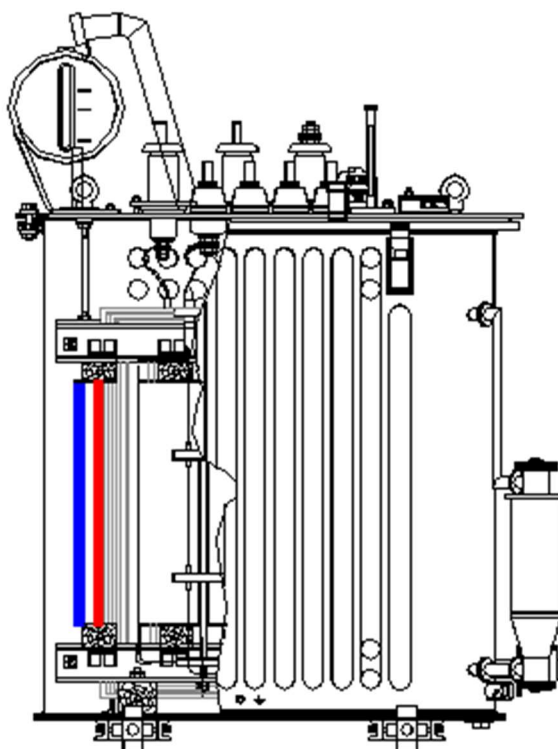


Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2002. - 166 с.

Е.И. Забудский

Электрические машины

Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ



МОСКВА * 2002 * МГАУ

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Термины и определения	6
1. Общие понятия	6
2. Виды трансформаторов	6
3. Магнитная система трансформатора	7
4. Обмотки трансформатора	8
5. Изоляция трансформатора	8

6. Отдельные части трансформатора	9
7. Детали конструкции и параметры частей трансформатора	10
8. Режимы и процессы	11
9. Параметры трансформатора	11
9.1. Общие параметры	11
9.2. Номинальные данные трансформатора	12
2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах	13
3. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов	14
4. Условное обозначение трансформаторов	16
5. Номинальные данные и устройство исследуемого трансформатора ...	18
6. Работа №1	
ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБОМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР	20
7. Работа №2	
ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	37
8. Работа №3	
НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	55
9. Работа №4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА	68
ЛИТЕРАТУРА	98
URL-адреса предприятий, производящих электрические машины и трансформаторы	98
URL-адрес РАО ЕЭС "Россия"	98
Приложения:	
1. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода трансформатора"	99
2. Трансформаторы специального назначения	102
3. Форма отчета по Лабораторной работе (образец оформления)	141
4. Примерная программа дисциплины Электрические машины	154

РАБОТА №1.

ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Оглавление

1.	Цель работы	2	21 ¹
2.	Программа работы	2	21
3.	Основы теории	3	21
	3.1. Устройство и принцип действия	–	22
	3.2. Работа под нагрузкой	–	24
	3.2.1. Т-образная и упрощенная схемы замещения	–	24
	3.2.2. Уравнения равновесия ЭДС и МДС	–	25
	3.2.3. Векторные диаграммы	–	26
	3.2.4. Энергетические диаграммы	–	28
4.	Экспериментальное исследование	3	31
	4.1. Опыт холостого хода	3	31
	4.2. Опыт короткого замыкания	5	33
	4.3 Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика	6	34
	4.4. Расчет внешних характеристик	6	34
	4.5. Расчет зависимости КПД от коэффициента нагрузки	7	35
5.	Содержание отчета	9	36
6.	Контрольные вопросы	9	36
	Рис. 1.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора	4	32
	Рис. 1.2. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор” (ФОТО)	10	–
	Рис. 1.3. Общий вид стенда “Трансформатор” (ФОТО)	11	–

¹ Номера страниц в учебном пособии:

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

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением трансформатора; освоить практические методы проведения опытов холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) и под нагрузкой, а также использования опытных данных для получения параметров трансформатора и основных характеристик.

2. Программа работы

2.1. Ознакомиться с устройством испытуемого трансформатора и записать его паспортные данные.

2.2. Определить коэффициент трансформации.

2.3. Провести опыт ХХ и построить характеристики

$$I_x, \quad P_x, \quad \cos \varphi_x = f(U_{I_x}) \text{ при } I_2 = 0.$$

2.4. Провести опыт КЗ и построить характеристики

$$I_k, \quad P_k, \quad \cos \varphi_k = f(U_{I_k}) \text{ при } U_2 = 0.$$

2.5. Провести опыт под нагрузкой и построить внешнюю характеристику

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos \varphi_2 = 1,0.$$

2.6. На основании данных опытов ХХ и КЗ определить параметры Т-образной схемы замещения трансформатора. Вычертить ее для режима нагрузки.

2.7. Определить напряжение короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие.

2.8. Рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора при активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1,0$), активно-индуктивной ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = +0,6$) и активно-емкостной ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = -0,6$). Сравнить расчетную характеристику при $\cos \varphi_2 = 1,0$ с опытной.

2.9. Рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки $\eta = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 1,0$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$. Определить нагрузку, соответствующую максимальному значению КПД.

3. Основы теории [9, с. 21..31]

.....

4. Экспериментальное исследование

Записать паспортные данные исследуемого трансформатора и определить его первичный номинальный ток $I_{I\text{ном}}$ (см. термин 9.2.9 на с.12 [9]), оценить пределы измерений приборов, используемых в опытах.

4.1. Опыт холостого хода

Схема опыта представлена на рис. 1.1а. (при выборе амперметров следует учесть, что ток холостого хода $I_x \approx 0,1I_{I\text{ном}}$). Перед подключением схемы к сети автотрансформатор TV устанавливают в положение, обеспечивающее минимальное напряжение U_{Ix} на зажимах трансформатора. Затем включают автомат QF .

При проведении опыта следует получить характеристики холостого хода I_x , P_x , $\cos \varphi_x = f(U_{Ix})$ при $I_2 = 0$, изменяя автотрансформатором TV первичное напряжение U_{Ix} в пределах $(0,5 \dots 1,25)U_{I\phi.\text{ном}}$. Опытные данные (6–7 точек, причем одна из них должна соответствовать $U_{Ix} = U_{I\phi.\text{ном}}$) записываются в табл.1.1.

Таблица 1.1

Измерение							Расчет				Расчет при $U_{Ix} = U_{I\phi.\text{ном}}$		
U_{Ix}	U_{2x}	I_{Ax}	I_{Bx}	I_{Cx}	P_{Ax}	P_{Cx}	I_x	P_x	$\cos \varphi_x$	k	Z_m	R_m	X_m
B	B	A	A	A	дел	дел	A	Bm	–	–	Om	Om	Om
					Bm	Bm							

Примечание. Все расчеты, предусмотренные табл. 1.1, выполняются на компьютере в соответствии с Pascal-программой, приведенной в прил.1 (с. 99, сл. [9]).

В табл.1.1 U_{Ix} , U_{2x} – фазные напряжения, соответствующие одноименным зажимам первичной и вторичной обмоток, например, $A-X$ и $a-x$; $I_x = (I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Cx})/3$ – среднее арифметическое значение токов фаз; $P_x = C_w(P_{Ax} - P_{Cx})$ – мощность, потребляемая трансформатором из сети при холостом ходе, C_w – цена деления ваттметра; $\cos \varphi_x = P_x / 3U_{Ix}I_x$ – коэффициент мощности; $k = U_{2x} / U_{Ix} = U_{BH} / U_{HH}$ – коэффициент трансформации.

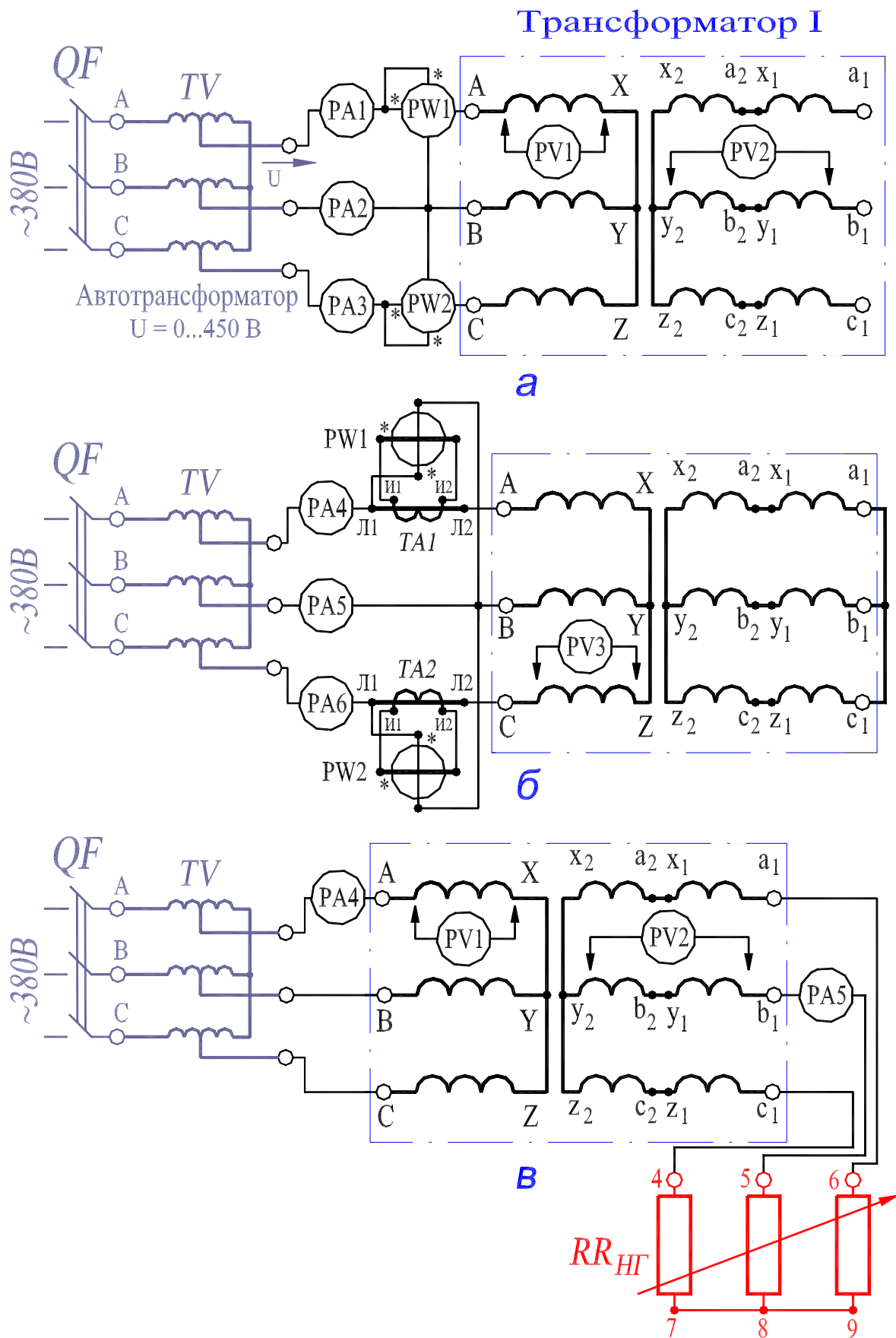


Рис. 1.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в режиме:
а – холостого хода; **б** – короткого замыкания; **в** – нагрузки

Параметры R_m , X_m , и Z_m намагничивающего контура схемы замещения трансформатора рассчитываются так:

$$Z_x = Z_I + Z_m = U_{I\phi.\text{ном}} / I_x \approx Z_m;$$

$$R_x = R_I + R_m = P_x / 3I_x^2 \approx R_m; \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}.$$

4.2. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится по схеме, приведенной на рис. 1.16, при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

К трансформатору подводят пониженное напряжение $U_{I\kappa} = (5...10) \%$ от номинального напряжения $U_{I\phi.\text{ном}}$, чтобы ток короткого замыкания $I_{I\kappa}$ был равен или несколько превышал (не более чем на 20 %) номинальный ток первичной обмотки. Затем, постепенно снижая автотрансформатором TV первичное напряжение, записывают показания приборов для 4–5 значений $U_{I\kappa}$. При этом одному из значений $U_{I\kappa}$ должно соответствовать значение тока $I_{I\kappa} = I_{I\text{ном}}$. По результатам опытов, которые заносят в табл.1.2, строят характеристики короткого замыкания трансформатора I_κ , P_κ , $\cos \varphi_\kappa = f(U_{I\kappa})$.

Таблица 1.2

Измерение				Расчет	
$U_{I\kappa}$	$I_{I\kappa}$	$P_{A\kappa}$	$P_{C\kappa}$	P_κ	$\cos \varphi_\kappa$
B	A	дел	дел	Bm	—
		Bm	Bm		

Продолжение табл. 1.2

Расчет только при $I_{I\kappa} = I_{I\text{ном}}$								
Z_κ	R_κ	X_κ	$Z_{\kappa 75}$	$R_{\kappa 75}$	U_κ	$U_{\kappa 75}$	U_{a75}	U_p
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	$\%$	$\%$	$\%$	$\%$

В табл.1.2 $U_{I\kappa}$, $I_{I\kappa}$ – фазные напряжение и ток; $P_\kappa = C_w k_t (P_{A\kappa} + P_{C\kappa})$ – мощность, потребляемая трансформатором из сети при коротком замыкании; C_w – цена деления ваттметра; k_t – коэффициент трансформации трансформатора тока; $\cos \varphi_\kappa = P_\kappa / 3U_{I\kappa} I_{I\kappa}$ – коэффициент мощности.

Параметры схемы замещения трансформатора:

$$Z_\kappa = Z_I + Z'_2 = U_{I\kappa} / I_{I\text{ном}};$$

$$R_\kappa = R_I + R'_2 = P_\kappa / 3I_{I\text{ном}}^2; \quad X_\kappa = X_I + X'_2 = \sqrt{Z_\kappa^2 - R_\kappa^2}.$$

Напряжение короткого замыкания рассчитывают по формуле

$$u_{\kappa\%} = 100U_{I\kappa} / U_{I\phi.\text{ном}} = 100I_{I\text{ном}} Z_\kappa / U_{I\phi.\text{ном}}.$$

Для Т-образной схемы замещения исследуемого трансформатора можно принять $R_1 \approx R'_2 = R_K/2$, $X_1 \approx X'_2 = X_K/2$.

Активное сопротивление R_K следует привести к расчетной рабочей температуре трансформатора, равной 75°C для трансформаторов с изоляцией классов A , E , B . С этой целью можно воспользоваться приближенной формулой $R_{K75} \approx 1,2R_K$. Тогда, с учетом приведения, полное сопротивление двух обмоток

$Z_{K75} = \sqrt{R_{K75}^2 + X_K^2}$, а напряжение короткого замыкания $u_{K75\%} = 100I_{\text{ном}}Z_{K75}/U_{1\phi.\text{ном}}$. Активная и реактивная составляющие напряжения КЗ будут соответственно равны: $u_{a75\%} = 100I_{\text{ном}}R_{K75}/U_{1\phi.\text{ном}}$, $u_{p\%} = 100I_{\text{ном}}X_K/U_{1\phi.\text{ном}}$

По значению напряжения короткого замыкания $U_{K\%}$ и его составляющих $U_{a\%}$ и $U_{p\%}$ можно судить о возможности параллельной работы трансформаторов, об изменении вторичного напряжения при изменении нагрузки, о величине установившегося тока трехфазного КЗ на зажимах вторичной обмотки в условиях эксплуатации.

4.3. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика

Схема опыта приведена на рис. 1.16, к вторичной обмотке подсоединена активная нагрузка. Порядок проведения опыта следующий. Трансформатор без нагрузки через автотрансформатор TV подключают к питающей сети с напряжением U_1 и устанавливают значение напряжения U_{1x} таким, чтобы $U_{2x} = U_{2\phi.\text{ном}}$. Затем трансформатор загружают равномерно, по всем фазам, постепенно меняя ток I_2 в пределах от $(0...1,2)I_{2\text{ном}}$ и поддерживая при этом постоянным напряжение U_{1x} . В качестве нагрузки используется реостат $RR_{\text{нз}}$. Результаты опытов (5–6 точек) заносятся в табл.1.3.

Таблица 1.3

$U_{1\phi}$	$U_{2\phi}$	$I_{1\phi}$	$I_{2\phi}$	β
B	B	A	A	—

В табл.1.3 $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора.

По опытным данным строится внешняя характеристика трансформатора $U_{2\phi} = f(\beta)$ {или $U_{2\phi} = f(I_{2\phi})$ } при $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = 1,0$.

4.4. Расчет внешних характеристик

Внешние характеристики можно получить аналитически, то есть расчетным путем. При любой нагрузке вторичное напряжение определяется так:

$$U_{2\phi} = U_{2\phi.\text{ном}}(1,0 - 0,01\Delta U\%),$$

где $U_{2\phi.\text{ном}}$ – номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансфор-

матора; $\Delta U\%$ – изменение вторичного напряжения при нагрузке, равное

$$\Delta U\% = 100(U_{2\phi.\text{ном}} - U_{2\phi})/U_{2\phi.\text{ном}}.$$

При номинальной нагрузке величина $\Delta U\%$ составляет 2...5 %. С достаточной точностью изменение напряжения можно определить по выражению

$$\Delta U\% = \beta(U_{a75\%} \cos \varphi_2 + U_{p\%} \sin \varphi_2).$$

Следует задаться значениями коэффициента нагрузки трансформатора $\beta = 0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ и при заданных значениях $\cos \varphi_2$ и $\sin \varphi_2$ (разд. 2) рассчитать $\Delta U\%$ и $U_{2\phi}$. Результаты расчетов сводят в табл.1.4.

Таблица 1.4

β	Характер нагрузки					
	Активная, $\cos \varphi_2 = 1,0$		Активно–индуктивная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = +0,6$		Активно–емкостная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = -0,6$	
	$\Delta U\%$	$U_{2\phi}$	$\Delta U\%$	$U_{2\phi}$	$\Delta U\%$	$U_{2\phi}$
-	%	B	%	B	%	B

Используя полученные данные, строят расчетные внешние характеристики $U_{2\phi} = f(\beta)$ в одних координатах с опытной внешней характеристикой и сравнивают их между собой (для $\cos \varphi_2 = 1,0$).

4.5. Расчет зависимости КПД от коэффициента нагрузки

ГОСТ 3484.1-88 [15] рекомендует определять КПД косвенным методом, используя значения потерь мощности в трансформаторе, получаемые из опытов ХХ и КЗ. Расчетное выражение для определения КПД:

$$\eta = 1,0 - \left(P_{x.\text{ном}} + \beta^2 P_{k.\text{ном}75} \right) / \left(\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{x.\text{ном}} + \beta^2 P_{k.\text{ном}75} \right),$$

где $P_{x.\text{ном}}$ – магнитные потери мощности в магнитопроводе, равные мощности ХХ при $U_{I_x} = U_{I\phi.\text{ном}}$; $P_{k.\text{ном}75}$ – электрические потери в обмотках, равные

мощности потерь КЗ при $I_{I_k} = I_{I.\text{ном}}$ и температуре 75°C , т.е.

$$P_{k.\text{ном}75} = 3I_{I.\text{ном}}^2 R_{k75}; S_{\text{ном}} – \text{номинальная мощность трансформатора.}$$

Используя данные опытов ХХ и КЗ и задавшись рядом значений коэффициента нагрузки β , необходимо рассчитать КПД при фиксированном значении коэффициента мощности и построить зависимости $\eta = f(\beta)$. Результаты расчетов сводятся в табл.1.5.

Таблица 1.5

	β	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
η	$\cos \varphi_2 = 1,0$								
	$\cos \varphi_2 = 0,8$								

Коэффициент полезного действия максимален *при равенстве* электрических потерь в обмотках и магнитных потерь в стали

Кривая $\eta = f(\beta)$ имеет максимум при таком значении β , когда электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали. Наиболее вероятная нагрузка, при которой $\eta = \eta_{max}$ имеет место, при значении $\beta = 0,5 \dots 0,7$.

Значение коэффициента нагрузки β , которое соответствует максимальному значению КПД η_{max} , определяют по формуле

$$\beta_{opt} = \sqrt{P_{x.ном} / P_{к.ном75}}.$$

Максимальное значение КПД

$$\eta_{max} = 1,0 - (P_{x.ном}) / (0,5 \beta_{opt} S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{x.ном}).$$

Результаты расчетов заносятся в табл.1.6.

Таблица 1.6

$P_{x.ном}$	$P_{к.ном75}$	β_{opt}	η_{max}	
			$\cos \varphi_2 = 1,0$	$\cos \varphi_2 = 0,8$

Значения КПД η_{max} , рассчитанные для $\cos \varphi_2 = 1,0$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$, необходимо сопоставить с данными, полученными на основе зависимостей $\eta = f(\beta)$ (см. табл. 1.5).

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные исследованного трансформатора, схемы испытаний и Т-образную схему замещения трансформатора, результаты опытных и расчетных данных, сведенные в соответствующие таблицы и представленные графически (форма отчета по лабораторной работе (*образец оформления*) приведена в прил. 3, с. 141, сл. [9]).

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение, устройство и принцип действия трансформатора.
2. Что такое коэффициент трансформации?
3. Почему токи ХХ в обмотке трехфазного трехстержневого трансформатора не одинаковы по фазам?
4. Чем обусловлена необходимость проведения опытов ХХ и КЗ при испытаниях силовых трансформаторов?
5. В чем смысл определения параметров и построения схемы замещения трансформатора?
6. Дать понятие напряжения КЗ трансформатора и пояснить его важность для целей практики.
7. Почему мощность, потребляемую из сети в режиме ХХ, принимают за магнитные потери, а в режиме КЗ – за электрические потери?
8. Какие потери для трансформатора считаются постоянными, а какие – переменными?
9. Что называется изменением вторичного напряжения трансформатора, отчего оно зависит и в каких единицах выражается?
10. Чем объяснить, что у трехфазного трехстержневого трансформатора магнитная система несимметрична? Отражается ли это обстоятельство на рабочем режиме трансформатора?
11. Дать понятие о коэффициенте полезного действия и коэффициенте мощности трансформатора. Сопоставить эти коэффициенты.

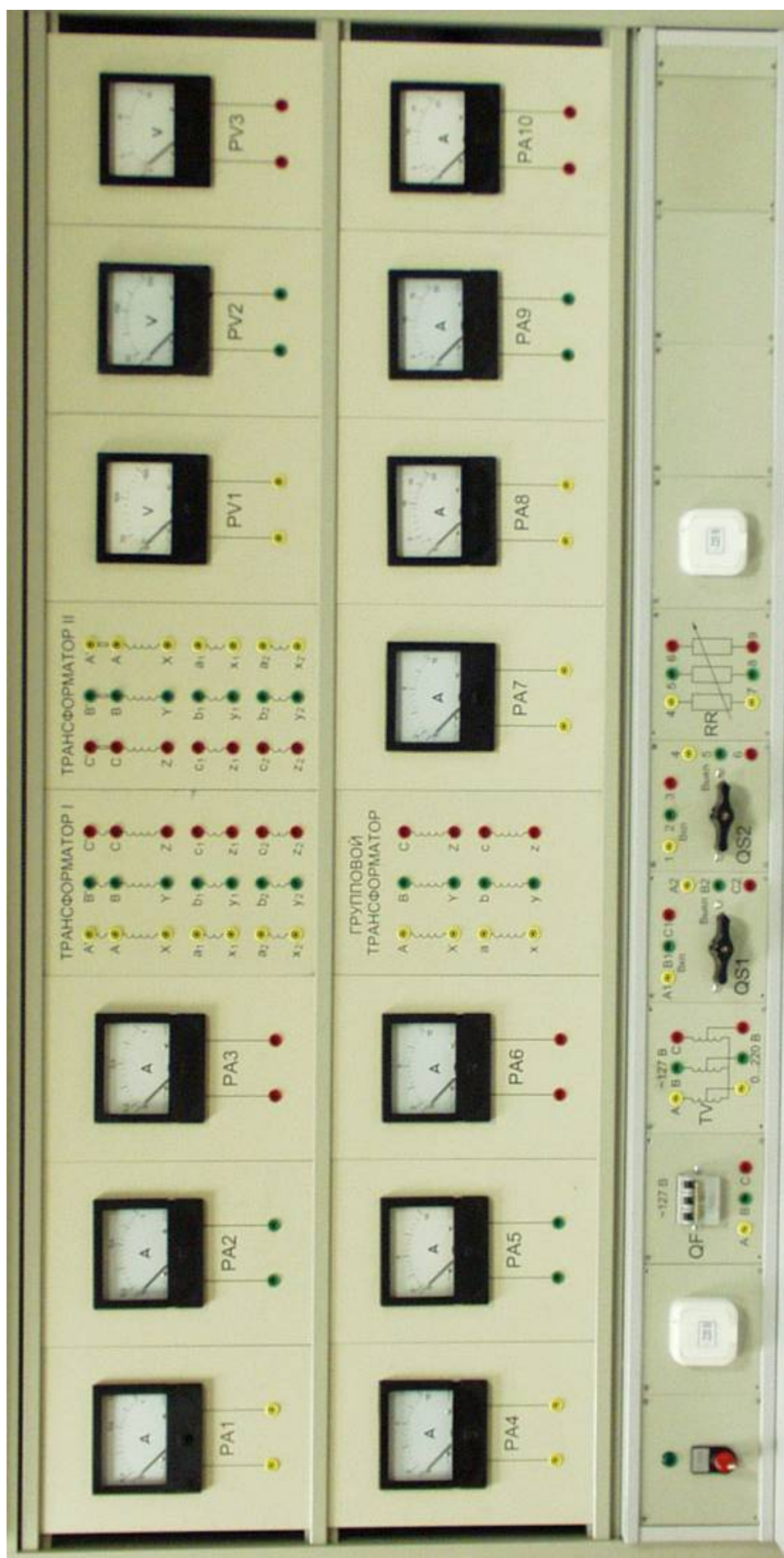


Рис. 1.2. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор”



Рис. 1.3. Общий вид стенда “Трансформатор”

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: $a - Y/D-11; б - D/D-0$	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://zei.narod.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.

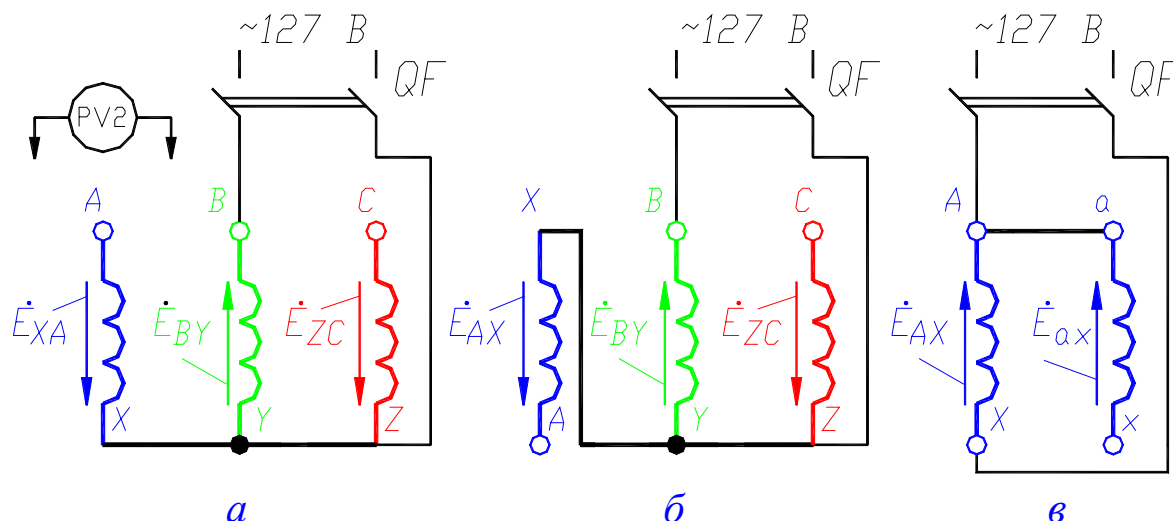


Рис. 2.1. Проверка маркировки выводов обмоток:

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.

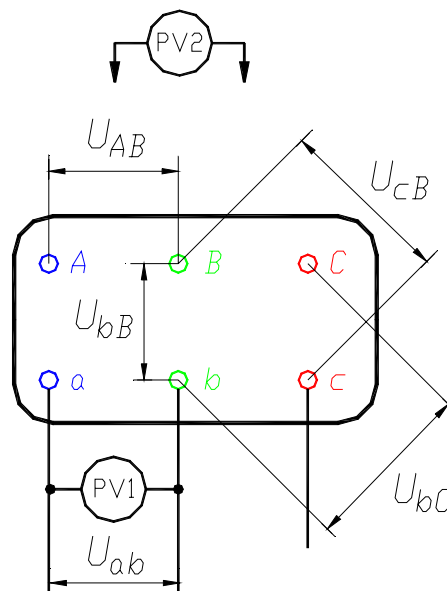


Рис. 2.2. К иллюстрации метода двух вольтметров проверки схем и групп соединения обмоток

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*

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

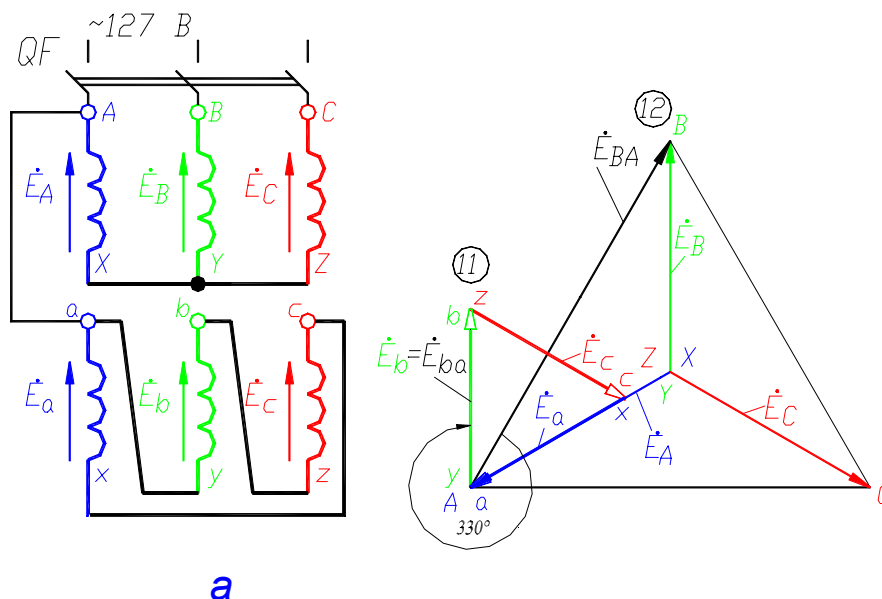
где $k_L = U_{AB}/U_{ab}$ – **линейный** коэффициент трансформации.

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>										

* **П р и м е ч а н и е.** В верхнюю часть ячеек записываются измеренные значения напряжения, а в нижнюю их часть – расчетные.



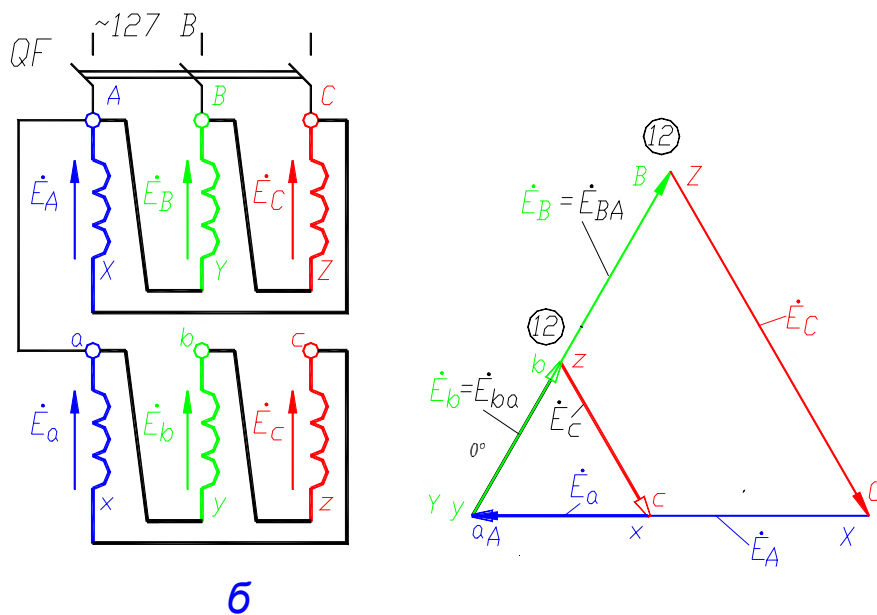


Рис. 2.3. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений:
а – У/Д-11; **б** – Д/Д-0

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.

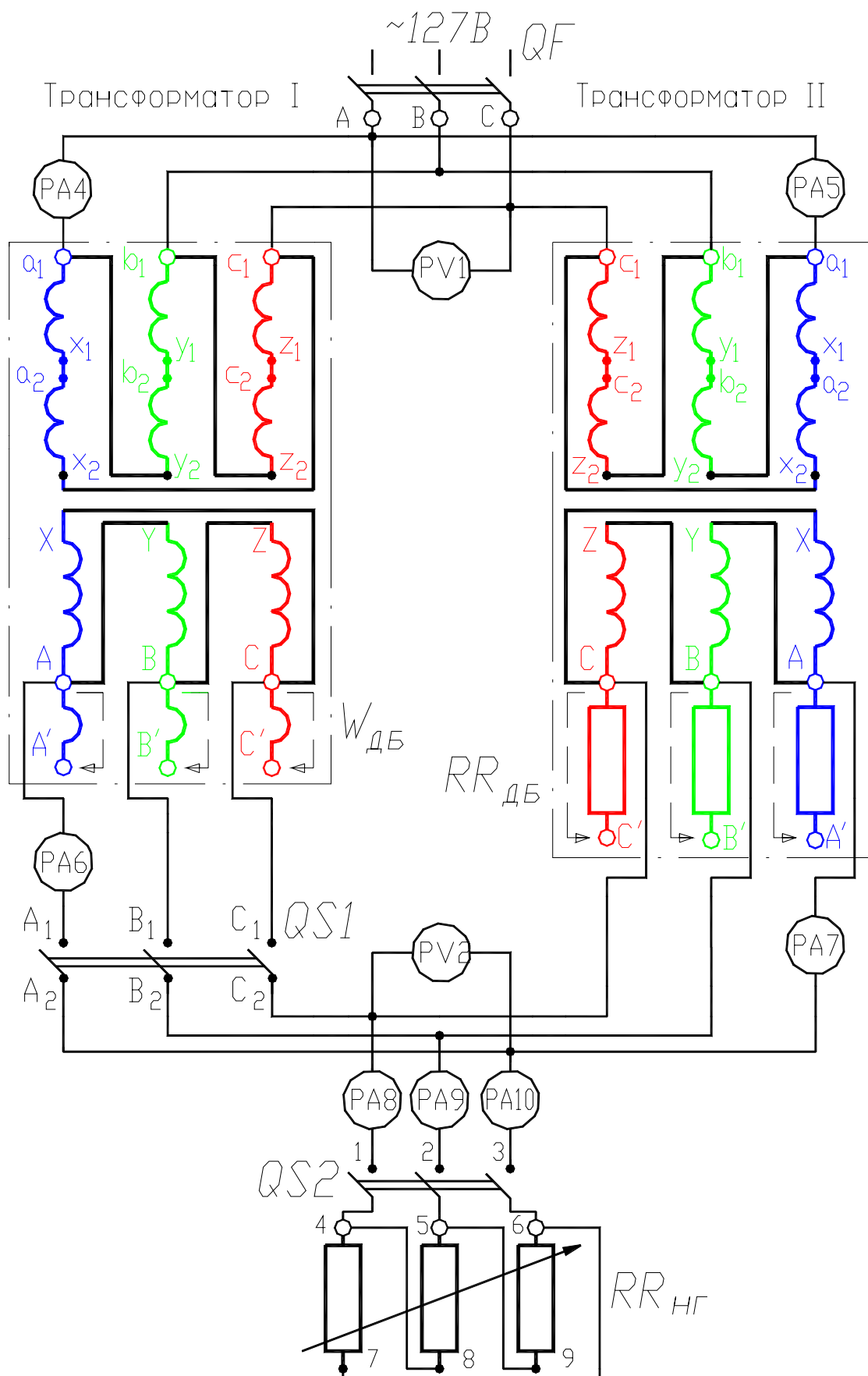


Рис. 2.4. Схема лабораторной установки для исследования трансформаторов при параллельной работе

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_I	I_{I_I}	I_{2_I}	S_I	U_I	$I_{I_{II}}$	$I_{2_{II}}$	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_I	I_{I_I}	I_{2_I}	S_I	U_I	$I_{I_{II}}$	$I_{2_{II}}$	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_I	I_{I_I}	I_{2_I}	S_I	U_I	$I_{I_{II}}$	$I_{2_{II}}$	S_{II}
B	A	Bm	B	A	A	$B \cdot A$	B	A	A	$B \cdot A$

Значения мощностей рассчитывают по формулам: $P_{н2} = \sqrt{3}U_2I_{н2}$, $S_I = \sqrt{3}U_1I_{I1}$, $S_{II} = \sqrt{3}U_1I_{I2}$. По данным табл. 2.4а, табл. 2.4б и табл. 2.4в строят зависимости $I_{2I}, I_{2II} = f(I_{н2})$, а также внешние характеристики трансформаторов $U_2 = f(I_{2I}, I_{2II})$.

Для режима номинальной нагрузки следует, используя выражение

$$S_I = S_{н2} S_{номI} U_{кII\%} / (S_{номI} U_{кII\%} + S_{номII} U_{кI\%}), \quad (1)$$

где $S_{н2} = S_I + S_{II}$ – 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 уравнительного тока параллельно работающих трансформаторов

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

1. При **параллельной работе** трансформаторов и **отключенной нагрузке** $RR_{н2}$ (**выключатель QS2 отключен**). В процессе опыта **добавочное сопротивление** $RR_{дб}$ **отключено**, а **добавочные витки** $W_{дб}$ **включены**.

2. При **холостом ходе** трансформаторов (**выключатели QS1 и QS2 отключены**). В процессе опыта **добавочные витки** $W_{дб}$ **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 $RR_{н2}$ отключена ($k_I \neq k_{II}$) ($U_{кI} = U_{кII}$)					
$U_I / PV1$	$U_2 / PV2$	Трансформатор I		Трансформатор II	
		$I_{I1} / PA1$	$I_{2ypI} / PA3$	$I_{I2} / PA2$	$I_{2ypII} / PA3$
<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 ($k_I \neq k_{II}$)					
$U_I / PV1$	ΔU	Трансформатор I		Трансформатор II	
		$I_{IxI} / PA1$	I_{2ypI}	$I_{IxII} / PA2$	I_{2ypII}
<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 $RR_{н2}$ уравнительный ток обусловит их неравномерную загрузку (сравнить данные в табл. 2.4а и в табл. 2.4б).

Теоретическая проверка уравнительного тока выполняется по выражению

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

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.

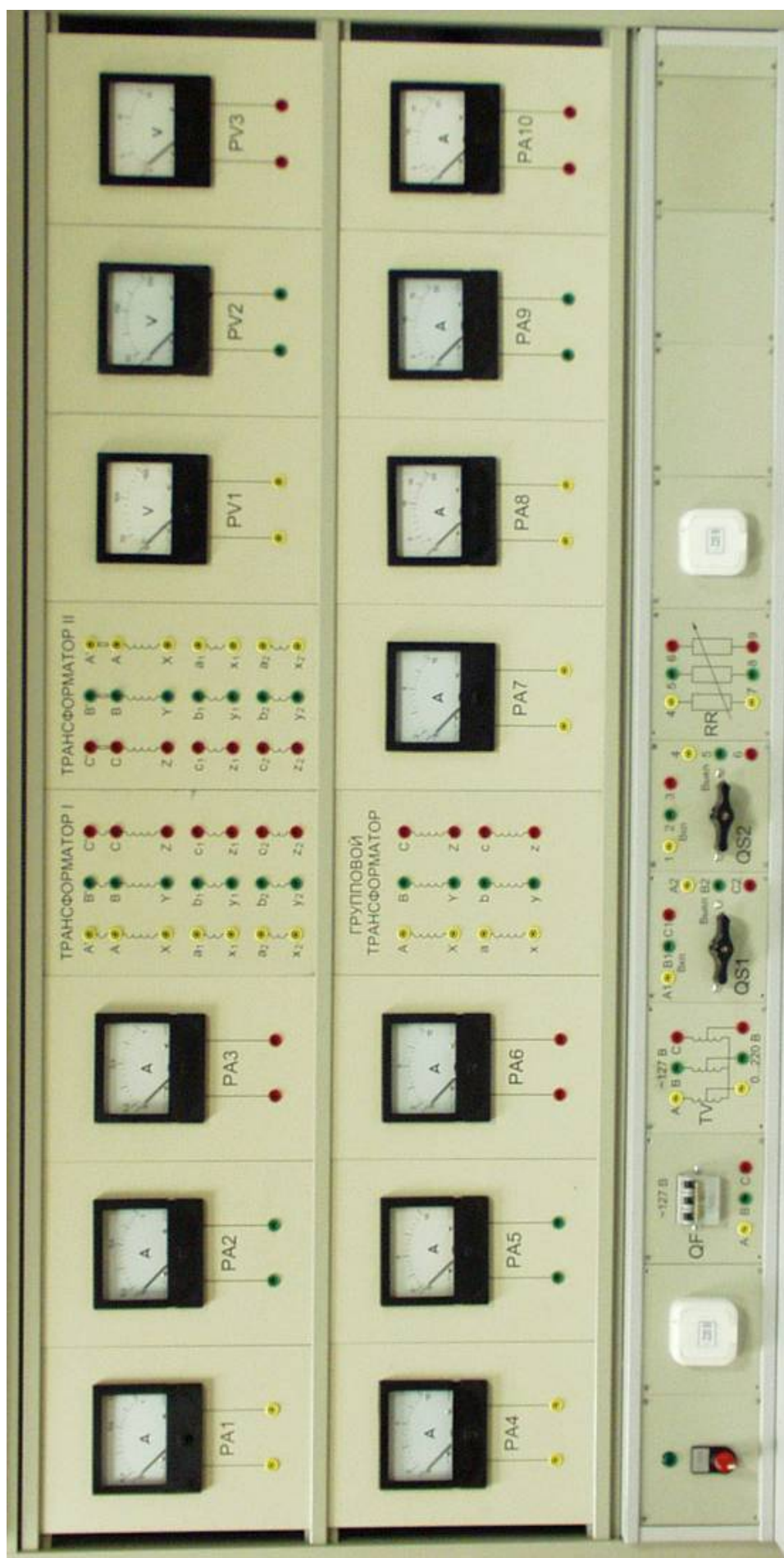


Рис. 2.5. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор”



Рис. 2.6. Общий вид стенда “Трансформатор”

РАБОТА № 3.

НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Оглавление

1.	Цель работы	2	57 ¹
2.	Программа работы	2	57
3.	Основы теории	3	57
	3.1. Трансформатор со схемой соединения Y/Y_n	—	58
	3.2. Трансформатор со схемой соединения D/Y_n	—	64
	3.3. Трансформатор со схемой соединения Y/Z_n	—	65
4.	Экспериментальное исследование	3	66
	4.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке	3	66
	4.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора	3	67
	4.3. Аналитическое определение распределения токов трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке	4	67
	4.4. Определение величины смещения нейтрали на основе векторной диаграммы	4	69
	4.5. Аналитическое определение величины смещения нейтрали	5	69
5.	Содержание отчета	6	69
6.	Контрольные вопросы	6	69
	Рис.3.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора при однофазной нагрузке	7	60
	Рис.3.2. Схема лабораторной установки для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора	8	68
	Рис. 3.3. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор” (ФОТО)	9	—
	Рис. 3.4. Общий вид стенда “Трансформатор” (ФОТО)	10	—

¹ Номера страниц в учебном пособии:

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

1. Цель работы

Провести сравнительный анализ влияния схемы соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора на искажение симметрии первичных и вторичных линейных и фазных напряжений. Овладеть методикой определения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения Y/Y_n , D/Y_n , Y/Z_n .

2. Программа работы

2.1. Собрать на лабораторном стенде, поочередно, схемы соединения обмоток трансформатора Y/Y_n , Y/Z_n , D/Y_n , нагрузить трансформатор однофазной нагрузкой, измерить распределение токов в обмотках, линейные и фазные напряжения.

2.2. Определить опытным путем для всех вышеуказанных схем величину сопротивления нулевой последовательности трансформатора в целом.

2.3. Рассчитать распределение токов в первичных обмотках и сравнить с результатами эксперимента (п. 2.1).

2.4. Построить в масштабе векторные диаграммы вторичных напряжений, на основании экспериментальных данных (п. 2.1). Определить из диаграмм величину смещения нейтрали (E_n).

2.5. Рассчитать величину смещения нейтрали для всех вышеуказанных схем. При расчете использовать экспериментальные данные (пп. 2.1 и 2.2). Сравнить результаты расчета со значением E_n (п. 2.4).

3. Основы теории

.....

4. Экспериментальное исследование

Для исследования используют трехстержневой трехфазный трансформатор, на котором изменяются только схемы соединения обмоток.

4.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке

Обмотки трансформатора соединяют поочередно в соответствии со схемами, представленными на рис. 3.1а, б и в. В качестве нагрузки используют одну фазу трехфазного реостата. На первичной обмотке трансформатора с помощью автотрансформатора устанавливают напряжение, равное примерно половине номинального, и нагружают трансформатор однофазной нагрузкой так, чтобы ток во вторичной обмотке был приближен к номинальному значению ($I_a = I_{н2} = 6\text{ A}$). Показания амперметров и значения линейных и фазных напряжений обмоток фиксируют (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Схема со- единения	Первичная обмотка								Вторичная обмотка						
	Измерение				Расчет				Измерение						
	U_{AB}	I_A	I_B	I_C	K_{21}	I_A	I_B	I_C	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_{af}	U_{bf}	U_{cf}	$I_{н2} = I_a$
	B	A	A	A	-	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A
Y/Y_H															6
D/Y_H															6
Y/Z_H															6

4.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора

Для определения величины сопротивления нулевой последовательности поочередно собирают схемы, приведенные на рис. 3.2а, б и в.

Поскольку при несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности возникает во вторичной обмотке трансформатора, последнюю при определении опытным путем сопротивления нулевой последовательности Z_{0n} используют в качестве питающей обмотки, подводя к ней напряжение U однофазного переменного тока. Однофазный ток I при этом соответствует току нулевой последовательности (рис. 3.2).

Величина сопротивления нулевой последовательности Z_{0n} и его составляющих рассчитывается по формулам:

$$Z_{0n} = U/3I; \quad R_{0n} = P/3I^2; \quad X_{0n} = \sqrt{Z_{0n}^2 - R_{0n}^2},$$

где P – активная мощность, потребляемая трансформатором из сети.

Перед включением схемы необходимо установить минимальное напряжение при помощи автотрансформатора. После включения схемы, регулируя напряжение автотрансформатором, установить ток I , равный току однофазной нагрузки: $I_{н2} = I_a = 6\text{ А}$ (табл. 3.1). Результаты измерений и расчетов занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Схема соединения	Измерение				Расчет				
	U	P	I	E_n	Z_{0n}	R_{0n}	X_{0n}	$I_{0n} = I_{н2}/3$	E_{0n}
	B	Bm	A	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	A	B
Y/Y_n			6					2	
D/Y_n			6					2	
Y/Z_n			6					2	

4.3. Аналитическое определение распределения токов трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке

Распределение линейных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ первичной обмотки рассчитывают так: для схемы Y/Y_n – по формулам (9), для схемы D/Y_n – по формулам (14), для схемы Y/Z_n – по формулам (18) раздела 3 (см. [9], с. 61, 64, 65). Результаты расчетов заносят в табл. 3.1 (графа “Расчет”) и сравнивают с распределением токов, полученным из опыта (графа “Измерение”). Необходимо учитывать, что при выводе формул (9), (14) и (18) величина тока холостого хода принималась равной нулю.

4.4. Определение величины смещения нейтрали на основе векторной диаграммы

Для анализа величины смещения нейтрали (ЭДС E_n) при схемах соединения обмоток $Y/Y_n, Y/Z_n, D/Y_n$ необходимо построить векторную диаграмму линейных U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} и фазных $U_{a.f}, U_{b.f}, U_{c.f}$ напряжений вторичной обмотки для каждой из указанных схем. На миллиметровой бумаге, (в масштабе, 10 В/см) с помощью циркуля строится треугольник линейных напряжений

и звезда фазных напряжений (данные из табл. 3.1, графа “Вторичная обмотка”). Для определения величины ЭДС E_n необходимо найти центр тяжести (точка пересечения медиан) треугольника линейных напряжений и измерить расстояние между центром тяжести и нейтральной точкой звезды фазных напряжений. Полученная величина является ЭДС E_n . Результаты записываются в табл. 3.2 (графа “Измерение”).

4.5. Аналитическое определение величины смещения нейтрали

Величина смещения нейтрали может быть также определена по формуле

$$E_{0n} \approx I_{0n} Z_{0n},$$

где величина тока нулевой последовательности определяется так

$$I_{0n} = I_n / 3 = I_{нз} / 3 = 2 \text{ A},$$

здесь $I_{нз} = I_a = 6 \text{ A}$ есть ток однофазной нагрузки (табл. 3.1).

Расчетные значения ЭДС E_{0n} для рассматриваемых схем заносятся в табл. 3.2. (графа “Расчет”) и сравниваются со значениями ЭДС E_n , полученными из векторных диаграмм (табл. 3.2, графа “Измерение”).

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные трансформатора, схемы испытаний, результаты опытных и теоретических исследований (табл. 3.1 и 3.2), векторные диаграммы вторичных напряжений трансформатора.

6. Контрольные вопросы

1. Какая схема соединения обмоток трансформатора обуславливает неуравновешенность его магнитной системы (по отношению к основному потоку нулевой последовательности)?
2. Как влияет конструкция магнитной системы на работу трансформатора при несимметричной нагрузке?
3. С какой целью в силовых трансформаторах стремятся уменьшить величину потоков нулевой последовательности, каким образом это делается?
4. Почему ограничивается величина тока в нейтральном проводе? Какова его допустимая величина, если на подстанции установлен трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n ? Какова величина допустимой несимметрии напряжений?
5. Что такое сопротивление нулевой последовательности трансформатора в целом, почему схема соединения обмоток влияет на его величину?

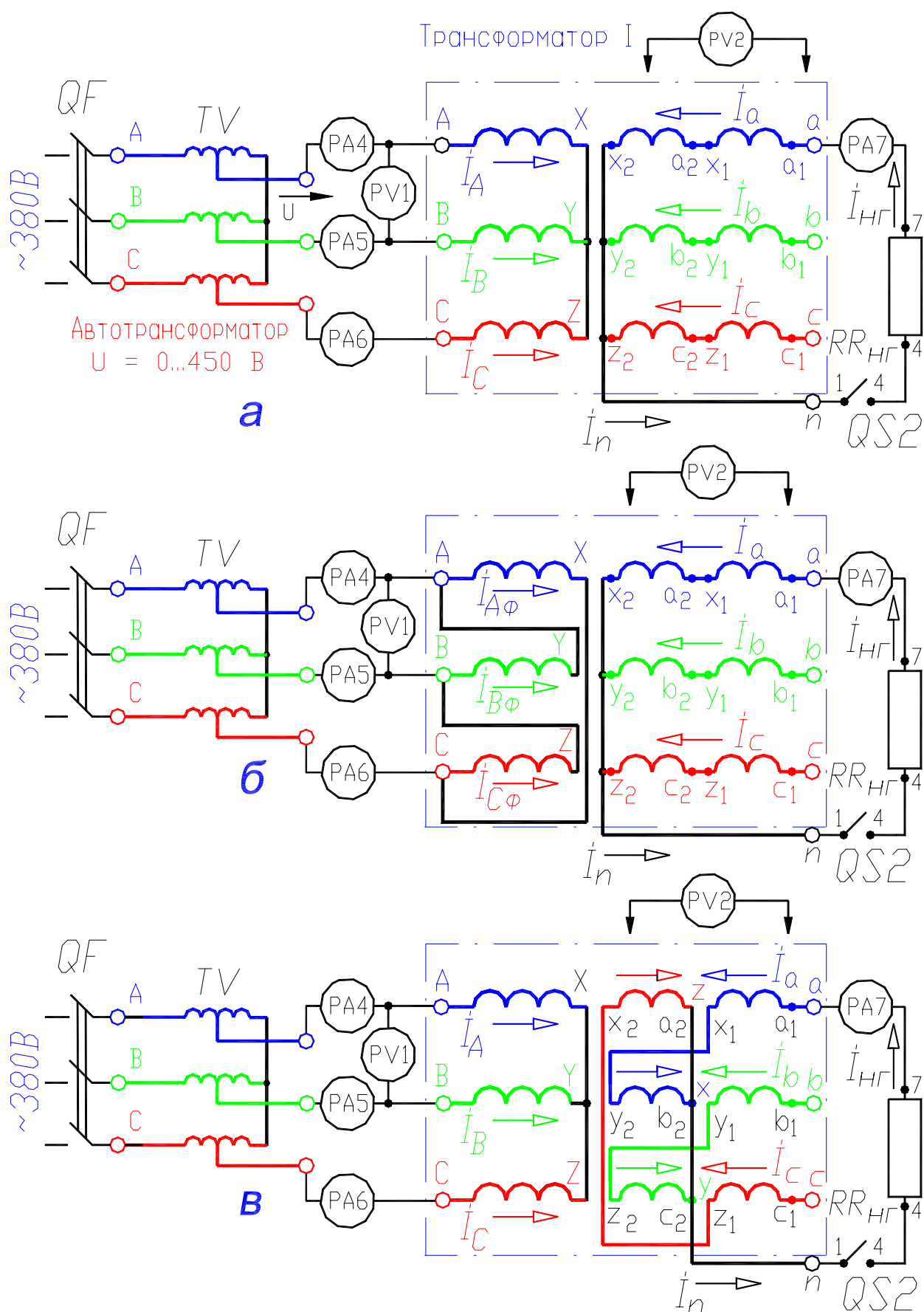


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора при однофазной нагрузке со схемой соединения: **а** – Y/Y_H; **б** – D/Y_H; **в** – Y/Z_H

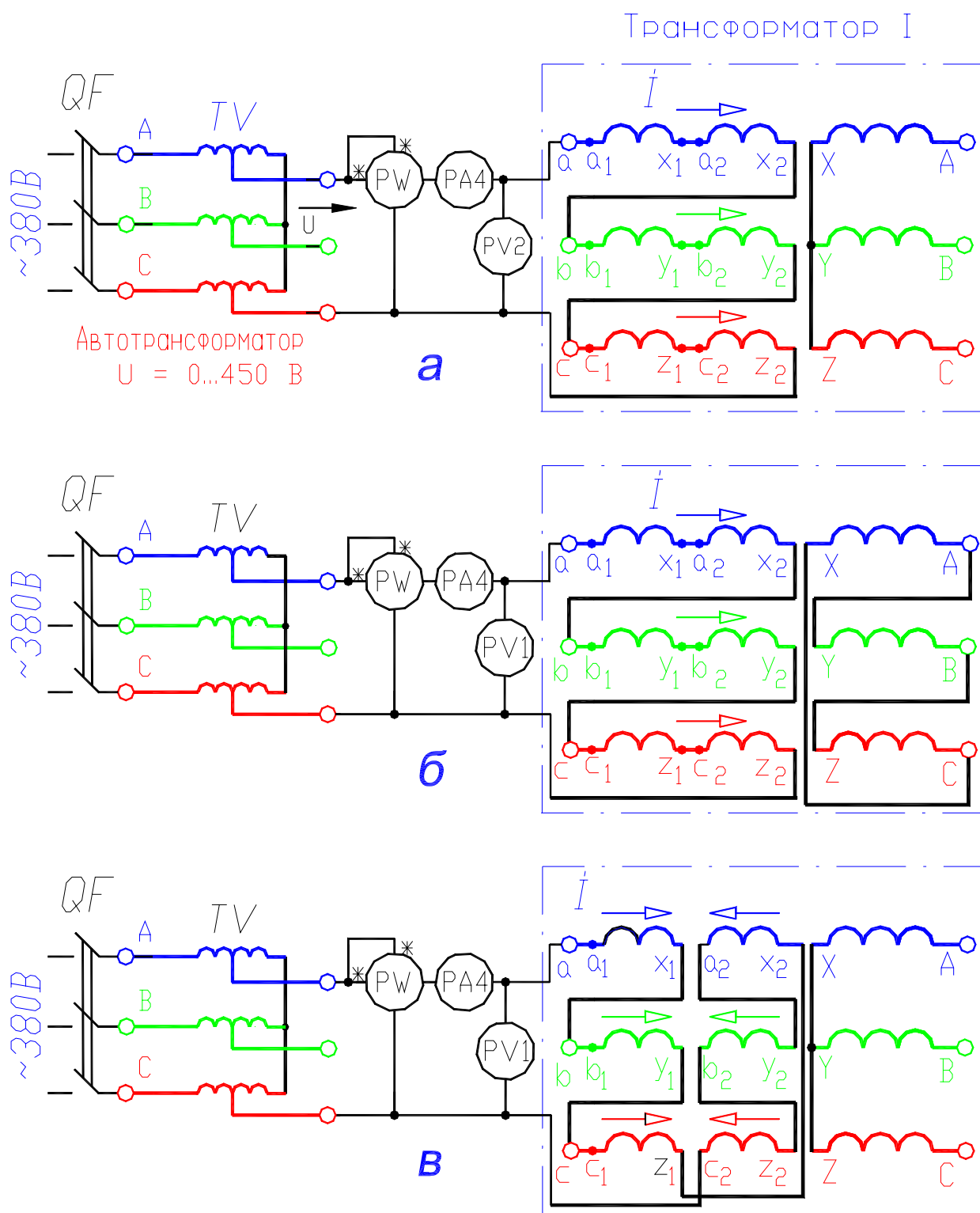


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения: **а** – Y/Y_H ; **б** – D/Y_H ; **в** – Y/Z_H

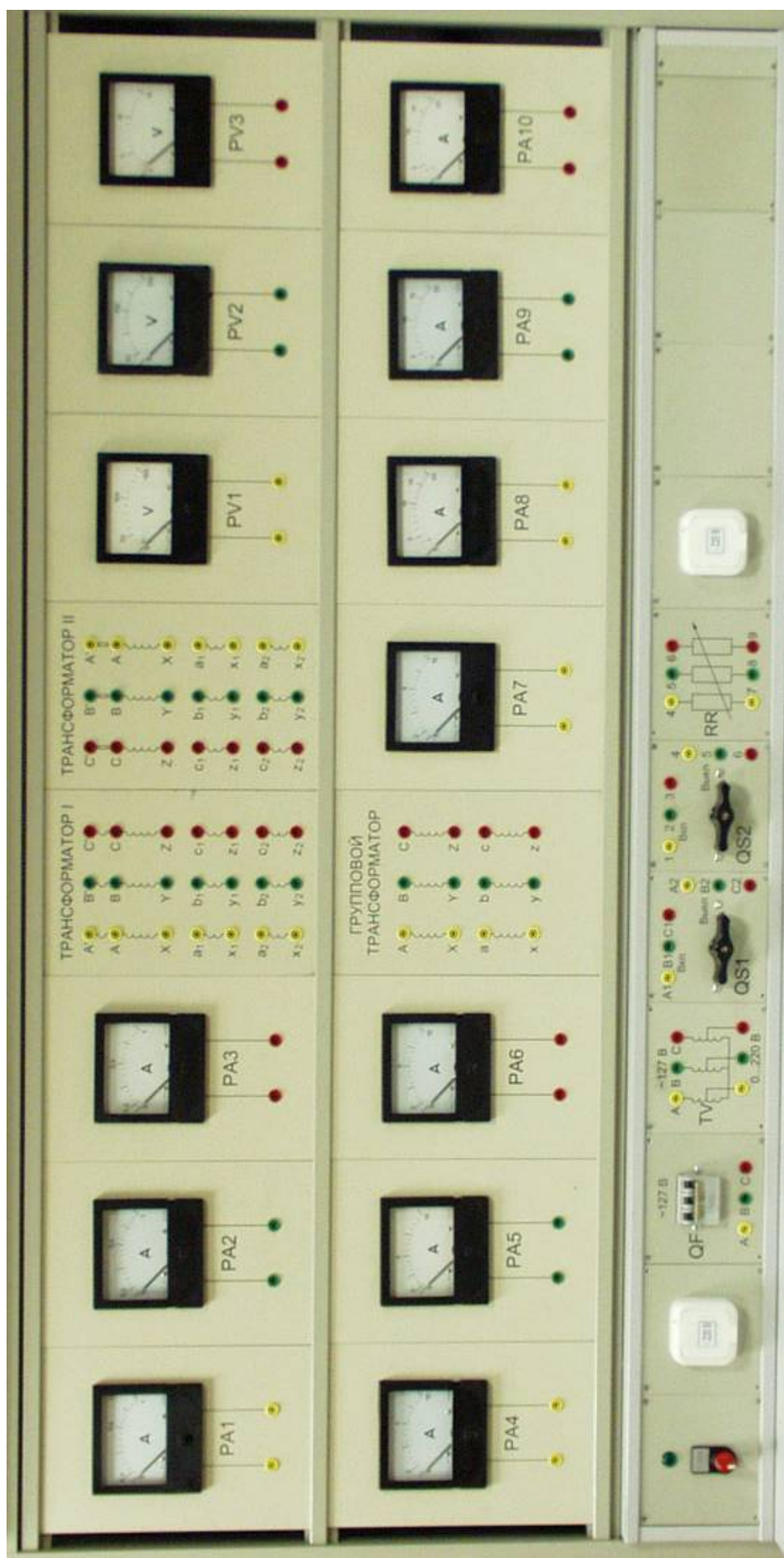


Рис. 3.3. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор”



Рис. 3.4. Общий вид стенда “Трансформатор”