1	I_{1II}	I_{2II}	S_{II}
B	A	Bm	B	A	A	$B \cdot A$	B	A	A	$B \cdot A$

Таблица 2.4в

3. ($k_I \neq k_{II}$) ($U_{\kappa I} = U_{\kappa II}$)										
Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
U_2	$I_{нз}$	$P_{нз}$	U_1	I_{1I}	I_{2I}	S_I	U_1	I_{1II}	I_{2II}	S_{II}
B	A	Bm	B	A	A	$B \cdot A$	B	A	A	$B \cdot A$

Значения мощностей рассчитывают по формулам: $P_{H2} = \sqrt{3}U_2I_{H2}$, $S_I = \sqrt{3}U_1I_{I1}$, $S_{II} = \sqrt{3}U_1I_{I2}$. По данным табл. 2.4а, табл. 2.4б и табл. 2.4в строят зависимости $I_{2I}, I_{2II} = f(I_{H2})$, а также внешние характеристики трансформаторов $U_2 = f(I_{2I}, I_{2II})$.

Для режима номинальной нагрузки следует, используя выражение

$$S_I = S_{H2} S_{номI} U_{кII\%} / (S_{номI} U_{кII\%} + S_{номII} U_{кI\%}), \quad (1)$$

где $S_{H2} = S_I + S_{II}$ – мощность общей нагрузки трансформаторов, теоретически проверить распределение нагрузки между трансформаторами при неравенстве их напряжений короткого замыкания (сравнить результаты расчета по формуле (1) с данными табл. 2.4б).

4.4. Анализ уравнивающего тока параллельно работающих трансформаторов

Для оценки величины уравнивающих токов, протекающих в обмотках при неравенстве коэффициентов трансформации ($k_I \neq k_{II}$), проводят опыты:

1. При **параллельной работе** трансформаторов и **отключенной нагрузке** RR_{H2} (**выключатель QS2 отключен**). В процессе опыта **добавочное сопротивление** $RR_{\delta\delta}$ **отключено**, а **добавочные витки** $W_{\delta\delta}$ **включены**.

2. При **холостом ходе** трансформаторов (**выключатели QS1 и QS2 отключены**). В процессе опыта **добавочные витки** $W_{\delta\delta}$ **включены**. При проведении этого опыта в схему включаются амперметры $PA1, PA2$ и $PA3$ вместо амперметров $PA4, PA5$ и $PA6$.

Измерения проводят при номинальном значении напряжения $U_1 = 127 В$, их результаты записывают соответственно в табл. 2.5а и в табл. 2.5б.

Таблица 2.5а

1. Нагрузка RR_{H2} отключена ($k_I \neq k_{II}$) ($U_{кI} = U_{кII}$)					
$U_1 / PV1$	$U_2 / PV2$	Трансформатор I		Трансформатор II	
		$I_{I1} / PA1$	$I_{2урI} / PA3$	$I_{I2} / PA2$	$I_{2урII} / PA3$
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
127					

Таблица 2.5б

2. Холостой ход ($k_I \neq k_{II}$)					
$U_1 / PV1$	ΔU	Трансформатор I		Трансформатор II	
		$I_{IxI} / PA1$	$I_{2урI}$	$I_{IxII} / PA2$	$I_{2урII}$
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
127			0		0

В табл. 2.5б величина ΔU – значение напряжение между зажимами, например C_1 и C_2 , разомкнутого выключателя QSI . Оно используется при расчете уравнительного тока по формуле (2).

Из сопоставления первичных токов (их величины приведены в табл. 2.5а и в табл. 2.5б) следует, что они не равны. Это объясняется тем, что вторичный уравнительный ток трансформируется в первичные обмотки и геометрически складывается с токами холостого хода.

При параллельной работе трансформаторов на общую нагрузку RR_{H2} уравнительный ток обусловит их неравномерную загрузку (сравнить данные в табл. 2.4а и в табл. 2.4в).

Теоретическая проверка уравнительного тока выполняется по выражению

$$i_{ур} = \Delta \dot{U} / (Z_{кI} + Z_{кII}), \quad (2)$$

где $\Delta \dot{U}$ – векторная разность вторичных напряжений трансформаторов при холостом ходе; $Z_{кI}$, $Z_{кII}$ – сопротивления короткого замыкания трансформаторов;

$$Z_{кI} = U_{кI\%} U_{2I}^2 / 100 S_{номI}, \text{ Ом};$$

$$Z_{кII} = U_{кII\%} U_{2II}^2 / 100 S_{номII}, \text{ Ом}.$$

Значения напряжений короткого замыкания – см. описание Работы №1, табл. 1.2 на с.5.

Результаты расчета уравнительного тока по выражению (2) сравнить с данными табл. 2.5а.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные трансформаторов, схемы испытаний, результаты опытных и теоретических исследований в соответствующих таблицах, графические зависимости.

6. Контрольные вопросы

1. Назовите условия включения трансформаторов на параллельную работу.
2. В каких случаях при включении трансформаторов на параллельную работу будет протекать значительный уравнивающий ток?
3. Почему трансформатор с меньшим значением напряжения короткого замыкания больше перегружается при параллельной работе, чем остальные трансформаторы?
4. Почему не рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы, у которых номинальные мощности отличаются более чем в 3 раза?
5. Что означает номер группы соединения обмоток трансформатора? Как он определяется опытным путем?
6. Как опытным путем выполнить маркировку обмоток трансформатора?
7. Осуществить маркировку выводов обмотки НН согласно заданной схеме и группе соединения обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора.

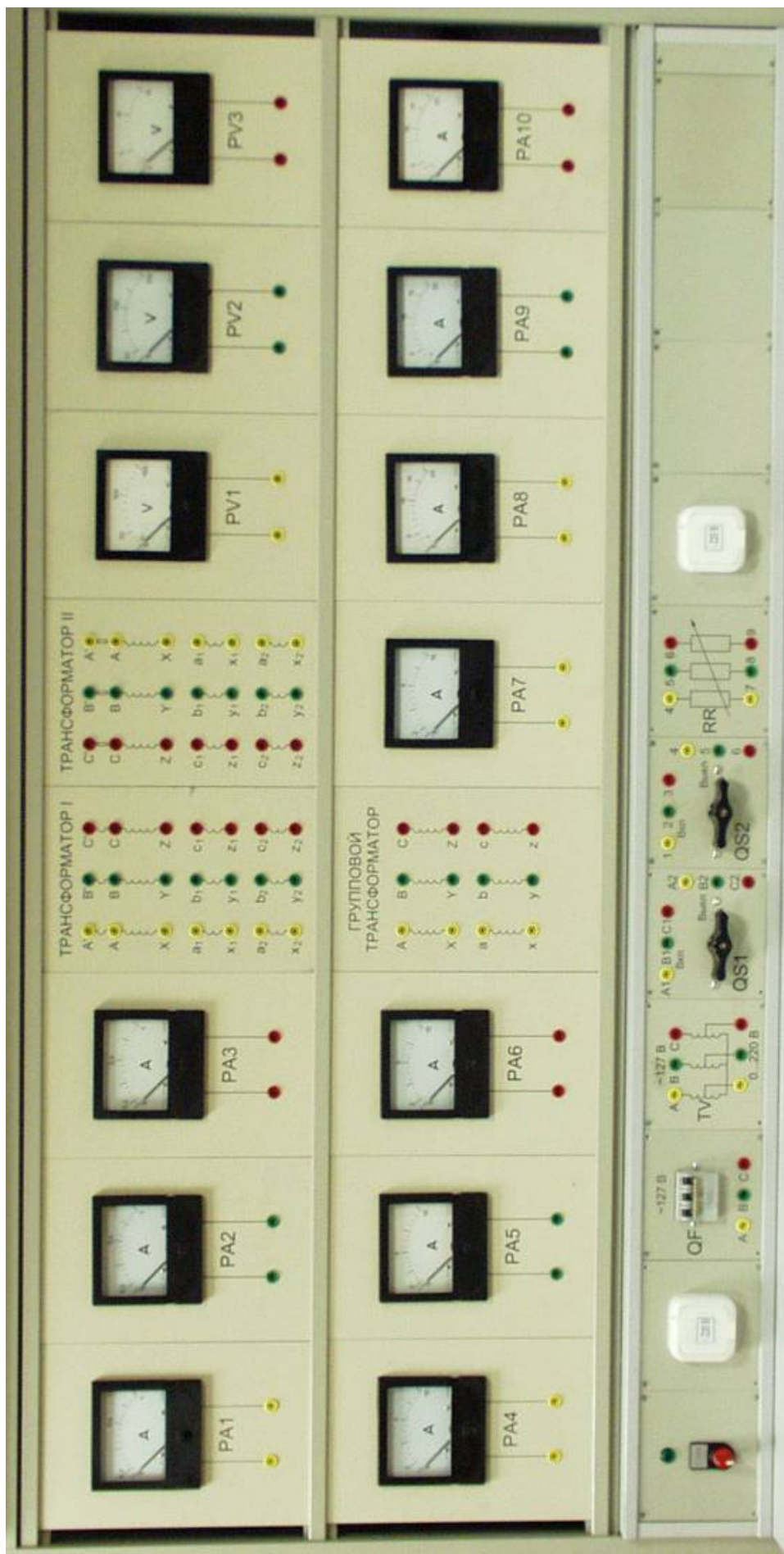


Рис. 2.5. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор”



Рис. 2.6. Общий вид стенда “Трансформатор”