

## РАБОТА №1.

# ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

### Оглавление

1.	Цель работы .....	2	21 <sup>1</sup>
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	–

<sup>1</sup> 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

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

2.4. Провести опыт КЗ и построить характеристики

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

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  $I_{I_{ном}}$  (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  $I_x \approx 0,1I_{I_{ном}}$ ). Перед подключением схемы к сети автотрансформатор  $TV$  устанавливают в положение, обеспечивающее минимальное напряжение  $U_{I_x}$  на зажимах трансформатора. Затем включают автомат  $QF$ .

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

Таблица 1.1

Измерение							Расчет				Расчет при $U_{I_x} = U_{I_{ф.ном}}$		
$U_{I_x}$	$U_{2x}$	$I_{Ax}$	$I_{Bx}$	$I_{Cx}$	$P_{Ax}$	$P_{Cx}$	$I_x$	$P_x$	$\cos \varphi_x$	$k$	$Z_m$	$R_m$	$X_m$
$B$	$B$	$A$	$A$	$A$	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  $U_{I_x}$ ,  $U_{2x}$  – 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;  $\cos \varphi_x = P_x/3U_{I_x}I_x$  – коэффициент мощности;  $k = U_{2x}/U_{I_x} = U_{ВН}/U_{НН}$  – коэффициент трансформации.

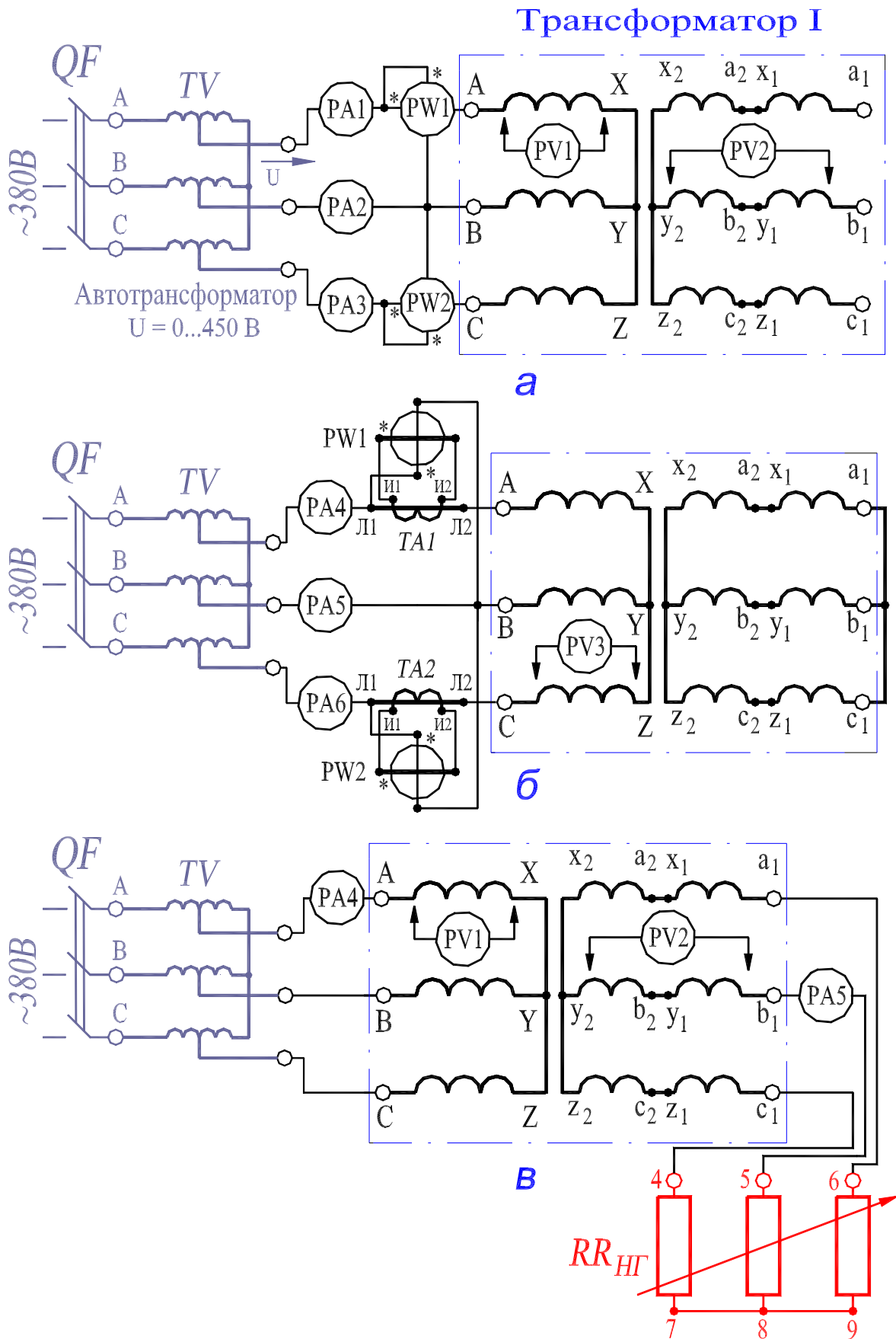


Рис. 1.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в режиме:  
**а** – холостого хода; **б** – короткого замыкания; **в** – нагрузки

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

$$Z_x = Z_l + Z_m = U_{I\phi,ном} / I_x \approx Z_m;$$

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

#### 4.2. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится по схеме, приведенной на рис. 1.1б, при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

К трансформатору подводят пониженное напряжение  $U_{Iк} = (5...10) \%$  от номинального напряжения  $U_{I\phi,ном}$ , чтобы ток короткого замыкания  $I_{Iк}$  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  $U_{Iк}$ . При этом одному из значений  $U_{Iк}$  должно соответствовать значение тока  $I_{Iк} = I_{Iном}$ . По результатам опытов, которые заносят в табл.1.2, строят характеристики короткого замыкания трансформатора  $I_k$ ,  $P_k$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{Iк})$ .

Таблица 1.2

Измерение				Расчет	
$U_{Iк}$	$I_{Iк}$	$P_{Ак}$	$P_{Ск}$	$P_k$	$\cos \varphi_k$
$B$	$A$	дел	дел	$Bm$	–
		$Bm$	$Bm$		

→ Продолжение табл. 1.2

Расчет только при $I_{Iк} = I_{Iном}$								
$Z_k$	$R_k$	$X_k$	$Z_{к75}$	$R_{к75}$	$U_k$	$U_{к75}$	$U_{а75}$	$U_p$
$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$\%$	$\%$	$\%$	$\%$

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

Параметры схемы замещения трансформатора:

$$Z_k = Z_l + Z'_2 = U_{Iк} / I_{Iном};$$

$$R_k = R_l + R'_2 = P_k / 3I_{Iном}^2; \quad X_k = X_l + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Напряжение короткого замыкания рассчитывают по формуле

$$u_{к\%} = 100U_{Iк} / U_{I\phi,ном} = 100I_{Iном} Z_k / U_{I\phi,ном}.$$

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  $75^\circ\text{C}$  для трансформаторов с изоляцией классов А, Е, В. 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  $u_{K75\%} = 100I_{1\text{ном}}Z_{K75}/U_{1\phi.\text{ном}}$ . Активная и реактивная составляющие напряжения КЗ будут соответственно равны:  $u_{a75\%} = 100I_{1\text{ном}}R_{K75}/U_{1\phi.\text{ном}}$   $u_{p\%} = 100I_{1\text{ном}}X_K/U_{1\phi.\text{ном}}$

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. 1.1б, 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  $RR_{н2}$ . Результаты опытов (5–6 точек) заносятся в табл.1.3.

Таблица 1.3

$U_{1\phi}$	$U_{2\phi}$	$I_{1\phi}$	$I_{2\phi}$	$\beta$
В	В	А	А	–

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  $U_1 = const$ ,  $\cos \varphi_2 = 1,0$ .

#### 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

		Характер нагрузки					
		Активная, $\cos \varphi_2 = 1,0$		Активно–индуктивная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = +0,6$		Активно–емкостная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = -0,6$	
$\beta$		$\Delta U_{\%}$	$U_{2\phi}$	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\phi}$	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\phi}$
	-	%	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  $U_{1x} = U_{1\phi.\text{ном}}$ ;  $P_{k.\text{ном}75}$  – электрические потери в обмотках, равные мощности потерь КЗ при  $I_{1k} = I_{1\text{ном}}$  и температуре  $75^\circ\text{C}$ , т.е.  $P_{k.\text{ном}75} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_{k75}$ ;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность трансформатора.

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

Таблица 1.5

		$\beta$	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$\eta$	$\cos \varphi_2 = 1,0$									
	$\cos \varphi_2 = 0,8$									

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

*Кривая  $\eta = f(\beta)$  имеет максимум при таком значении  $\beta$ , 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  $\beta$ , которое соответствует максимальному значению КПД  $\eta_{max}$ , определяют по формуле

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

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

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

Значения КПД  $\eta_{max}$ , 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.

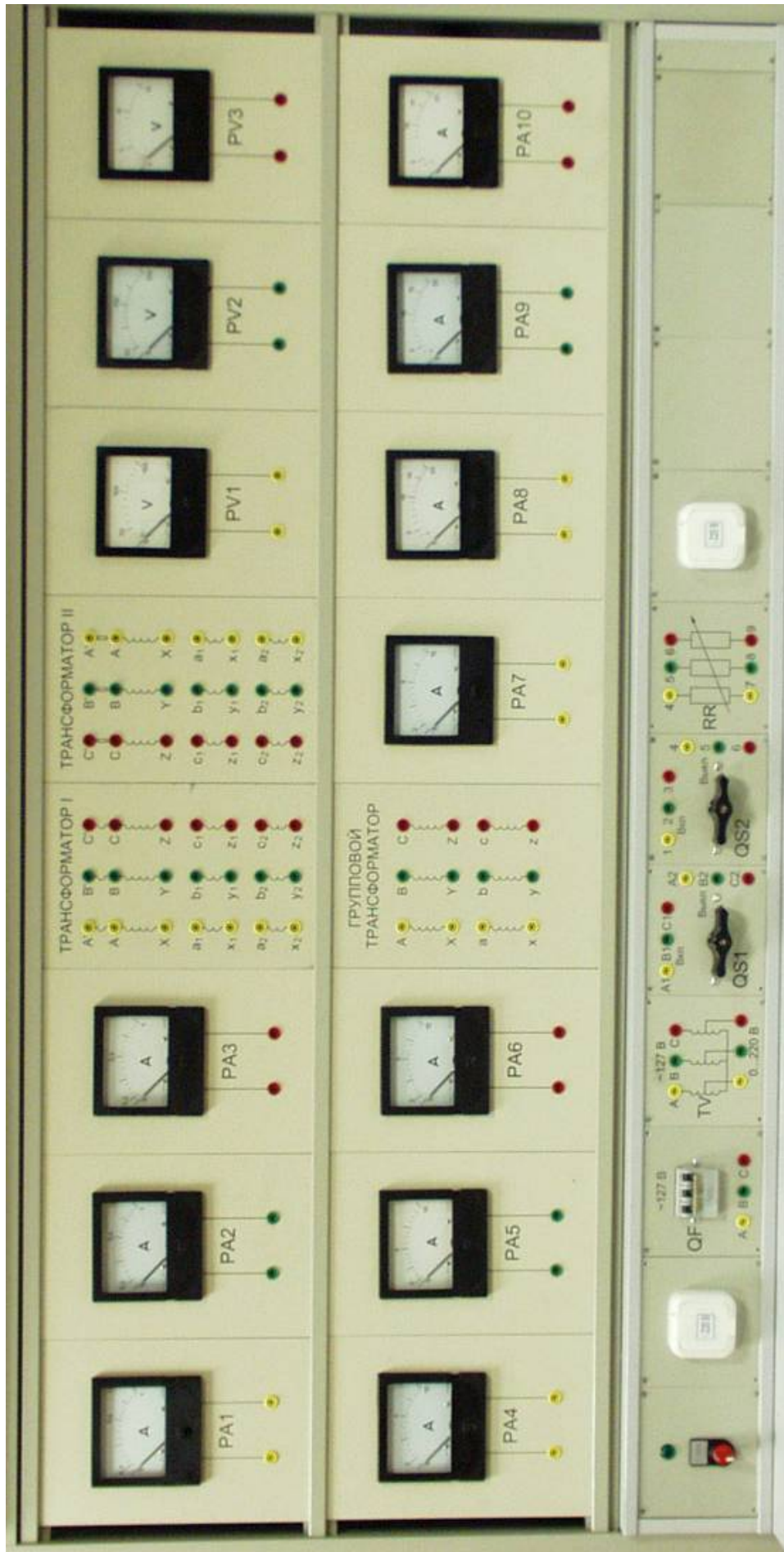


Рис. 1.2. Передняя (приборная) панель стенда “Трансформатор”



Рис. 1.3. Общий вид стенда “Трансформатор”