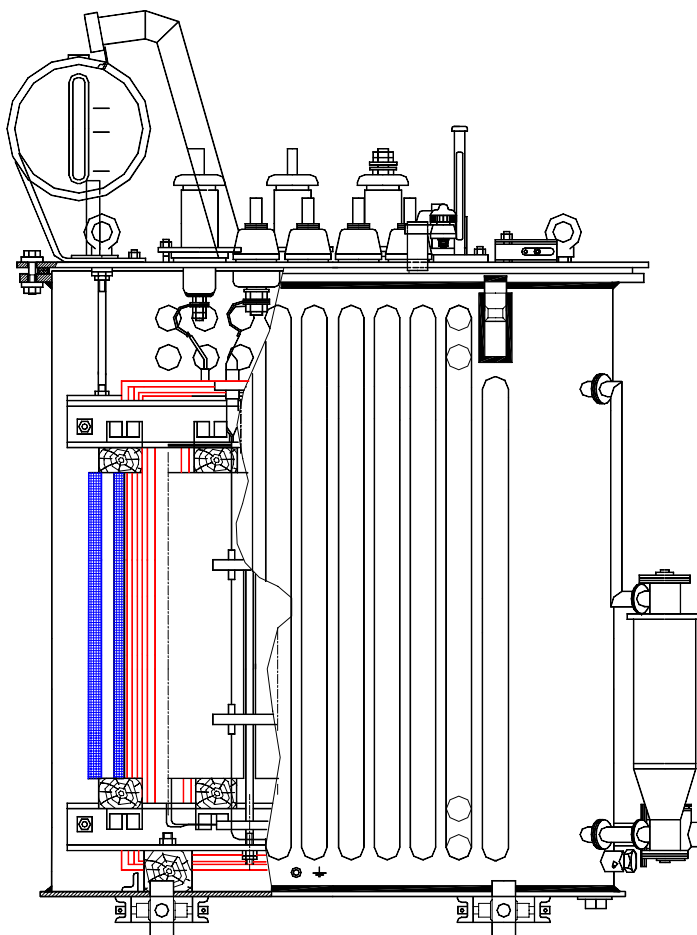


Московский государственный агроинженерный университет
Кафедра Электроснабжение и Электрические машины



Электрические машины

Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Отчет по лабораторной работе №1

Выполнил студент гр. _____
/ _____ /

Принял
профессор Е.И.Забудский

2011

Содержание *

1. Цель работы	2
2. Программа работы	2
3. Номинальные величины исследуемого трансформатора	3
4. Т-образная схема замещения трансформатора	3
5. Опыт холостого хода	4
6. Опыт короткого замыкания	5
7. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика трансформатора	6
8. Расчет и построение внешних характеристик	6
9. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента нагрузки	7
10. Схемы и графики	9
11. Оценка результатов эксперимента и расчета	15
Примечание. Образец построения графика	17

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

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

2.4. Провести опыт КЗ и построить характеристики

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

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 и 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.

* Для защиты отчета необходимо знать:

- 1) назначение и содержание выполненных опытов,
- 2) физическую природу параметров Т-образной схемы замещения трансформатора,
- 3) физическую природу экспериментальных и расчетных зависимостей.

3. Номинальные величины исследуемого трехфазного трансформатора

Тип трансформатора – ТС-2,5/0,25

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$S_{ном}$		$кВ \cdot А$
Первичное напряжение	$U_{1л}$		$В$
Вторичное напряжение	$U_{2л}$		$В$
Линейный ток первичной обмотки ¹	$I_{1л}$		$А$
Линейный ток вторичной обмотки ¹	$I_{2л}$		$А$
Частота	f		$Гц$
Число фаз	m		–
Схема соединения обмоток	Y/Y		–
Способ охлаждения			
Характер нагрузки			
Ток холостого хода ²	i_x		$\%$
Потери холостого хода ²	P_x		$Вт$
Напряжение короткого замыкания ³	u_k		$\%$
Потери короткого замыкания ³	P_k		$Вт$

Примечания:

1. Значения номинальных токов $I_{1л}$ и $I_{2л}$ рассчитаны по формулам ([9] с.12, п. 9.2.9):

$$I_{1л} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{1л}}, \quad I_{2л} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{2л}}$$

2. Значения тока и потерь холостого хода определены по данным опыта ХХ, которые соответствуют номинальному первичному напряжению $U_{1л} = B$ (разд. 5, с. 4).

3. Значения напряжения и потерь короткого замыкания определены по данным опыта КЗ, которые соответствуют номинальному первичному току $I_{1л} = A$ (разд. 6, с. 5).

4. Т-образная схема замещения трансформатора

Трансформатор, у которого обмотки имеют только магнитную связь, может быть заменен эквивалентной схемой, называемой Т-образной схемой замещения (рис. 1.1). В ней сопротивления R_1 и X_1 определяют первичную обмотку, а R'_2 и X'_2 – вторичную. Индуктивные сопротивления X_1 и X'_2 обусловлены магнитными потоками рассеяния обмоток. Схемы замещения обмоток объединены в точках 1 и 2 намагничивающим контуром с сопротивлениями R_m и X_m . Индуктивное сопротивление X_m обусловлено основным магнитным потоком, а сопротивление R_m является *фиктивным* и его величина определяется потерями мощности в стали магнитопровода. Сопротивления вторичной обмотки $R'_2 = k^2 R_2$; $X'_2 = k^2 X_2$ и нагрузки $Z'_{нг} = k^2 Z_{нг}$ приведены к числу витков первичной обмотки. Также приведены значения ЭДС и тока вторичной обмотки: $E'_2 = kE_2 = E_1$, $I'_2 = I_2/k$, где $k = W_1/W_2$ – коэффициент трансформации. Это обеспечивает эквивалентную замену магнитно-связанных цепей электрически связанными цепями.

Параметры схемы замещения определяются из опытов ХХ и КЗ трансформатора.

5. Опыт холостого хода

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1.2. При проведении опыта к первичной обмотке подводилось напряжение U_{I_x} , которое изменялось в пределах $(0,5 \dots 1,25)U_{I_{\phi,ном}}$. Опытные и расчетные данные занесены в табл.1.1.

Таблица 1.1

Измерение							Расчет*				Расчет ТОЛЬКО при $U_{I_x} = U_{I_{\phi,ном}}$		
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	$\frac{\text{дел}}{Bm}$	$\frac{\text{дел}}{Bm}$	A	Bm	–	–	Om	Om	Om
										–	–	–	–
										–	–	–	–
										–	–	–	–
										–	–	–	–
										–	–	–	–
133													
										–	–	–	–

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; $k = U_{2x}/U_{I_x}$ – коэффициент трансформации.

По данным опыта ХХ определены параметры R_m , X_m , и Z_m намагничивающего контура Т-образной схемы замещения трансформатора (рис. 1.1):

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

$$R_x = R_l + R_m = P_x / 3I_x^2 \approx R_m;$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \text{ Характеристики ХХ } I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_{I_x}) \text{ представлены на рис. 1.3.}$$

* Величины рассчитываются на компьютере в соответствии с Паскаль-программой, приведенной в Прил. 1 ([9] с. 99...101).

6. Опыт короткого замыкания

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1.4. При проведении опыта к первичной обмотке подводилось пониженное напряжение $U_{Iк} = (5...10)\%$ от номинального напряжения $U_{Iф.ном}$. Опытные и расчетные данные занесены в табл.1.2.

Таблица 1.2

Измерение				Расчет	
$U_{Iк}$	$I_{Iк}$	$P_{Ак}$	$P_{Ск}$	$P_{к}$	$\cos\varphi_{к}$
<i>В</i>	<i>А</i>	<i>дел</i> <i>Вт</i>	<i>дел</i> <i>Вт</i>	<i>Вт</i>	—
	6,3				

Продолжение табл. 1.2

Расчет только при $I_{Iк} = I_{Iном}$								
$Z_{к}$	$R_{к}$	$X_{к}$	$Z_{к75}$	$R_{к75}$	$U_{к}$	$U_{к75}$	U_{a75}	$U_{р}$
<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—

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

По данным опыта КЗ определены параметры схемы замещения (рис. 1.1):

$$Z_K = Z_1 + Z'_2 = U_{1K} / I_{1ном};$$

$$R_K = R_1 + R'_2 = P_K / 3I_{1ном}^2;$$

$$X_K = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

а также напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$u_{к\%} = 100U_{1к} / U_{1ф.ном} = 100I_{1ном}Z_K / U_{1ф.ном}.$$

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 приведено к расчетной рабочей температуре трансформатора, равной $75^\circ C$. Приблизительно $R_{K75} \approx 1,2R_K$. Полное сопротивление двух обмоток $Z_{K75} = \sqrt{R_{K75}^2 + X_K^2}$, а напряжение короткого замыкания $u_{к75\%} = 100I_{1ном}Z_{K75} / U_{1ф.ном}$. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания соответственно равны: $u_{a75\%} = 100I_{1ном}R_{K75} / U_{1ф.ном}$ и $u_{p\%} = 100I_{1ном}X_K / U_{1ф.ном}$.

Характеристики КЗ I_K , P_K , $\cos \varphi_K = f(U_{1K})$ представлены на рис. 1.5.

7. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика трансформатора

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1.6. При отсутствии нагрузки к первичной обмотке трансформатора подводилось напряжение U_{1x} , при котором $U_{2x} = U_{2ф.ном}$. Затем трансформатор загружался равномерно, по всем трем фазам. При этом вторичный ток I_2 изменялся в пределах $(0 \dots 1,2)I_{2ном}$. Напряжение U_{1x} поддерживалось неизменным. В качестве нагрузки использовался нагрузочный реостат (активное сопротивление). Опытные и расчетные данные занесены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$U_{1ф} = const$	$U_{2ф}$	$I_{1ф}$	$I_{2ф}$	β
B	B	A	A	–
				I

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

Внешняя характеристика трансформатора $U_{2ф} = f(\beta)$, снятая при $U_1 = const$ и $\cos \varphi_2 = 1,0$, представлена на рис. 1.7 сплошной линией.

8. Расчет и построение внешних характеристик

Внешние характеристики можно получить расчетным путем. При любой нагрузке вторичное напряжение определяется так:

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

где $U_{2ф.ном}$ – номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора;

$\Delta U_{\%}$ – 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 $\Delta U_{\%}$ для силовых трансформаторов составляет 2...5%. С достаточной точностью изменение напряжения можно определить по выражению

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

Задаем значения коэффициента нагрузки: $\beta = 0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$. При заданных значениях $\cos \varphi_2$ и $\sin \varphi_2$ (разд. 2) рассчитываем $\Delta U_{\%}$ и $U_{2\phi}$, (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
0						
0,5						
0,75						
1,0						
1,25						

Расчетные внешние характеристики $U_{2\phi} = f(\beta)$ в одних координатных осях с опытной внешней характеристикой представлены на рис. 1.7 пунктирной (активная нагрузка), штрих-пунктирной (активно-индуктивная нагрузка) и штрих-штрих-пунктирной (активно-емкостная нагрузка) линиями.

9. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента нагрузки

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

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

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°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 ряд значений коэффициента нагрузки β , рассчитываем КПД при заданном значении коэффициента мощности (табл.1.5).

Таблица 1.5

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

Зависимости $\eta = f(\beta)$ представлены на рис. 1.8 сплошной ($\cos \varphi_2 = 1,0$) и пунк-

тирной ($\cos \varphi_2 = 0,8$) линиями.

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} , определим 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 занесены в табл.1.6.

Таблица 1.6

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

10. Схемы и графики

Рис. 1.1. Т-образная схема трансформатора¹

Рис. 1.2. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора
в режиме холостого хода

¹ Схемы на рисунках 1.1, 1.2, 1.4 и 1.6 вычерчиваются студентами самостоятельно

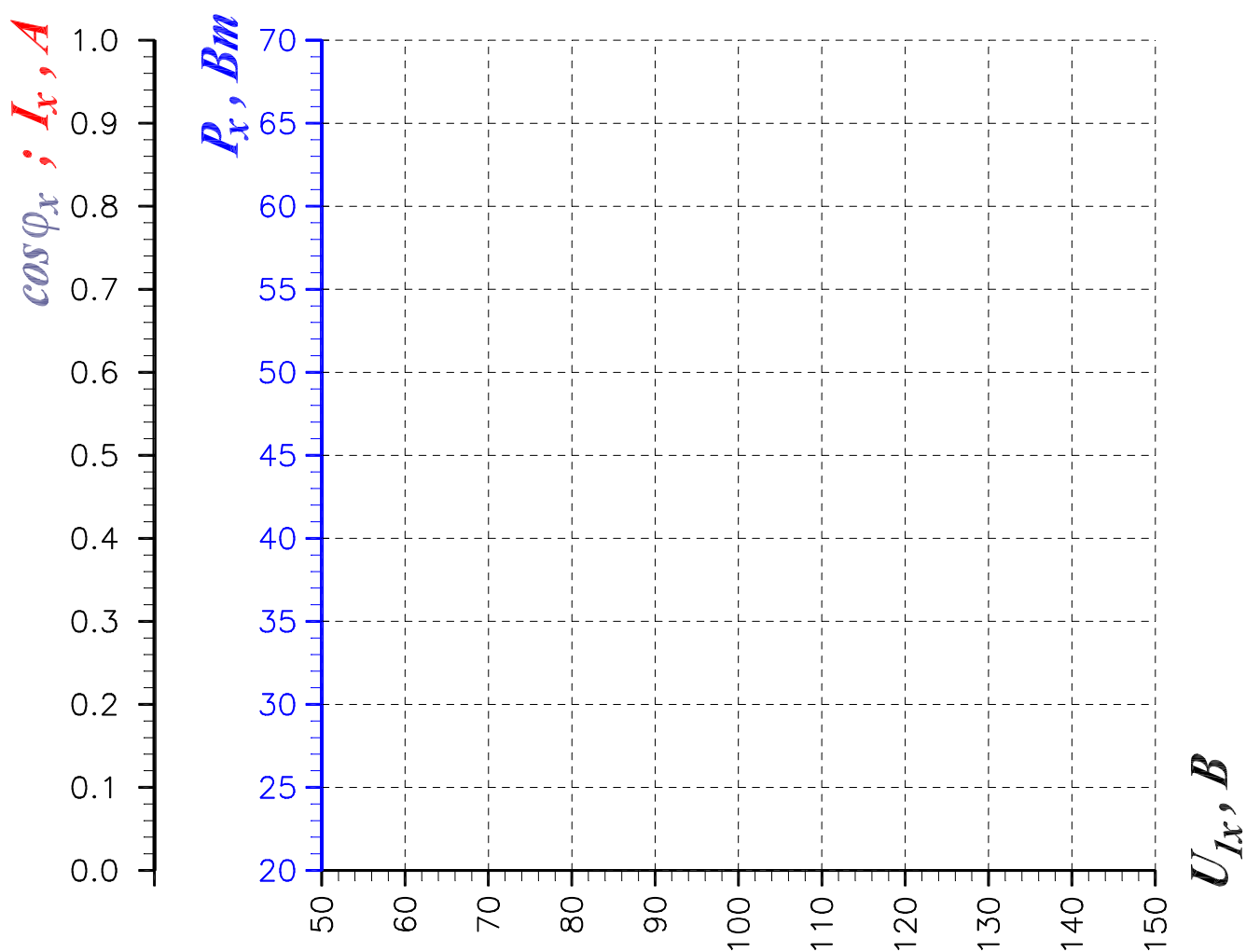


Рис. 1.3. Характеристики холостого хода трансформатора ²

² Графики на рисунках 1.3, 1.5, 1.7 и 1.8 вычерчиваются студентами самостоятельно

Рис. 1.4. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Рис. 1.5. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в режиме нагрузки

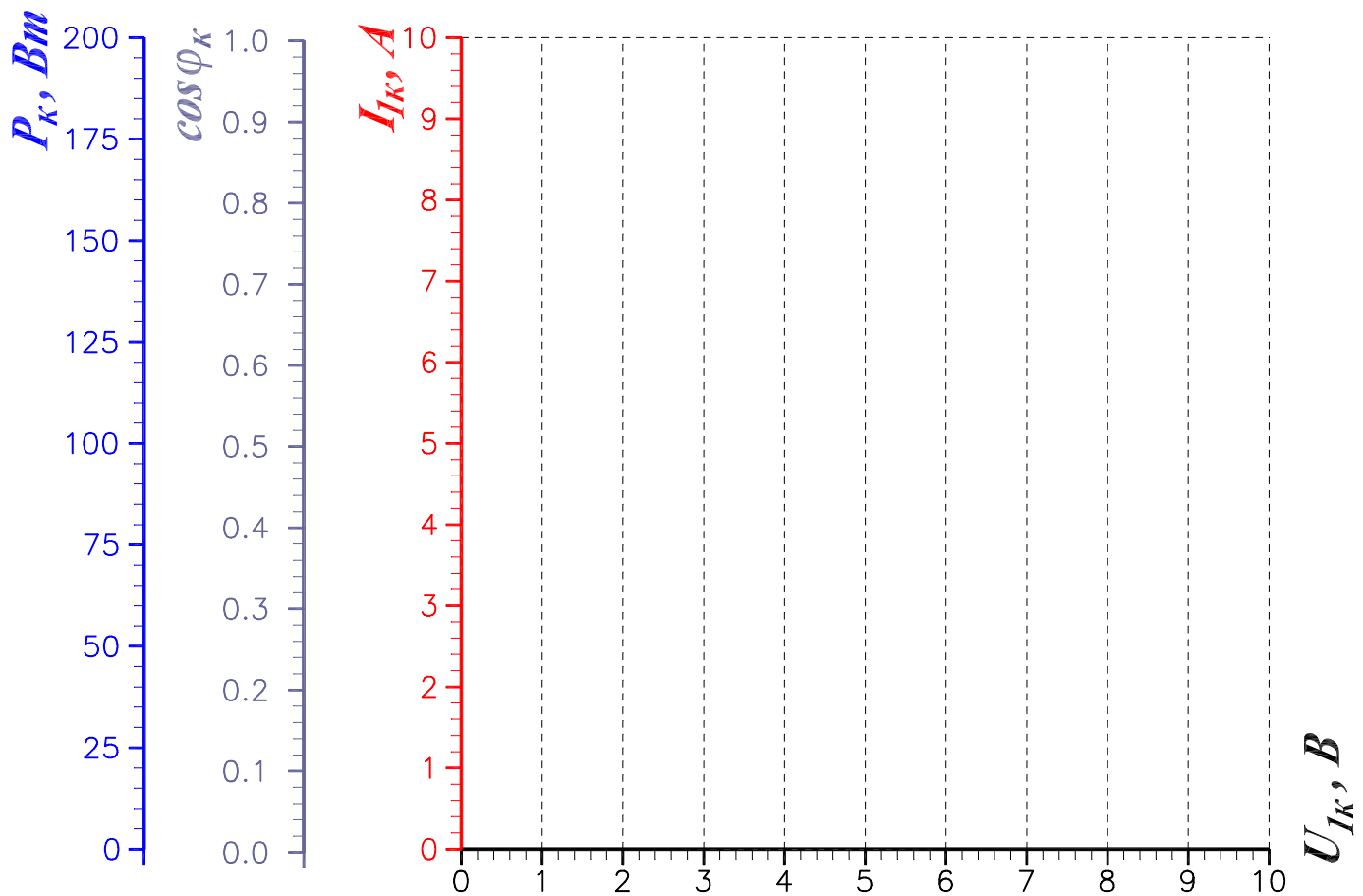


Рис. 1.6. Характеристики короткого замыкания трансформатора

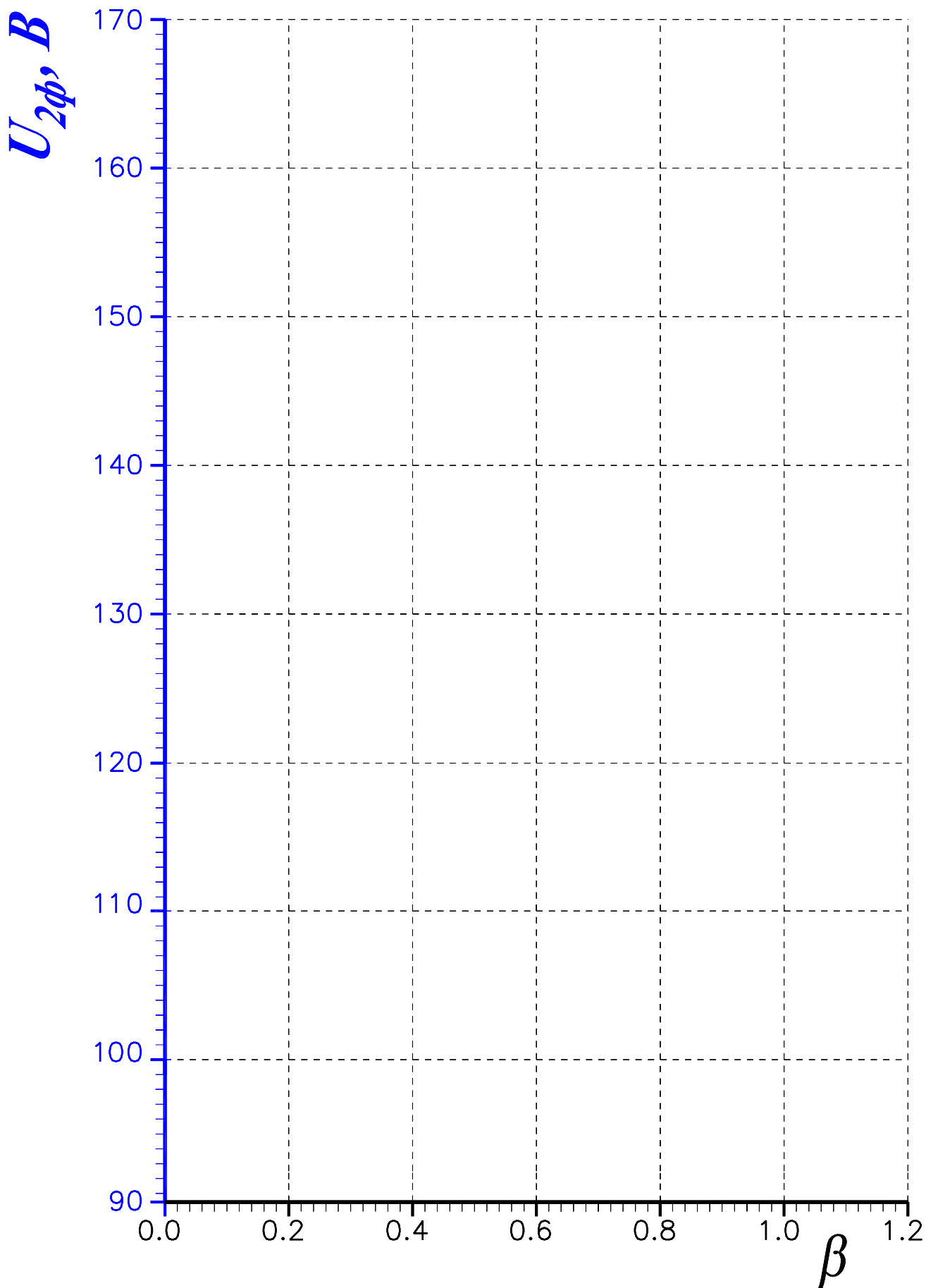


Рис. 1.7. Внешняя характеристики трансформатора

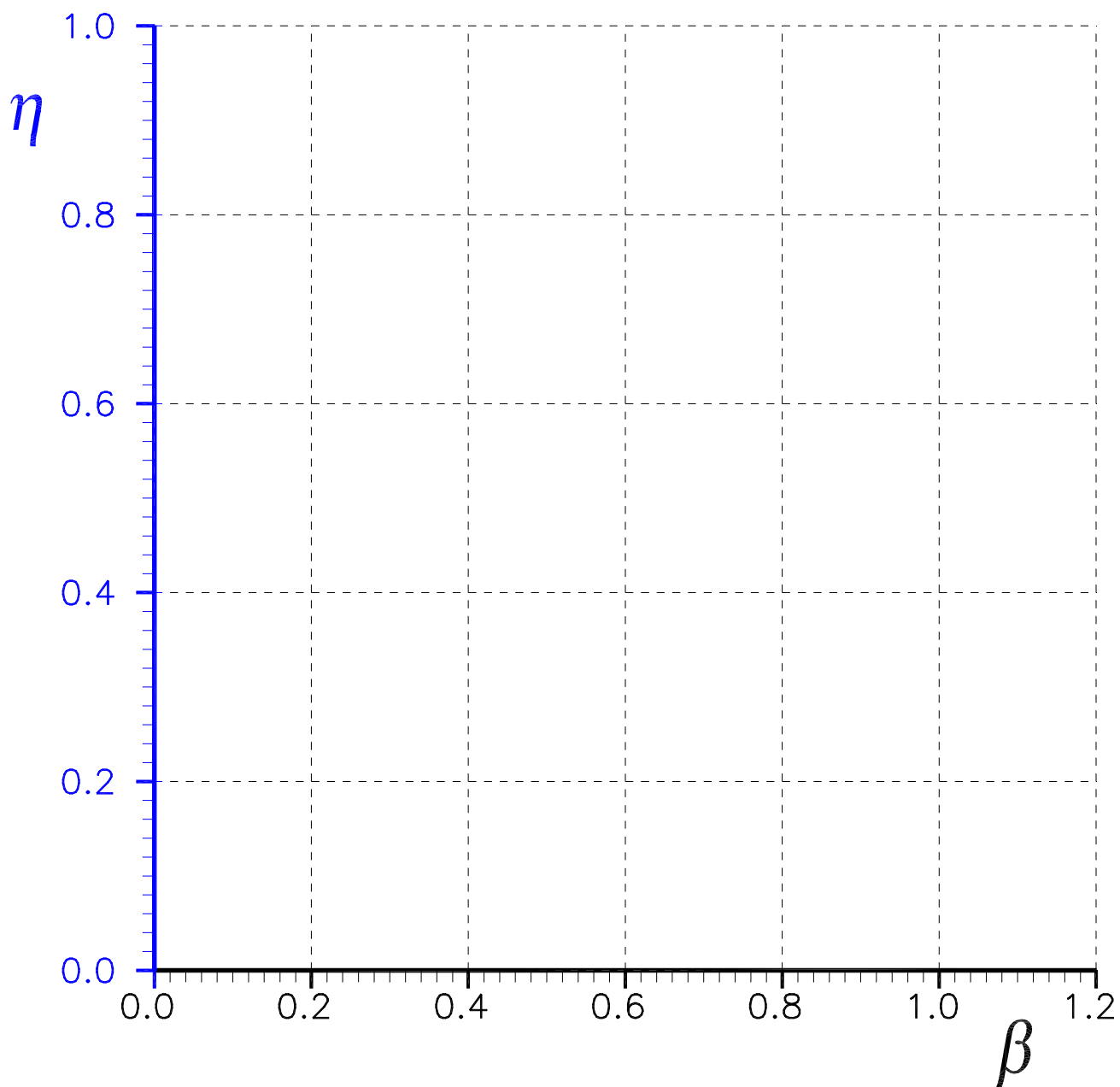


Рис. 1.8. Зависимость КПД трансформатора от коэффициента загрузки

11. Оценка результатов эксперимента и расчета

1. Сопоставление значений сопротивлений обмоток трансформатора и сопротивлений намагничивающего контура. Объяснение физической природы параметров и их различий (рис. 1.1).

2. Объяснение физической сущности и формы характеристик холостого хода трансформатора (рис. 1.3)

3. Объяснение физической сущности и формы характеристик короткого замыкания трансформатора (рис. 1.5).

4. Сопоставление *одноименных* характеристик холостого хода и короткого замыкания. Объяснение различий (рис. 1.3 и рис. 1.5).

5. Объяснение формы внешней характеристики трансформатора. Объяснение различий при R-, R-L- и R-C нагрузке (рис. 1.7).

6. Условие максимума коэффициента полезного действия трансформатора (рис. 1.8).

7. Меры по снижению магнитных потерь мощности.

Образец построения графика

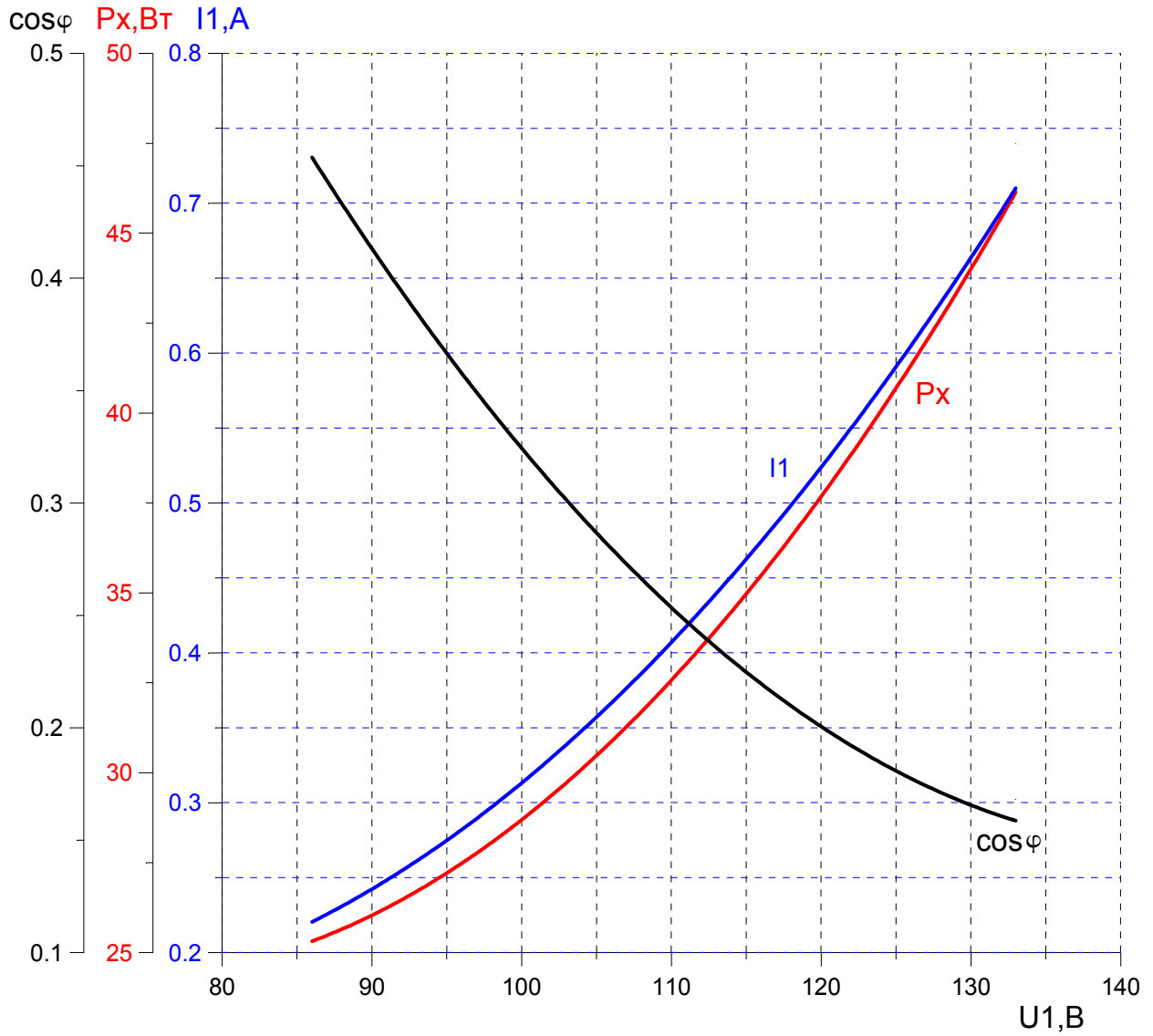


Рис. 1.3. Характеристики холостого хода трансформатора
 $I_1, P_x, \cos\varphi = f(U_1)$