

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**Л. В. Веппер, В. В. Тодарев, Д. А. Хабибуллин**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к контрольным работам по одноименной дисциплине  
для студентов электротехнических специальностей  
заочной формы обучения**

Гомель 2009

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73  
В30

*Рекомендовано научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 6 от 16.06.2007 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук *Т. В. Алферова*

**Веппер, Л. В.**  
В30 Электрические машины : метод. указания к контрол. работам по одноим. дисциплине для студентов электротехн. специальностей заоч. формы обучения / Л. В. Веппер, В. В. Тодарев, Д. А. Хабибуллин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 34 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: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Представлены задания для выполнения контрольных работ по разделам «Трансформаторы» и «Асинхронные двигатели»  
Для студентов электротехнических специальностей заочной формы обучения.

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Контрольные задания по курсу “Электрические машины” ставят целью оказать помощь студентам заочного отделения овладеть методом и техникой применения изученных ими теоретических положений к решению конкретных задач.

Данные методические указания включают в себя два раздела из курса электрических машин – *трансформаторы и асинхронные электродвигатели*. Представление данных машин в одном пособии обусловлено тем, что они имеют практически общую теорию.

Задание на контрольную работу состоит из двух задач.

*Варианты заданий контрольной работы выбираются по двум последним цифрам учебного шифра студента (номер зачетной книжки).*

Студенты должны выполнить данную контрольную работу в сроки, установленные учебным планом.

При оформлении контрольной работы студенты должны придерживаться следующих требований:

1. На титульном листе контрольной работы должны быть указаны дисциплина, фамилия, имя, отчество студента, курс, факультет, учебный шифр студента (номера зачетной книжки), адрес студента.

2. Контрольная работа оформляется в тетрадке аккуратно, без помарок и должна быть выполнена так, чтобы можно было без затруднений прочесть каждую букву, знак, слово. Работы, оформленные небрежно, вызывающие затруднение и сомнение при их чтении, возвращаются студенту для переработки.

3. Страницы тетради должны быть пронумерованы, на каждой из них следует оставлять поле шириной не менее 3 см.

4. Все расчетные действия должны сопровождаться краткими, но четкими пояснениями. Обозначение величин в тексте, формулах, схемах должны быть согласованы и расшифрованы один раз в каждой задаче.

5. Схемы, рисунки должны быть выполняться с применением чертежных инструментов. При выполнении схем следует руководствоваться действующими нормативными документами на условные графические обозначения. Схемы, рисунки должны быть пронумерованы и иметь подрисуночные надписи. В тексте контрольной работы нужно обязательно делать ссылки на соответствующие схемы, рисунки.

6. В тексте вначале записывается расчетная формула в общем виде, а затем с проставленными числовыми значениями. В конце каждой расчетной формулы обязательно указывается размерность полученных величин в системе СИ и при необходимости номер формулы. Результаты повторяющихся расчетов следует сводить в таблицы.

7. В излагаемый материал обязательно включается используемая методика расчета, основные допущения и обозначения. При использовании графиков, численных коэффициентов, формул и методик необходимо делать ссылки на соответствующие литературные источники. Не допускается сокращения слов, кроме общепринятых.

# 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1. Контрольная работа

Трехфазный двухобмоточный трансформатор характеризуется следующими величинами: номинальная мощность  $S_n$ ; линейное напряжение первичной обмотки  $U_1$ ; линейное напряжение вторичной обмотки  $U_2$ ; мощность потерь холостого хода  $P_0$ ; мощность потерь короткого замыкания  $P_k$ ; напряжение короткого замыкания  $u_{к, \%}$ ; ток холостого хода  $i_{0, \%}$ ; группы соединений обмоток.

Числовые значения заданных величин, группы соединения обмоток указаны в табл.1.

## 1.2. Задание

Сформулировать условие задачи для своего варианта и выполнить следующее:

1. Начертить схему соединения обмоток трансформатора для группы соединений, соответствующей варианту и построить диаграммы векторов электродвижущих сил (ЭДС) обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения.

2. Определить коэффициенты трансформации фазных напряжений.

3. Начертить схему замещения трансформатора и определить ее параметры по данным холостого хода и испытательного короткого замыкания.

4. Построить векторную диаграмму трансформатора при упрощенной ( $I_0 = 0$ ) схеме замещения для активно-емкостной или активно-индуктивной (по варианту задания) нагрузки. Принять  $\beta = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

5. Определить значения изменения вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке  $\Delta U$  и построить графики зависимостей  $\Delta U = f(\beta)$  для активной,  $\cos \varphi_2 = 0$ , активно-емкостной и активно-индуктивной нагрузок,  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и изменения вторичного напряжения от характера нагрузки  $\Delta U = f(\varphi_2)$  при значениях  $\beta = 0,5; 1,0$ ,  $-\pi/2 < \varphi_2 < \pi/2$ . Определить величину  $\varphi_2$  при которой  $\Delta U = 0$ .

6. Определить значения напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки при значениях  $\beta = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ . Построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  для нагрузок трех типов: активной, активно-индуктивной и активно-емкостной.

7. Определить значение КПД ( $\eta$ ) трансформатора при значениях коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8; 1,0$  и построить график зависимости  $\eta = f(\beta)$ .

Таблица 1

Последняя цифра шифра	Мощность $S_n$ , кВА	Потери холостого хода $P_0$ , Вт	Потери короткого замыкания $P_{кз}$ , Вт	Ток холостого хода $i_{0,\%}$	Напряжение короткого замыкания $u_{к,\%}$	Группа соединений обмоток	Напряжения $U_1/U_2$ , кВ (линейное)				
							Предпоследняя цифра шифра				
							0;1	2;3	4;5	6;7	8;9
0	25	105	600	3,2	4,5	Y/Δ – 11	10/0,4	3/0,23	6/0,69	10/3,15	6/0,4
1	40	150	880	3	4,5	Y/Δ – 3	10/0,69	3/0,69	6/0,4	10/0,69	3/0,4
2	63	220	1280	2,8	4,5	Y/Y – 2	3/0,69	10/0,4	6/0,23	35/0,69	20/0,4
3	100	310	1970	2,6	5,5	Y/Y – 4	20/0,69	3/0,4	10/0,4	6/0,4	35/0,69
4	160	460	2650	2,4	5,5	Y/Y – 6	20/0,4	10/3,15	6/0,69	35/0,4	3/0,69
5	400	920	5550	2,1	5,5	Y/Y – 10	10/0,69	20/0,4	35/11	3/0,4	6/0,69
6	1000	2100	12200	1,4	6,5	Δ/Δ – 4	35/11	20/3,15	6/0,69	10/0,69	3/0,69
7	2500	3900	25000	1	6,5	Δ/Δ – 6	20/6,3	35/3,15	3/0,69	35/11	10/3,15
8	4000	5450	33500	1	6,5	Δ/Δ – 8	35/11	20/3,15	6/3,15	10/0,69	3/0,23
9	6300	7650	46500	0,9	6,5	Δ/Δ – 10	20/11	35/6,3	10/3,15	35/11	20/3,15

Примечание: для нечетных предпоследних цифр шифра построение векторной диаграммы следует проводить для нагрузки активно-индуктивной; для четных, в том числе и нуля, предпоследних цифр шифра для нагрузки активно-емкостной.

### 1.3. Общие рекомендации к выполнению задания

1.3.1. Коэффициент трансформации трансформатора может рассчитываться по фазным или линейным напряжениям. Для трехфазного трансформатора имеет значение первое из указанных, тогда

$$k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}$$

1.3.2. Для включения трансформатора на параллельную работу с другим трансформатором имеет значение сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток. Для характеристики этого сдвига вводится понятие группа соединений обмоток.

Рассмотрим трехфазный трансформатор с соединением обмоток ВН и НН в звезду. Предположим, что 1) обмотки ВН и НН имеют одинаковую намотку (например “правую”); 2) начало и концы обмоток расположены одинаково (например, концы снизу, а начало сверху); 3) одноименные обмотки (например,  $A$  и  $a$ ,  $B$  и  $b$ ,  $C$  и  $c$ ) находятся на общих стержнях (рис. 1, а). Тогда векторы фазных ЭДС будут иметь вид, показанный на рис. 1, б. При этом одноименные векторы линейных ЭДС (например,  $\underline{E}_{AB}$  и  $\underline{E}_{ab}$ ) направлены одинаково, т.е. совпадают по фазе, и при рассмотрении их на циферблате часов (рис. 1, в), они будут показывать 0 или 12 часов. Поэтому схема и группа соединений такого трансформатора обозначается  $Y/Y - 0$ .

1.3.3. К параметрам ветви намагничивания относятся полное  $z_0$ , активное  $r_0$  и индуктивное  $x_\mu$  сопротивления, которые могут быть определены из опыта холостого хода.

$$z_0 = \frac{U_{1н}}{I_{10}}; \quad r_0 = z_0 \cdot \cos \varphi_{он}; \quad x_\mu = \sqrt{z_0^2 - r_0^2};$$

где  $U_{1н}$  - номинальное фазное напряжение первичной обмотки;  $I_{10} = \frac{i_{0,\%} \cdot I_{1н}}{100}$  - ток холостого хода, определяется из соотношения

$$i_{0,\%} = \frac{I_{10}}{I_{1н}} \cdot 100\%; \quad I_{1н} = \frac{S_H \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1н}} - \text{номинальный ток первичной обмотки,}$$

$$\cos \varphi_{он} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1н} \cdot I_{10}} - \text{коэффициент мощности;}$$

$S_H$  - номинальная мощность;  $P_0$  - мощность потерь холостого хода.

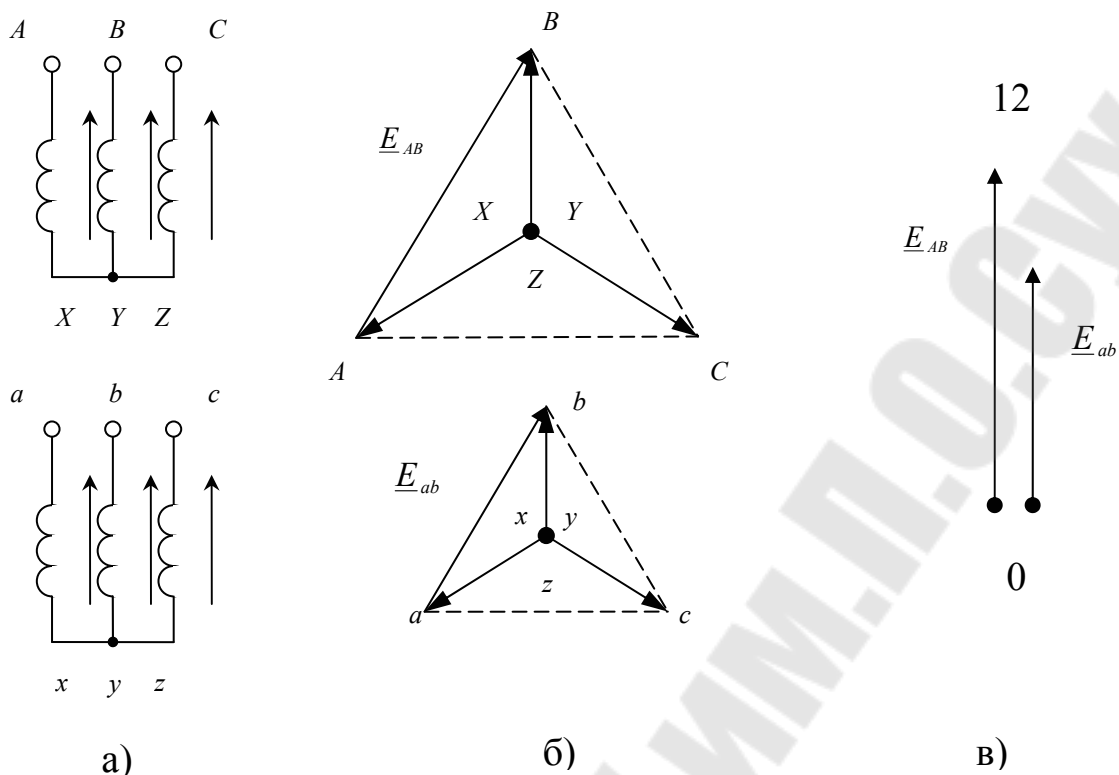


Рис.1 Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений Y/Y – 0

1.3.4. Опыт короткого замыкания трансформатора представляет собой такой предельный режим работы, когда вторичную обмотку замыкают накоротко. На первичную обмотку подводят такое напряжение, чтобы токи в обмотках были номинальными.

К параметрам схемы замещения при коротком замыкании относятся полное  $z_k$ , активное  $r_k$  и реактивное  $x_k$  сопротивления, которые могут быть определены следующим образом:

$$r_k = \frac{P_{кн}}{3 \cdot I_{1к}^2}; z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2};$$

где  $P_{кн}$  - мощность потерь короткого замыкания;  $I_{1к} = I_{1н}$  - ток короткого замыкания;  $I_{1н} = \frac{S_n \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1нф}}$  - номинальный ток первичной об-

мотки;  $U_{к1} = \frac{u_{к,\%} \cdot U_{1нф}}{100}$  - напряжение первичной обмотки при корот-



ком замыкании, определяется из выражения  $u_{к,\%} = \frac{U_{к1}}{U_{1нф}} \cdot 100\%$ ;  $U_{1нф}$  – номинальное фазное напряжение первичной обмотки.

1.3.5. При испытательном коротком замыкании  $I_0$  принимают равном 0. Упрощенная схема замещения трансформатора представляет собой цепь, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений  $r_k = r_1 + r_2'$  и  $x_k = x_1 + x_2'$  (рис. 2).

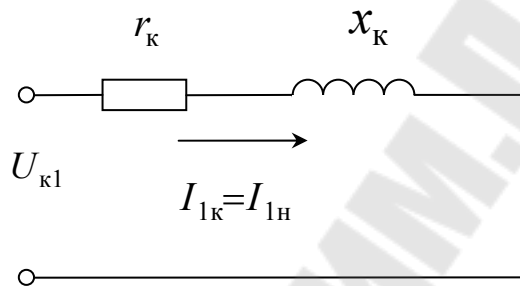


Рис.2 Схема замещения трансформатора.

1.3.6. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора наглядно показывает соотношения между параметрами трансформатора. Для упрощения диаграммы и возможности ее практического применения в силовых трансформаторах, работающих с нагрузкой, близкой к номинальной, пренебрегают током холостого хода и считают, что номинальный ток первичной обмотки равен приведенному току вторичной обмотки  $I_{1н} = I'_{2н}$  (приведение осуществляется с помощью коэффициента трансформации). Получаемая в этом случае ошибка вполне допустима, т.к. ток холостого хода  $I_0$  невелик по сравнению с токами  $I_{1н}$  и  $I'_{2н}$ . В этом случае схема замещения представляет собой простейшую цепь, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений  $z_1 = r_1 + jx_1$ ,  $z_2 = r_2' + jx_2'$  и  $z_n = r_n' + jx_n'$ . Векторная диаграмма для такой схемы замещения также упрощается.

Порядок построения упрощенной векторной диаграммы (рис. 3) следующий.

На оси ординат строят вектор тока  $I_{1н} = -I'_{2н}$ , затем из точки  $O'$  под углом  $\varphi_2$  к оси ординат проводят луч  $(-U'_{2н})$ . Угол  $\varphi_2$  определяется величиной и характером нагрузки.

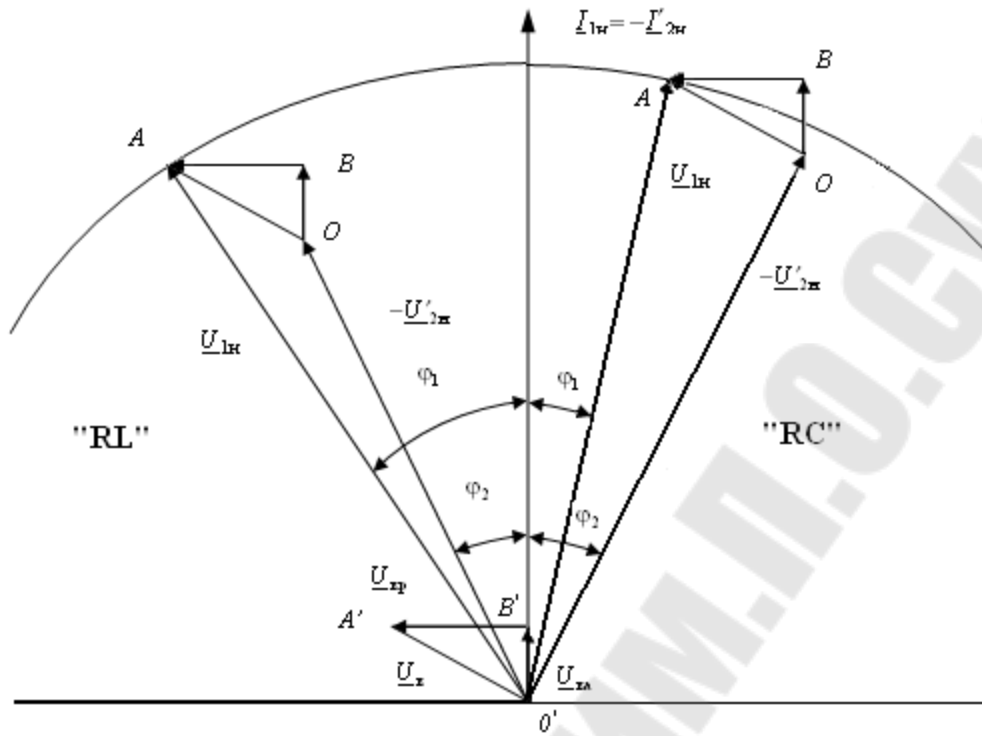


Рис. 3 Векторная диаграмма трансформатора.

Учитывая что  $r_1$  и  $r'_2$ ,  $x_1$  и  $x'_2$  соединены в схеме замещения последовательно, можно записать, что  $r_1+r'_2=r_k$  и  $x_1+x'_2=x_k$ . Тогда активная составляющая напряжения короткого замыкания равна  $U_{ка}=I_{1H} \cdot r_k$ , а реактивная  $U_{кр}=I_{1H} \cdot x_k$ . Эти величины являются катетами треугольника короткого замыкания ( $U_{ка}$  равно длине отрезка  $O'B'$ , а  $U_{кр}$  – длине отрезка  $A'B'$ ).

Из точки  $O'$  радиусом  $O'A'$  равным  $U_{1H}$  проводят окружность. Затем треугольник короткого замыкания переносят параллельно самому себе так, чтобы точка  $A'$  коснулась окружности в точке  $A$ , а точка  $O'$  – луча  $(-U'_{2H})$  в точке  $O$ . Тогда луч  $O'A$  будет равняться напряжению  $U_{1H}$ , а луч  $O'O$  – напряжению  $(-U'_{2H})$ . Угол между током  $I_{1H}$  и напряжением  $U_{1H}$  равен  $\varphi_1$ .

В случае активно-емкостной нагрузки порядок построения тот же самый, что для активно-индуктивной, но следует иметь ввиду, что луч  $(-U'_{2H})$  будет отставать от вектора тока на угол  $\varphi_2$ . При значительном преобладании емкостной нагрузки вторичное напряжение может стать даже больше первичного напряжения.

1.3.7. Изменение вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки от холостого хода до номинальной является важнейшей характеристикой трансформатора и определяется выражением  $\Delta U_{\text{ном}}$ :

$$\Delta U_{\text{ном}} = U_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2.$$

Данное выражение дает возможность определить изменение вторичного напряжения лишь при номинальной нагрузке трансформатора. Значения  $U_{\text{ка}}$  и  $U_{\text{кр}}$  для этого момента необходимо взять по данным векторной диаграммы. Для расчета изменения вторичного напряжения при любой нагрузке следует ввести коэффициент нагрузки  $\beta = I_2 / I_{2н}$ , тогда

$$\Delta U_{\text{ном}} = \beta \cdot (U_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2)$$

Результаты расчета заносят в табл. 2, по данным которой строят графики  $\Delta U = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ . При определении  $\beta$  следует задаваться значениями  $I_2$  от нуля до номинального  $I_{2н}$ .

Для построения  $\Delta U = f(\varphi_2)$  при  $\beta = 1,0$  и  $\beta = 0,5$  следует задаваться значением  $\varphi_2$  в пределах  $-\pi / 2 < \varphi_2 < \pi / 2$ , обязательно включая расчет для  $\varphi = -\varphi_k$ , при котором  $\Delta U = 0$

$$\text{где } \varphi_k = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

На графиках отрицательное значение  $\Delta U$  при работе трансформатора с емкостной нагрузкой соответствует повышению напряжения при переходе от режима холостого хода к нагрузке.

Результат расчета сводим в таблицу 3, по данным расчета строим зависимости  $\Delta U = f(\varphi_2)$  при  $\beta = 0,5$ ,  $\beta = 1$ .

Таблица 2

№ п/п	$I_2, \text{A}$	$\beta$	$\cos \varphi_2 = 0,8$	$\cos \varphi_2 = 0$	$\cos \varphi_2 = 0,8$	Примечание
			(R-L)	(R)	(R-C)	
			$\Delta U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$I_{2н} =$
1						
2						$U_{\text{ка}} =$
3						
4						$U_{\text{кр}} =$
5						

Таблица 3

№ п/п	$\varphi_2$ (R-L)	$\Delta U, \text{В}$		$\varphi_2$ (R-C)	$\Delta U, \text{В}$		Приме- чание
		$\beta=1,0$	$\beta=0,5$		$\beta=1,0$	$\beta=0,5$	
1							$U_{\text{ка}} =$
2							
3							$U_{\text{кр}} =$
4							

1.3.8. Зависимость  $U_2 = f(\beta)$  или  $U'_2 = f(\beta)$  при  $U_1 = U_{1н} = \text{const}$  и  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  называют внешней характеристикой трансформатора. Для построения внешних характеристик используют уравнение

$$U'_2 = U_{1н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right) = U_{1н} \cdot \left(1 - \beta \cdot \frac{U_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2}{100}\right) = U_{1н} - \Delta U$$

Значения  $\Delta U$  берутся из таблицы 2.

Напряжение вторичной обмотки  $U_2 = U'_2 / k_{\text{тр}}$ .

В пределах изменения коэффициента нагрузки  $\beta$  от 0 до 1 внешние характеристики практически линейны (рис. 4)

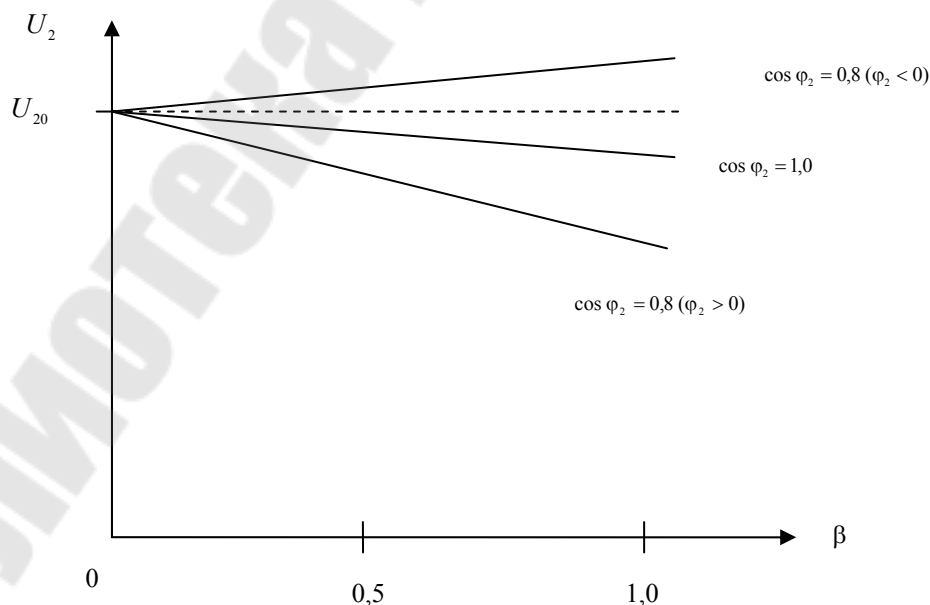


Рис. 4 Внешние характеристики трансформатора.

1.3.9. Коэффициент полезного действия трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки  $P_2$  (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки  $P_1$  (подводимая мощность):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$$

где  $\Sigma P = P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{кн}}$  - полные потери в трансформаторе;  $P_0$  - потери холостого хода при номинальном напряжении и частоте (не зависят от нагрузки и их считают постоянными);  $P_{\text{кн}}$  - потери короткого замыкания при токе  $I_{1\text{к}} = I_{1\text{н}}$ .

Учитывая, что  $P_1 = P_2 + \Sigma P$ , а  $P_2 = \beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_2$  можно записать расчетное выражение для  $\eta$ :

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{кн}}}{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{кн}}}$$

Задавая значением  $\beta$  (табл. 4) строят график зависимости  $\eta = f(\beta)$  для  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и  $\cos \varphi_2 = 1,0$ .

На основании полученных графиков можно сделать вывод, что величина коэффициента полезного действия трансформатора зависит не только от величины, но и от характера нагрузки.

Значение коэффициента нагрузки, соответствующего максимальному КПД, определяют как:

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}}$$

Таблица 4

№ п/п	$\beta$	$\eta$		Примечание
		$\cos \varphi_2 = 0,8$	$\cos \varphi_2 = 1,0$	
1				$\beta' =$
2				$P_0 =$
3				
4				$P_{\text{кн}} =$
5				

#### 1.4. Пример решения задачи

Трехфазный двухобмоточный трансформатор характеризуется следующими номинальными величинами: мощность  $S_{\text{н}} = 60 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ; высшее (первичное) линейное напряжение  $U_{1\text{н}} = 20 \text{ кВ}$ ; низшее (вторичное) линейное напряжение  $U_{2\text{н}} = 690 \text{ В}$ . Мощность потерь холостого хода  $P_0 = 420 \text{ Вт}$ ; процентное значение тока холостого хода  $i_{0,\%} = 3,6\%$ ; процентное значение напряжения короткого замыкания  $u_{\text{к},\%} = 5,0\%$ ; мощность потерь короткого замыкания (при номинальных токах в обмотках)  $P_{\text{кн}} = 1300 \text{ Вт}$ ; группы соединений обмоток – Y/Δ.

Определить:

1. Номинальные токи в обмотках трансформатора.
2. Коэффициент трансформации фазных напряжений.
3. Параметры ветви намагничивания схемы замещения и ток холостого хода.
4. Параметры схемы замещения при коротком замыкании.
5. Изменение вторичного напряжения  $\Delta U$  при номинальной нагрузке с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_2 = 1,0$ .
6. Построить графики зависимостей  $\Delta U = f(\beta)$  для активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузок и  $\cos(\varphi_2) = 0,8$ .
7. Построить графики зависимостей  $\Delta U = f(\varphi_2)$  при значениях  $\beta = 0,5; 1,0$ .
8. Построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  для нагрузок трех типов: активной, активно-индуктивной и активно-емкостной.
9. Построить графики зависимости  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos(\varphi_2) = 0,8; 1,0$ .

**Решение.**

1. Номинальные линейные токи в обмотках ВН и НН трансформатора

$$I_{1\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{60 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 1,7 \text{ А};$$

$$I_{2н} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3} \cdot U_{2н}} = \frac{60 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 50,2 \text{ А.}$$

Фазный ток первичной обмотки равен линейному  $I_{1ф} = I_{1н}$  (соединение Y), а фазный ток вторичной обмотки в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного  $I_{2ф} = I_{2н} / \sqrt{3}$  (соединение Δ).

2. В режиме холостого хода фазное напряжение первичной обмотки в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного  $U_{1н}$ , фазное напряжение вторичной обмотки равно линейному  $U_{2н}$ .

$$U_{1нф} = U_{1н} / \sqrt{3} = 20 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 11,5 \cdot 10^3 \text{ В;}$$

$$U_{2нф} = U_{2н} = 690 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации фазных напряжений трансформатора:

$$k = U_{1нф} / U_{2нф} = 11,5 \cdot 10^3 / 690 = 17$$

3. Ток холостого хода трансформатора

$$I_{10} = \frac{i_{0,\%} \cdot I_{1н}}{100} = \frac{3,6 \cdot 1,7}{100} = 0,0612 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{он} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1н} \cdot I_{10}} = \frac{420}{3 \cdot 11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,0612} = 0,199.$$

Полное  $z_0$ , активное  $r_0$  и реактивное  $x_0$  сопротивления контура намагничивания

$$z_0 = \frac{U_{1нф}}{I_{10}} = \frac{11,5 \cdot 10^3}{0,0612} = 188 \cdot 10^3 \text{ Ом;}$$

$$r_0 = z_0 \cdot \cos \varphi_{он} = 188 \cdot 10^3 \cdot 0,199 = 37,4 \cdot 10^3 \text{ Ом;}$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{(188 \cdot 10^3)^2 - (37,4 \cdot 10^3)^2} = 184 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

4. Напряжение, которое необходимо подавать на первичную обмотку при закороченной вторичной, чтобы токи в обмотках были номинальными

$$U_{к1} = \frac{u_{к,\%} \cdot U_{1нф}}{100} = \frac{5,0 \cdot 11,5 \cdot 10^3}{100} = 575 \text{ В.}$$

Параметры схемы замещения при коротком замыкании

$$r_{к} = \frac{P_{кн}}{3 \cdot I_{1к}^2} = \frac{1300}{3 \cdot 1,7^2} = 150 \text{ Ом,}$$

где  $I_{1к}=I_{1н}=1,7$ , А – ток в первичной обмотке при коротком замыкании,

$$z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}} = \frac{575}{1,7} = 338 \text{ Ом}; x_k = \sqrt{338^2 - 150^2} = 303 \text{ Ом}.$$

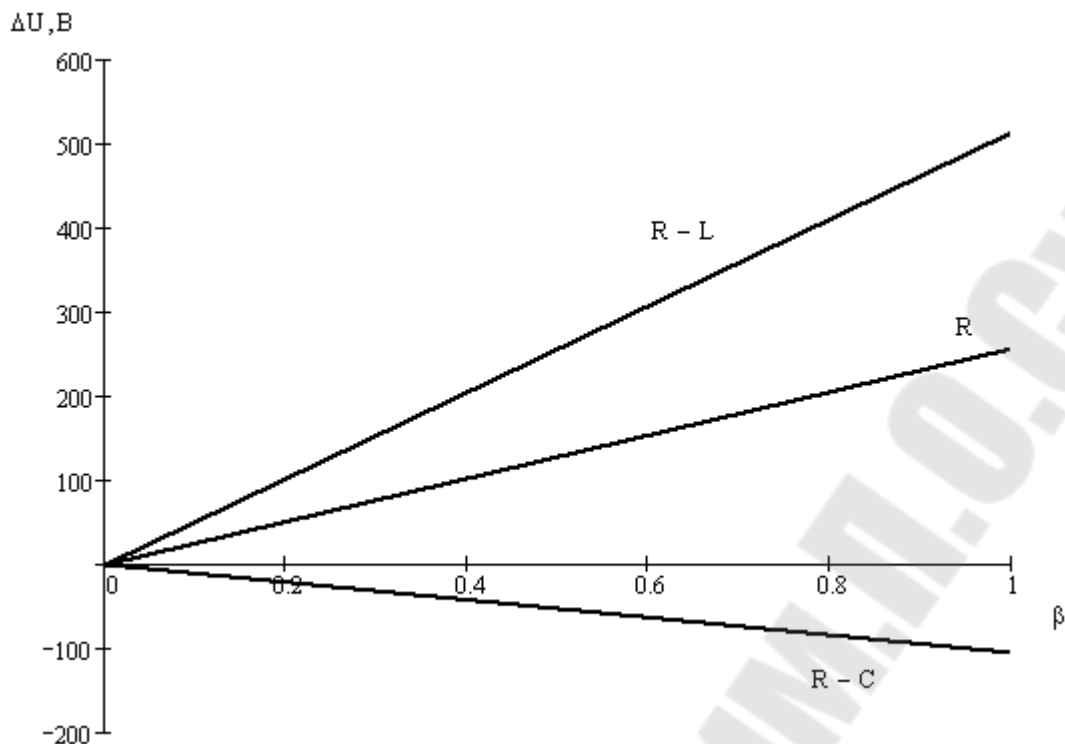
5. Изменение вторичного напряжения  $\Delta U$  при номинальной нагрузке с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_2 = 1,0$   
 $\Delta U = U_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin \varphi_2 = 255 \cdot 1,0 + 515 \cdot 0 = 255 \text{ В}$ , где  
 $U_{ка}=I_{1н} \cdot r_k = 1,7 \cdot 150 = 255 \text{ В}$ ,  $U_{кр}=I_{1н} \cdot x_k = 1,7 \cdot 303 = 515 \text{ В}$  - соответственно, активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания.
6. Для расчета изменения вторичного напряжения при любой нагрузке введем коэффициент нагрузки  $\beta = I_2 / I_{2н}$ , тогда  
 $\Delta U = \beta(U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2)$ . Задаемся величиной тока  $I_2$  от нуля до номинального  $I_{2н}$  и определяем  $\beta$  и  $\Delta U$ . Результаты расчета заносим в табл. 5.

Таблица 5

№	$I_2$ , А	$\beta$	$\cos \varphi_2 = 0,8(L)$	$\cos \varphi_2 = 0(R)$	$\cos \varphi_2 = 0,8(C)$	Примечание
			$\Delta U$ , В	$\Delta U$ , В	$\Delta U$ , В	
1.	0	0	0	0	0	$I_{20} = 0$
2.	10	0,199	102	57,7	-20,9	
3.	0	0,398	204	101,5	-32,3	$I_{2н} = 50,2$ , А
4.	30	0,598	306	152,5	-62,8	
5.	40	0,797	408	203,2	-83,7	$U_{ка} = 255$ , В
6.	50,2	1	513	255	-105	$U_{кр} = 515$ , В

По результатам табл. 5 строим график зависимости  $\Delta U = f(\beta)$ .



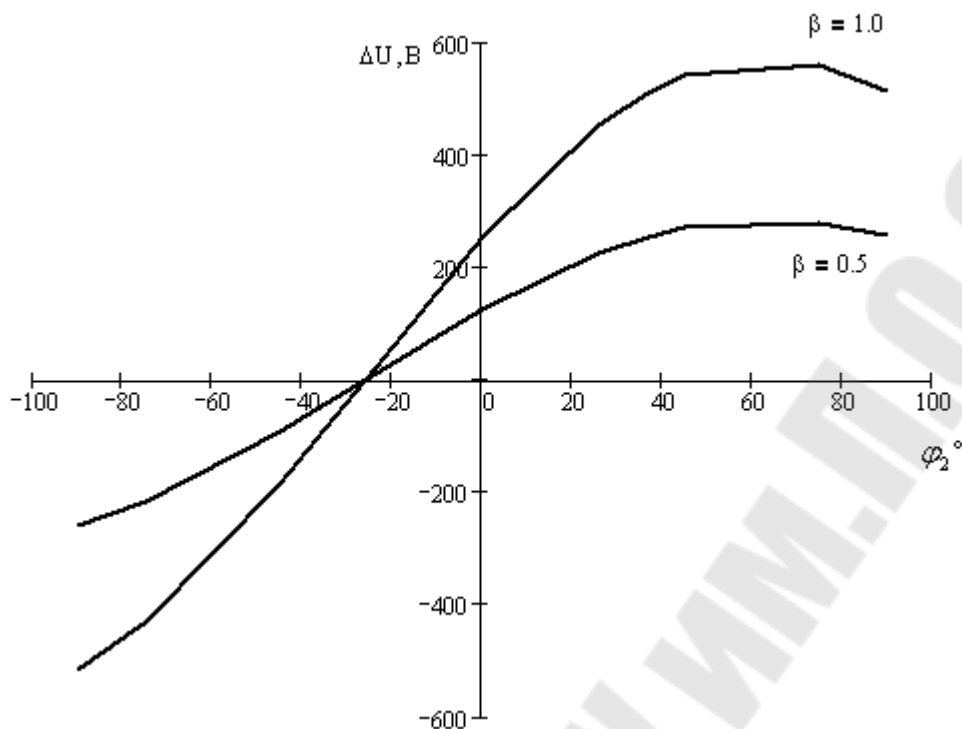


10. Для построения графиков зависимостей  $\Delta U = f(\varphi_2)$  при значениях  $\beta = 0,5; 1,0$  следует задаваться  $\cos\varphi_2 = 0; 0,26; 0,7; 0,8; 0,9$  и  $1$  ( $\varphi_2 = 90^\circ; 75^\circ; 45^\circ; 37^\circ; 26^\circ; 0$ ) для активно-индуктивной нагрузки и  $\cos\varphi_2 = 0; 0,26; 0,7; 0,8; 0,9$  и  $1$  ( $\varphi_2 = -90^\circ; -75^\circ; -45^\circ; -37^\circ; -26^\circ; 0$ ) для активно-емкостной. Результаты расчетов заносим в табл. 6.

Таблица 6.

№	$\varphi_2^\circ$ , (R-L)	$\Delta U$ , В		$\varphi_2^\circ$ , (R-C)	$\Delta U$ , В		Примечание
		$\beta = 1,0$	$\beta = 0,5$		$\beta = 1,0$	$\beta = 0,5$	
1	90	515	258	-90	-515	-258	$U_{ка} = 255$ , В
2	75	563	282	-75	-431	-216	
3	45	544	274	-45	-184	-92	
4	37	514	257	-37	-106	-53	
5	26	454	227	-26	3,4	1,7	$U_{кр} = 515$ , В
6	0	255	127	0	255	127	

По результатам табл. 6 строим графики зависимостей  $\Delta U = f(\varphi_2)$



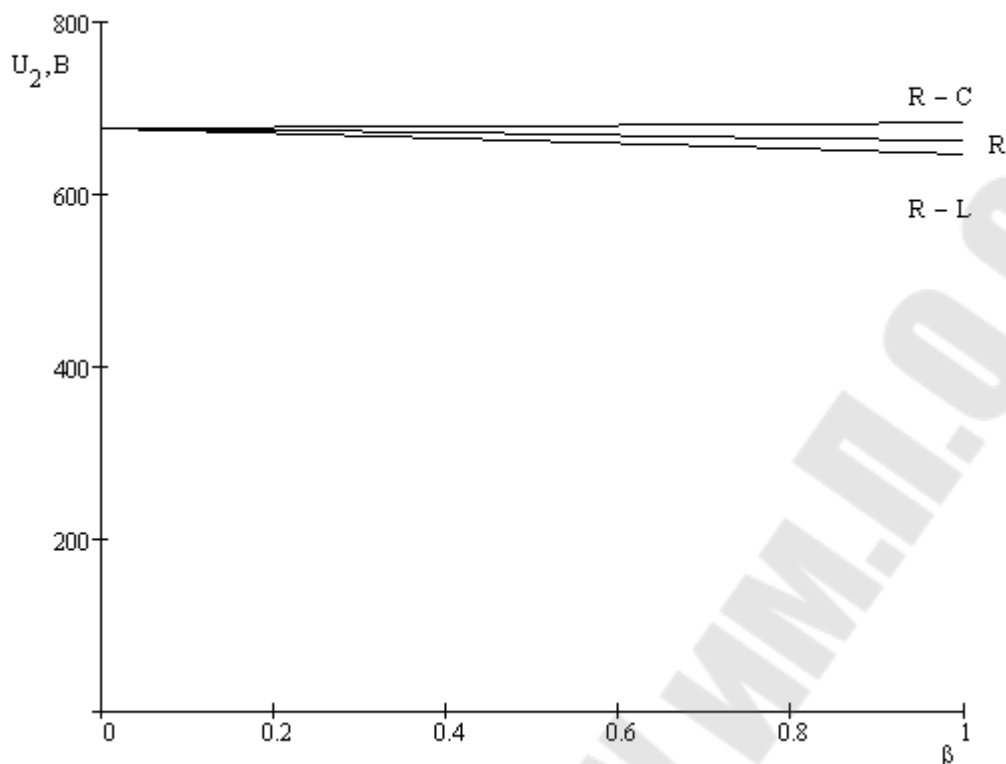
11. Для построения внешней характеристики  $U_2 = f(\beta)$  для нагрузок трех типов (активной  $\cos \varphi_2 = 1$ , активно-индуктивной  $\cos \varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 = 37^\circ$ ), активно-емкостной  $\cos \varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 = -37^\circ$ ) задаемся значениями  $\beta = 0, 0,4, 0,8, 1,0$  и определяем  $U'_{2\phi} = U_{1\phi} - \Delta U$  и  $U_2 = \frac{U'_{2\phi}}{K}$ .

Результаты расчета заносим в табл. 7.

Таблица 7

№	$\beta$	$\cos \varphi_2 = 1$		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (R-L)		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (R-C)		Примечание
		$U'_{2\phi}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U'_{2\phi}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U'_{2\phi}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	
1	0	$11 \cdot 10^3$	676	$11,5 \cdot 10^3$	676	$11,5 \cdot 10^3$	676	$U_{1н\phi} = 11,5 \cdot 10^3, \text{В}$
2	0,4	$11,3 \cdot 10^3$	670	$11,29 \cdot 10^3$	664	$11,54 \cdot 10^3$	678	$U_{ка} = 255, \text{В}$
3	0,8	$11,29 \cdot 10^3$	664	$11,8 \cdot 10^3$	652	$11,58 \cdot 10^3$	681	$U_{кр} = 515, \text{В}$
4	1,0	$11,29 \cdot 10^3$	676	$10,99 \cdot 10^3$	646	$11,6 \cdot 10^3$	683	$K=17$

По результатам табл. 7 строим графики зависимостей  $\Delta U = f(\beta)$



12. Для построения графиков зависимостей  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 0,8; 1,0$  задаемся значениями  $\beta$  от 0 до 1,0, включая коэффициент нагрузки, соответствующего максимальному КПД  $\beta' = \sqrt{\frac{P_0}{P_{кн}}} = \sqrt{\frac{420}{1300}} = 0,568$  и определяем  $\eta$  по формуле

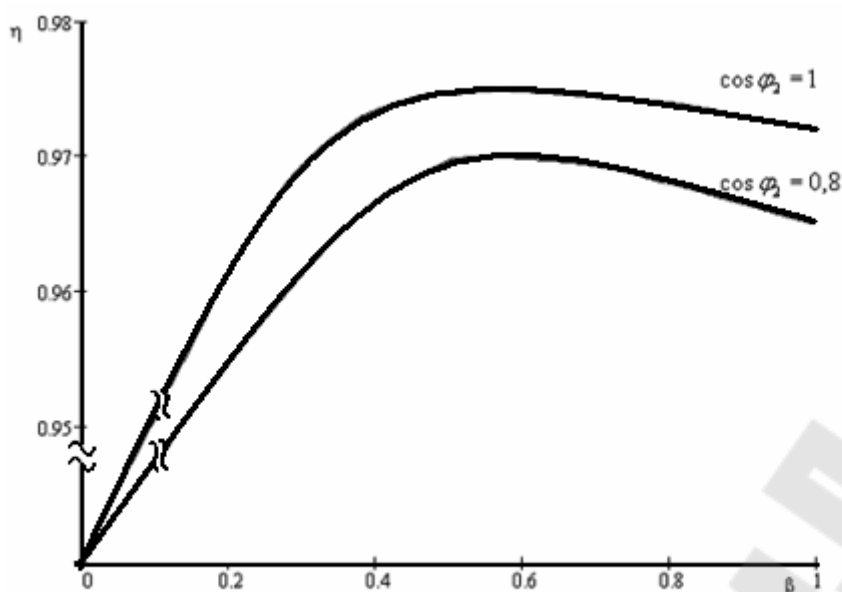
$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{кн}}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{кн}}$$

Результаты расчета заносим в табл. 8.

Таблица 8

№	$\beta$	$\eta$		Примечание
		$\cos \varphi_2 = 0,8$	$\cos \varphi_2 = 1$	
1	0	0	0	$S_n = 60$ , кВ·А
2	0,2	0,953	0,962	
3	0,4	0,968	0,974	$P_0 = 420$ , Вт
4	0,568	0,970	0,975	
5	0,8	0,968	0,974	$P_{кн} = 1300$ , Вт
6	1,0	0,965	0,975	

По результатам табл. 8 строим графики зависимостей  $\eta = f(\beta)$



## 2. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

### 2.1. Контрольная работа

Трехфазный синхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие параметры (табл. 2.1.):

- номинальная мощность  $P_{2\text{ном}}$ , кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1\text{н.ф}}$ , В;
- номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{ном}}$ ;
- параметры схемы замещения в относительных единицах;
- номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} \approx R'_{2*}$ ;
- число пар полюсов  $p$ ;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{н}}$ .

### 2.2. Задание

1. Начертить упрощенную “Г”-образную схему замещения электродвигателя, указать значение сопротивлений в Ом. В качестве базисной величины сопротивления принять

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{1\text{н.ф}}}{I_{1\text{н.ф}}},$$

где:  $U_{1\text{н.ф}}$  - номинальное фазное напряжение, В;

$I_{1н.ф}$  - номинальный фазный ток обмотки статора, А.

$$I_{1н.ф} = \frac{P_{2ном}}{3 \cdot U_{1н.ф} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_{ном}}, \text{ А};$$

$$R = R_* \cdot z_{\sigma}, \text{ Ом};$$

$$X = X_* \cdot z_{\sigma}, \text{ Ом}.$$

2. Записать уравнения напряжения и тока, определить ток обмотки статора для режима холостого хода, при номинальной нагрузке и при пуске.

3. Построить механическую характеристику электродвигателя, определить номинальный, пусковой и критический электромагнитный момент электродвигателя.

4. Рассчитать и построить рабочие характеристики асинхронного электродвигателя:  $I_1 = f(P_2)$ ,  $M_{эм} = f(P_2)$ ,  $P_1 = f(P_2)$ ,  $n_p = f(P_2)$ ,  $s = f(P_2)$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$ .

### 2.3. Общие рекомендации к выполнению задания

Упрощенная схема замещения асинхронного электродвигателя приведена на рисунке 2.1.

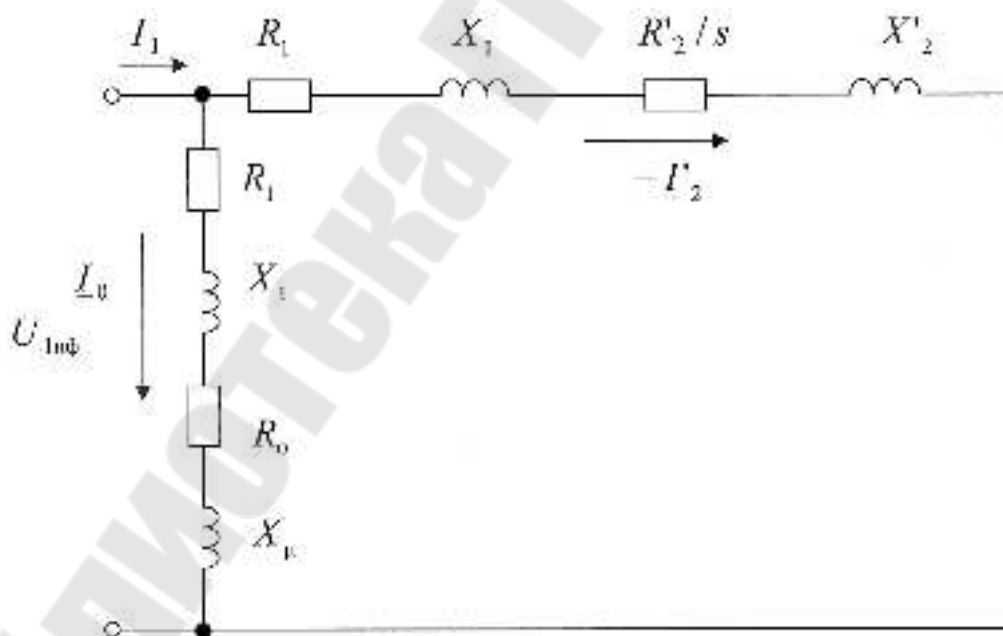


Рис. 2.1. Упрощенная “Г”-образная схема замещения асинхронного электродвигателя.

По “Г”-образная схеме замещения можно определить параметры и характеристики машины.

Ток холостого хода – ток в ветви намагничивания  $\underline{I}_0 = I_0 \cdot e^{j\psi_0}$

$$I_0 = \frac{U_{1нф}}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_\mu)^2}}, \text{ A};$$

$$\psi_0 = \arccos \left( \frac{R_1 + R_0}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_\mu)^2}} \right).$$

Ток в обмотке ротора  $\underline{I}'_2 = I'_2 \cdot e^{j\psi_2}$

$$I'_2 = \frac{U_{1нф}}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}, \text{ A};$$

$$\psi_2 = \arccos \left( \frac{R_1 + R'_2/s}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \right).$$

Здесь  $s$  - скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_{рот}}{n_1},$$

где  $n_1; n_{рот}$  - скорости вращения поля статора и ротора соответственно (об/мин);

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \text{ об/мин};$$

$f_1$  - частота питающего напряжения  $f_1 = 50$  Гц;

$p$  - число пар полюсов.

Ток в обмотке статора:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2, \text{ A}.$$

Механическая характеристика  $M_{эм} = f(s)$  асинхронного электродвигателя определяется выражением:

$$M_{эм} = \frac{3 \cdot U_{1нф}^2 \cdot R'_2}{\omega_1 \cdot s \cdot ((R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2)}.$$

Здесь  $\omega_1$  - угловая скорость вращения электромагнитного поля статора;

$$\omega_1 = 2\pi f_1 / p ;$$

$$f_1 = 50 \text{ Гц.}$$

Зависимость  $M_{эм} = f(s)$  представлена на рисунке 2.2.

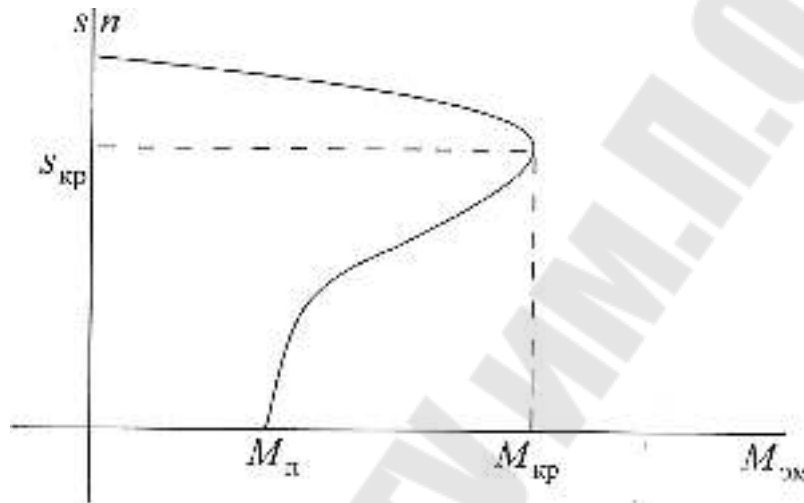


Рис. 2.2. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя при  $0 \leq s \leq 1$

Здесь  $M_{п}$  - пусковой момент, Н·м;

$M_{кр}$  - максимальный (критический) момент;

$s_{кр}$  - критическое скольжение;

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R'_2 + (X_1 + X'_2)^2}} .$$

Изменяя скольжения в диапазоне  $0 \leq s \leq 1$ , рассчитывается значение  $M_{эм}$  и строится зависимость  $M_{эм} = f(s)$  - механическая характеристика. Обязательно определяется  $M_{эм}$  для  $s = 1$ ;  $s = s_{кр}$ ;

$$s = s_{ном} .$$

$$M_{п} = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot R'_2}{\omega_1 \cdot ((R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2)} \quad (s = 1)$$

$$M_{\text{кр}} = \frac{m \cdot U_1^2}{\omega_1 \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)} \quad (s = s_{\text{кр}})$$

Рабочие характеристики определяются в интервале скольжений  $0 < s \leq s_{\text{кр}}$ .

Рассчитывают значения для 5-7 точек.

Для каждого значения скольжения определяют:

1. Определяют  $\underline{I}_0 = I_0 \cdot e^{j\varphi_0}$  (А).
2. Определяют  $\underline{I}_2 = I_2 \cdot e^{j\varphi_2}$  (А).
3. Определяют  $\underline{I}_1 = I_1 \cdot e^{j\varphi_1} = \underline{I}_0 - \underline{I}_2$  (А).
4. Определяют  $\cos \varphi_1$ .
5. Определяют  $M_{\text{эм}} = f(s)$  (Н·м).
6.  $\omega_p = \omega_1 \cdot (1 - s)$ .
7.  $P_2 = M_{\text{эм}} \cdot \omega_p$  (Вт).
8. Определяют  $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_0 + \Delta P_m + \Delta P_y$ ,

где  $\Delta P_0 = m \cdot U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$ ;

$$\Delta P_m = (I_2')^2 \cdot \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right);$$

$$\Delta P_y = 0.5\% \cdot P_{2\text{ном}}.$$

9. Определяют  $P_1 = P_2 + \Delta P_{\Sigma}$ .

10. Определяют  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

Строят зависимости:

1.  $I_1 = f(P_2)$ .
2.  $M_{\text{эм}} = f(P_2)$ .
3.  $P_1 = f(P_2)$ .
4.  $n_p = f(P_2)$ .



$$5. s = f(P_2).$$

$$6. \cos \varphi = f(P_2).$$

$$7. \eta = f(P_2).$$

Параметры электродвигателя в режиме холостого хода ( $P_2 = 0$ ) определяются по выражениям:

$$P_0 = m \cdot U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0;$$

$$\underline{I_0} = I_{0m} \cdot e^{j\varphi_0};$$

$$M_0 \approx 0,01 \cdot M_{\text{НОМ}};$$

$$s_0 = \frac{s_{\text{НОМ}} \cdot M_0}{M_{\text{НОМ}}};$$

$$\omega_{p(0)} = \omega_1 \cdot (1 - s_0).$$

## 2.4. Пример решения задачи

Исходные данные:

Таблица 2.1

Последняя цифра шифра	$P_2$ , кВт	$\eta$	$\cos \varphi$	$X_{\mu^*}$	$R_{0^*}$	$R_{1^*}$	$X_{1^*}$	$R'_{2^*}$	$X'_{2^*}$	$U_{\text{л1}}$	$P$
	11	86.	0.8	3.	0.1	0.07	0.1	0.0	0.1	66	1
		9	6	0	8	3	1	3	5	0	

Решение:

Расчет приведен для номинального скольжения  $s = 0.03$

1. В качестве базисной величины сопротивления принимаем:

$$Z_6 = \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{нф}}}.$$

Номинальное фазное напряжение

$$U_{1\text{нф}} = \frac{U_{\text{л1}}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 380 \text{ В.}$$

Номинальный фазный ток обмотки статора

$$I_{\text{лнф}} = \frac{P_2}{3 \cdot U_{\text{лнф}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{11000}{3 \cdot 380 \cdot 0.86 \cdot 0.869} = 12.91 \text{ А}$$

$$Z_{\sigma} = \frac{380}{12.91} = 29.43 \text{ Ом}$$

Активные и индуктивные сопротивления:

$$X_{\mu} = X_{\mu^*} \cdot Z_{\sigma} = 3 \cdot 29.43 = 88.3 \text{ Ом};$$

$$R_0 = R_{0^*} \cdot Z_{\sigma} = 0.18 \cdot 29.43 = 5.3 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_{1^*} \cdot Z_{\sigma} = 0.11 \cdot 29.43 = 3.24 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_{2^*} \cdot Z_{\sigma} = 0.03 \cdot 29.43 = 0.88 \text{ Ом};$$

$$R_1 = R_{1^*} \cdot Z_{\sigma} = 0.073 \cdot 29.43 = 2.15 \text{ Ом};$$

$$X_2 = X_{2^*} \cdot Z_{\sigma} = 0.15 \cdot 29.43 = 4.41 \text{ Ом}.$$

Действующее значение тока холостого хода

$$I_0 = \frac{U_{\text{лнф}}}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_{\mu})^2}} = \frac{380}{\sqrt{(2.15 + 5.3)^2 + (3.24 + 88.3)^2}} = 4.14$$

А.

Фаза тока холостого хода

$$\varphi_0 = \arccos \frac{R_1 + R_0}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_{\mu})^2}} = \arccos \frac{2.15 + 5.3}{\sqrt{(2.15 + 5.3)^2 + (3.24 + 88.3)^2}} = 85.3^{\circ}.$$

Ток холостого хода электродвигателя – ток в ветви намагничивания

$$\underline{I}_0 = I_0 \cdot e^{j\varphi_0} = 4.14 \cdot e^{j85.3} \text{ А}.$$

2. Действующее значение тока в обмотке ротора

$$I_2 = \frac{U_{\text{лнф}}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \frac{380}{\sqrt{(2.15 + \frac{0.88}{0.03})^2 + (3.24 + 4.41)^2}} = 11.73$$

А.

Фаза тока в обмотке ротора

$$\varphi_2 = \arccos \frac{R_1 + \frac{R_2}{s}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \arccos \frac{2.15 + \frac{0.88}{0.03}}{\sqrt{(2.15 + \frac{0.88}{0.03})^2 + (3.24 + 4.41)^2}} = 13.7^\circ.$$

Ток в обмотке ротора

$$-\underline{I}_2 = \underline{I}_2 \cdot e^{j\varphi_2} = 11.73 \cdot e^{j13.7} \text{ А.}$$

3. Ток в обмотке статора

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}_2 = 4.14 \cdot e^{j85.3} - 11.73 \cdot e^{j13.7} = 13.62 \cdot e^{j32} \text{ А.}$$

При пуске двигателя ( $n_p = 0$ ,  $s = 1$ ) выполняем аналогичный расчет.

Результат сводим в таблицу.

Таблица 2.2

$I_0$ , А	$\varphi_0$ , град	$I_2$ , А	$\varphi_2$ , град	$I_1$ , А	$\varphi_1$ , град
4.14	85.3	46.18	0.37	42.07	20.6

4. Определяем косинус угла  $\varphi_1$

$$\cos \varphi_1 = \cos 32 = 0.85^0$$

5. Определяем механическую характеристику асинхронного электродвигателя  $M_{эм}$ :

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{50}{1} = 314 \text{ рад/с.}$$

$$M_{эм} = \frac{3 \cdot U_{инф}^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s \cdot ((R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2)} = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot 0.88}{314 \cdot 0.03 \cdot ((2.15 + \frac{0.88}{0.03})^2 + (3.24 + 4.41)^2)} =$$

$$= 38.55 \text{ Нм.}$$

6. Угловая скорость вращения ротора

$$\omega_p = \omega_1 \cdot (1 - s) = 314 \cdot (1 - 0.03) = 304.58 \text{ рад/с.}$$

Скорость вращения поля ротора

$$n_p = \frac{60 \cdot \frac{\omega_p}{2 \cdot \pi}}{p} = \frac{60 \cdot \frac{304.58}{2 \cdot 3.14}}{1} = 2970 \text{ об/мин.}$$

7. Определяем  $P_2$ :

$$P_2 = M_{\text{ЭМ}} \cdot \omega_p = 38.55 \cdot 304.58 = 11700 \text{ Вт.}$$

8. Определяем  $P_{\Sigma}$  :

$$\Delta P_0 = m \cdot U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 3 \cdot 380 \cdot 4.14 \cdot \cos 85.3 = 386.72 \text{ Вт;}$$

$$\Delta P_m = (I_2')^2 \cdot (R_1 + \frac{R_2'}{s}) = 11.73^2 \cdot (2.15 + \frac{0.88}{0.03}) = 4300 \text{ Вт;}$$

$$\Delta P_y = 0.5\% \cdot P_{2\text{НОМ}} = 0.005 \cdot 11000 = 55 \text{ Вт;}$$

$$P_{\Sigma} = \Delta P_0 + \Delta P_m + \Delta P_y = 386.72 + 4300 + 55 = 4742 \text{ Вт.}$$

9. Определяем  $P_1$  :

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\Sigma} = 11700 + 4742 = 16442 \text{ Вт.}$$

10. КПД электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{11700}{16442} = 0.713.$$

11. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{0.88}{\sqrt{2.15^2 + (3.24 + 4.41)^2}} = 0.11.$$

Аналогично производим расчет еще для 5 точек от  $s = 0.01$  до  $s_{\text{кр}}$ .

Результаты сводим в таблицу:

Таблица 2.3

s	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11
$P_2$	4600	11700	16100	18400	19200	19100
$\eta$	0.7	0.713	0.703	0.694	0.681	0.668
$I_1$	6.37	13.62	20.1	25.3	29.5	32.8
$P_1$	6600	16400	22900	26500	28200	28600
$M_{\text{ЭМ}}$	14.832	38.552	54.129	63.013	67.181	68.321
$n_p$	2970	2910	2850	2790	2730	2670
$\cos \varphi_1$	0.71	0.85	0.85	0.81	0.78	0.74

Параметры электродвигателя в режиме холостого хода ( $P_2 = 0$ ) определяются по выражениям:

$$P_0 = m \cdot U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 3 \cdot 380 \cdot 4.14 \cdot \cos 85.3 = 386.72 \text{ Вт};$$

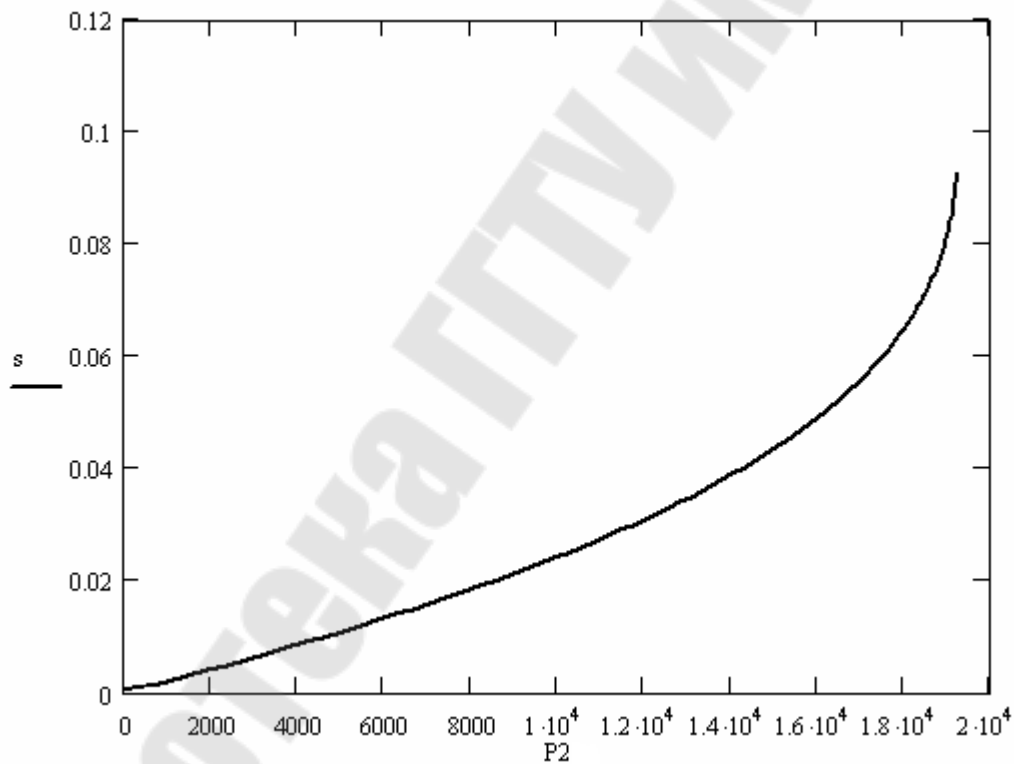
$$\underline{I}_0 = I_0 \cdot e^{j\varphi_0} = 4.14 \cdot e^{j85.3} \text{ А};$$

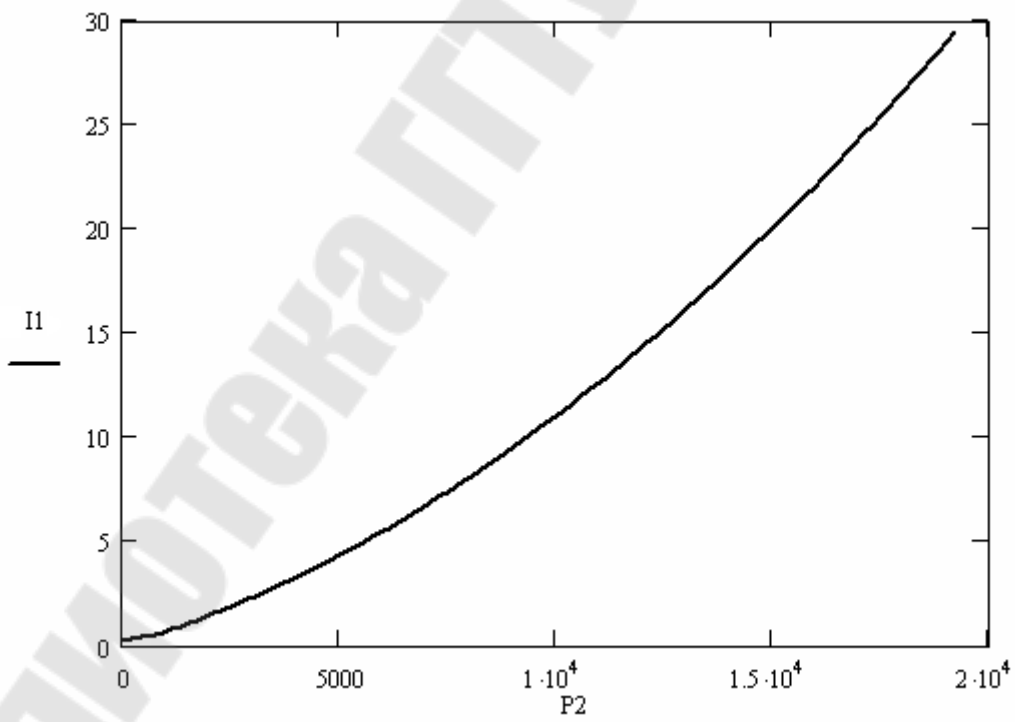
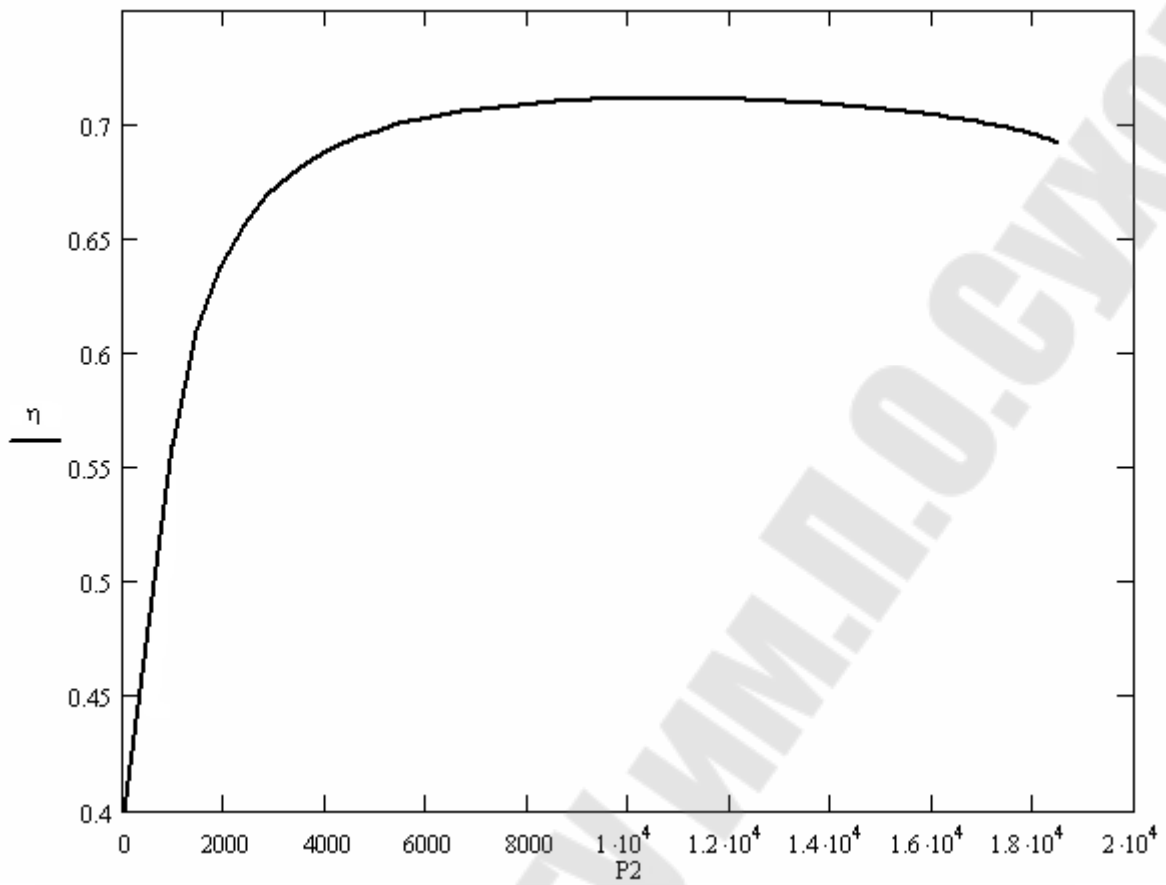
$$M_0 = 0.01 \cdot M_{\text{НОМ}} = 0.01 \cdot 38.55 = 0.3855 \text{ НМ};$$

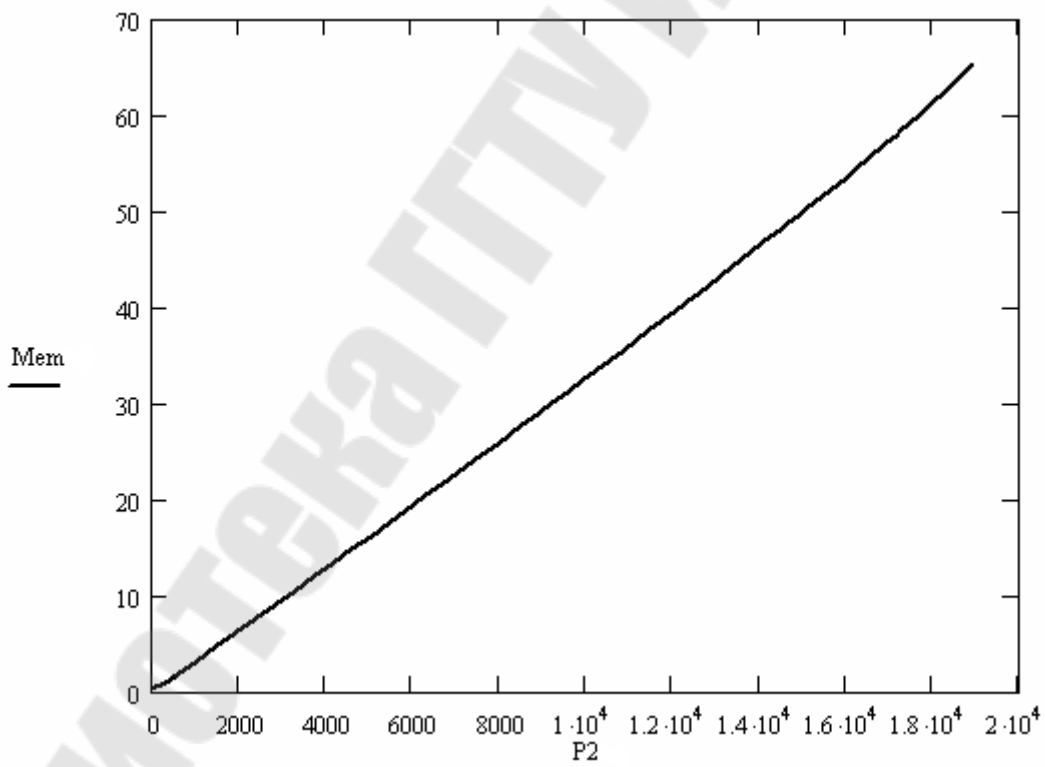
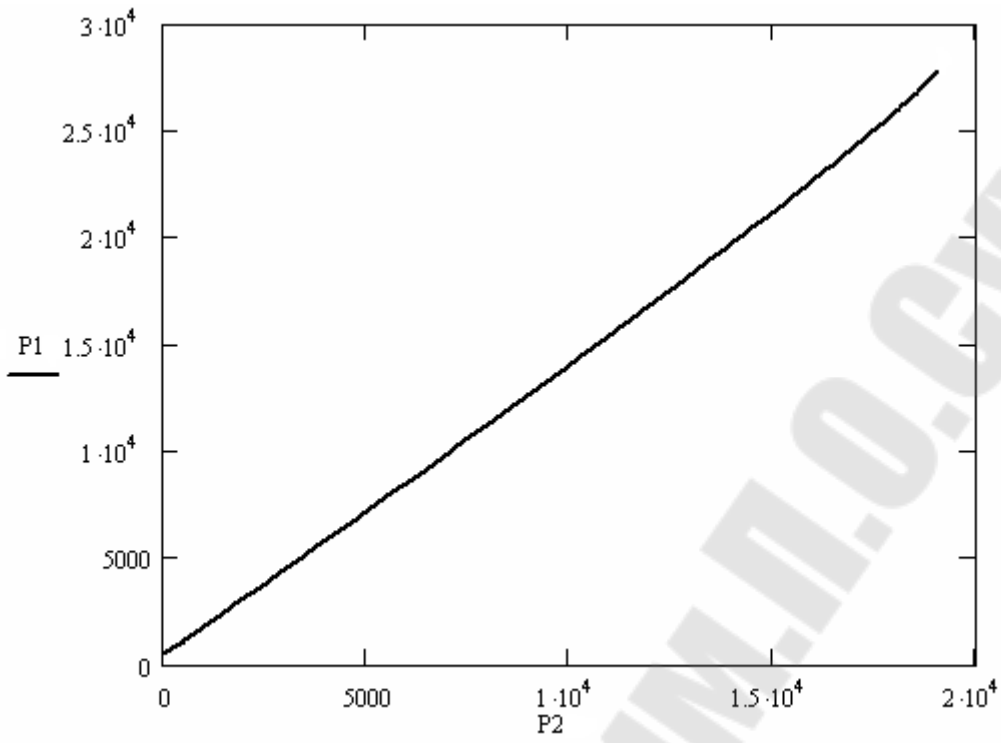
$$s_0 = \frac{s_{\text{НОМ}} \cdot M_0}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{0.03 \cdot 0.3855}{38.55} = 0.0003;$$

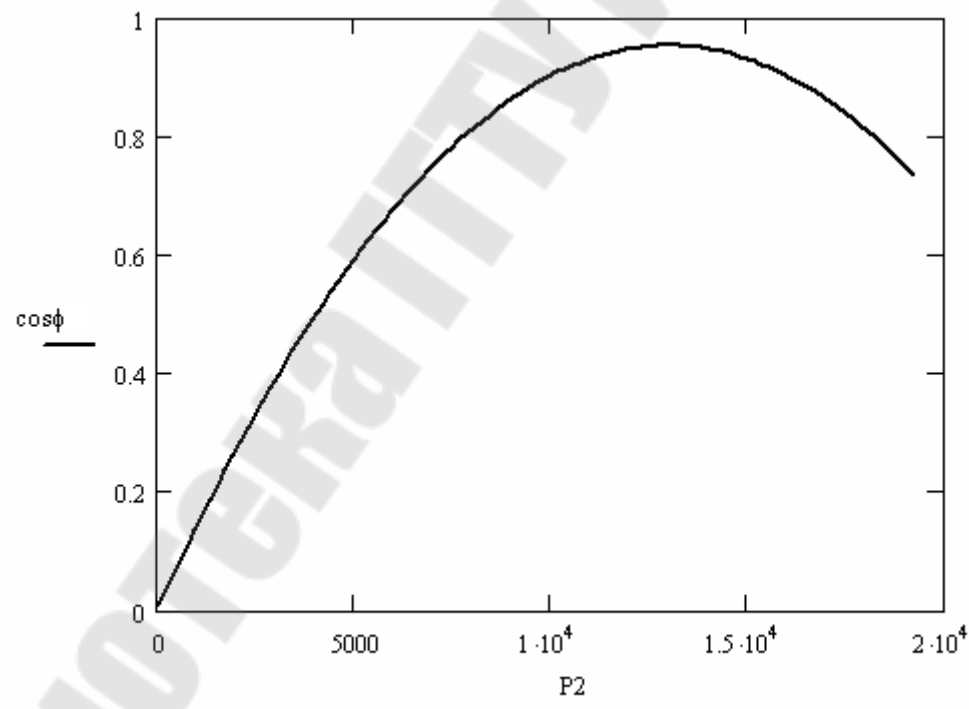
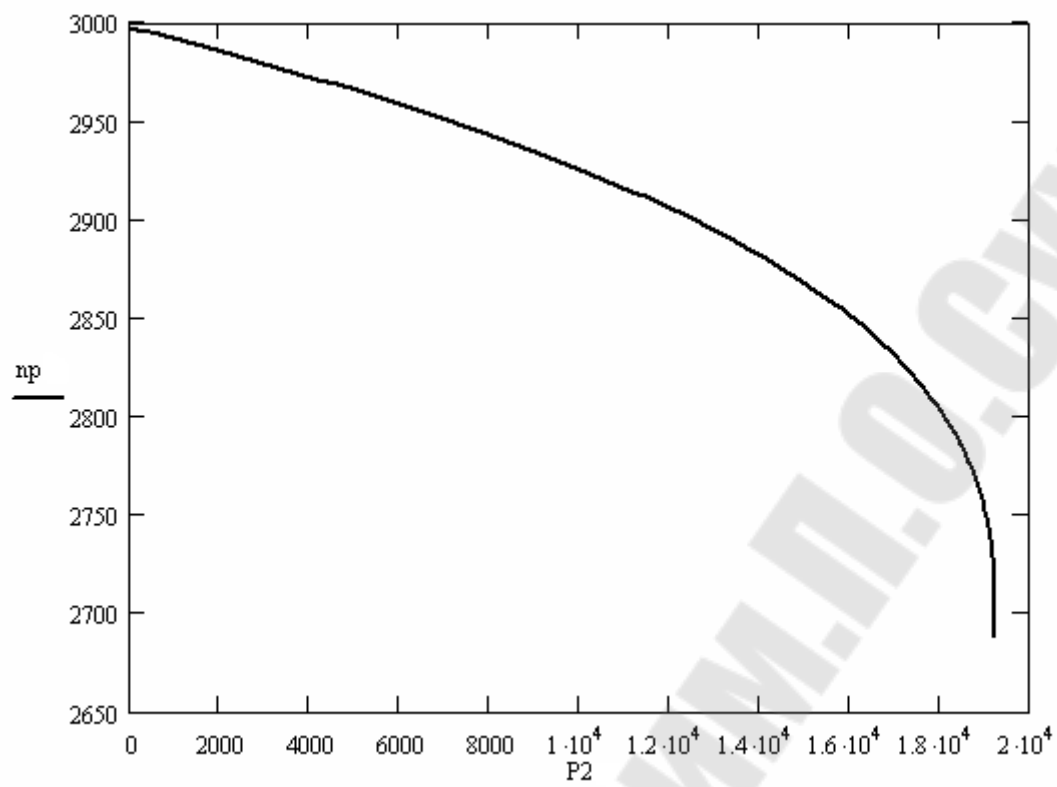
$$\omega_{p0} = \omega_1(1 - s_0) = 314(1 - 0.0003) = 313.906 \text{ рад/с}.$$

По полученным данным строим графики зависимостей  $s(P_2)$ ,  $\eta(P_2)$ ,  $I_1(P_2)$ ,  $P_1(P_2)$ ,  $M_{\text{ЭМ}}(P_2)$ ,  $n_p(P_2)$ ,  $\cos \varphi_1(P_2)$ :









В режиме холостого хода ( $P_2 = 0$ ) параметры имеют значения  $I_0; \cos \varphi_0; M_0; s_0$ .



### Литература

1. Вольдек, А.И. Электрические машины, том 1 / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – Санкт-Петербург: «Питер», 2007. – 316 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины, том 2 / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – Санкт-Петербург: «Питер», 2007. – 316 с.
3. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: «Логос», 200. – 607 с.
4. Костенко, М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Ленинград: «Энергия».
5. Токарев, Б.Ф. Электрические машины / Б.Ф. Токарев. – М.: «Энергоатомиздат», 1990. – 624 с.

## Содержание

Введение.....	3
1. Трансформаторы.....	5
1.1. Контрольная работа.....	5
1.2. Задание.....	5
1.3. Общие рекомендации к выполнению задания.....	7
1.4. Пример решения задачи.....	14
2. Асинхронные электродвигатели.....	20
2.1. Контрольная работа.....	20
2.2. Задание.....	20
2.3. Общие рекомендации к выполнению задания.....	21
2.4. Пример решения задачи.....	25
Литература.....	33

**Веппер Леонид Владимирович**  
**Тодарев Валентин Васильевич**  
**Хабибуллин Дамир Абдулхаевич**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Методические указания**  
**к контрольным работам по одноименной дисциплине**  
**для студентов электротехнических специальностей**  
**заочной формы обучения**

Подписано в печать 09.04.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,7.

Изд. № 113.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе  
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

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

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48