

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ И ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Учебный материал дисциплины достаточно полно изложен в книгах списка основной литературы. Дополнительная литература рекомендуется с целью более глубокой проработки материала.

Изучение дисциплины рекомендуется проводить последовательно в порядке перечисления разделов рабочей программы: основные положения теории ферромагнетизма, процессы в цепях с ферромагнитными элементами, магнитные материалы и конструкции магнитопроводов, трансформаторы, элементы и устройства магнитного типа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Тема: "Расчет трансформатора питания"
Заданными величинами при расчете трансформаторов являются:

- напряжение сети U_1 ,
- частота питающей сети f ,
- напряжения вторичных обмоток U_2, U_3, U_4 ,
- токи в обмотках I_2, I_3, I_4 .

В результате расчета должны быть определены геометрические размеры магнитопровода, данные обмоток (число витков, марки и диаметры проводов) и параметры трансформатора (ток холостого хода, напряжение короткого замыкания, изменение вторичного напряжения, потери, к.п.д., температура перегрева).

Трансформаторы малой мощности по своей конструкции могут быть выполнены стержневыми, броневыми и тороидальными, как это показано на рис. 1. Конфигурация магнитопровода выбирается с учетом дополнительных требований к трансформатору (получения им наименьшей массы, габаритов, стоимости, простоты конструкции, технологичности).

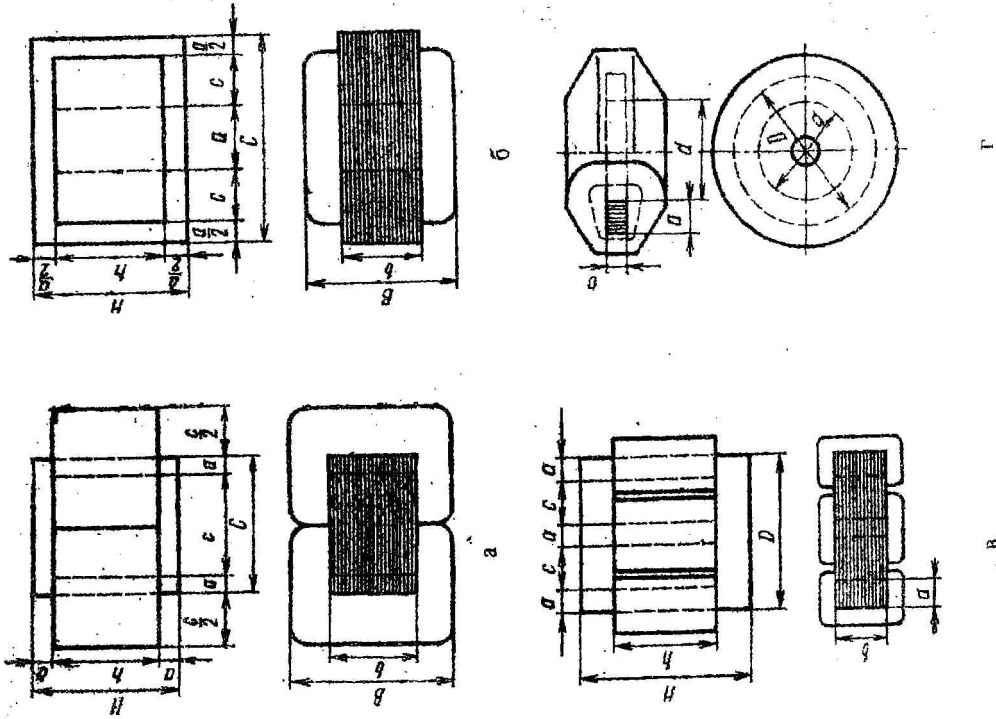


Рис. 1. Магнитопроводы трансформаторов:
а – стержневого, б – стержневого, в – трехфазного стержневого,
г – тороидального.

Сравнение трансформаторов различной конфигурации для частот 50 и 400 Гц позволило вывести оптимальные соотношения размеров с точки зрения минимума массы, объема и стоимости для трансформаторов различных типов. Эти соотношения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип трансформатора	Значения					
	b/a	c/a	h/a	b/a	c/a	h/a
Стержневой	1-2	1,5	2,0	1-2	0,5	3,0
Броневой	1-2	1,0	2,5	1-2	1,0	2,5
Тороидальный	0,4-1	2	-	1-2	2,0	-

Маломощные силовые трансформаторы при их массовом производстве обычно проектируют и изготавливают на стандартных сердечниках, состоящих из унифицированных рядов типовых размеров. Такие ряды сердечников представляют обычно компромиссное решение проблемы оптимальных трансформаторов либо по наименьшей массе и объему, либо по наименьшей стоимости. В приложении 1 приведен ряд ленточных магнитопроводов броневой конструкции для трансформаторов минимальных массы и объема (частоты 50, 400, 1200 Гц).

Для частоты 50 Гц по всем технико-экономическим показателям (масса, объем, стоимость) предпочтительны трансформаторы стержневого типа, выполненные на магнитопроводах оптимальной формы.

Броневая конструкция практически равноценна стержневой массе, однако уступает последней по объему и стоимости. Но несмотря на это для малых мощностей (до 200 ВА) при напряженных обмоток 1600 В следует отдать предпочтение броневым трансформаторам с пластинчатым и ленточным магнитопроводом как наиболее простым по конструкции и наиболее технологичным.

При мощностях в несколько сотен вольт-ампер на частоте 50 Гц и до нескольких киловольт-ампер на частоте 400 Гц наиболее перспективными являются стержневые трансформаторы с двумя катушками на ленточных сердечниках оптимальной формы.

Трансформаторы с тороидальными ленточными сердечниками целесообразны при мощностях до 100 - 200 ВА и частоте сети 400 Гц в случаях, когда необходимо минимальное рассеяние или минимальный объем. Имея преимущества по массогабаритным показателям перед стержневыми и броневыми трансформаторами и сравнительно простую конструкцию, тороидальные трансформаторы менее технологичны.

При разработке трансформатора после выбора конфигурации его магнитопровода определяют необходимую величину произведения площади поперечного сечения стержня магнитопровода Q_c и площади его окна Q_o по формуле

$$Q_c Q_o = \frac{1+\eta}{\eta} \cdot \frac{S_{TP} \cdot 10^2}{4,44 f B j k_M k_C} \quad (1)$$

где: S_{TP} - полезная мощность трансформатора (ВА), η - к.п.д. трансформатора, j - плотность тока в обмотках (А/мм²), B - амплитуда магнитной индукции (Т), k_M - коэффициент заполнения медью окна магнитопровода, k_C - коэффициент заполнения сталью поперечного сечения стержня.

Полезная мощность трансформатора зависит от варианта его электрической схемы. Формулы для ее определения приведены в таблице 2, где

$$S_i = U_i I_i, \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

Таблица 2

Схема трансформатора	Расчетная формула
Двухобмоточный	$S_{TP} = S_2$
Многообмоточный	$S_{TP} = \sum_{i=1}^n S_i$
Трехфазный	$S_{TP} = S_2/3$

Ориентировочные значения расчетных величин η , j и B в зависимости от мощности трансформатора для различных частот приведены на рис. 2.

Трансформаторы с тороидальным магнитопроводом отличаются от броневых и стержневых отсутствием немагнитного зазора в магнитопроводе. Это позволяет увеличить магнитную индукцию, которая при частоте 400 Гц для магнитопровода из ленточной стали Э330 толщиной 0,15 мм берется равной 1,5 - 1,7 Т для трансформаторов мощностью 10 - 100 ВА (плотность тока при этом выбирают 7 - 4 А/мм²) и 1,15 - 1,5 ВА для трансформаторов мощностью 100 - 300 ВА (плотность тока при этом выбирают 4 - 2,5 А/мм²).

Коэффициенты k_M , k_C определяются на основании данных таблиц 3 и 4.

Таблица 3

S_{TP} ВА	k_M	
	$f = 50$ Гц	$f = 400$ Гц
15 - 50	0,22 - 0,28	0,21 - 0,25
50 - 150	0,28 - 0,34	0,25 - 0,28
150 - 300	0,34 - 0,36	0,28 - 0,30
300 - 1000	0,36 - 0,38	0,30 - 0,37

Таблица 4

Толщина листа мм	k_c	
	Пластинчатый магнитопровод	Ленточный магнитопровод
0,35 - 0,5	0,89 - 0,93	0,95 - 0,97
0,2 - 0,35	0,82 - 0,89	0,93 - 0,95
0,05 - 0,2	-	0,75 - 0,93

Определив произведение $Q_c Q_a$ легко установить пределы ширины стержня магнитопроводов, которые могут быть использованы для трансформатора. Зная оптимальные соотношения сторон магнитопровода $y=b/a, x=c/a, z=h/a$ (см. табл. 1), определяем величину a

$$a = \sqrt{\frac{Q_c Q_a}{\eta \mu}} \quad (3)$$

Зная граничные значения a , а также произведение $Q_c Q_a$, выбирают магнитопровод. Выбрав его, следует выписать из таблицы все справочные данные, необходимые для дальнейшего расчета. К ним относятся: типоразмер, геометрические размеры магнитопровода, его сечение, масса и величина $Q_c Q_a$.

Зная марку стали, магнитную индукцию и массу выбранного магнитопровода, определяют потери в стали

$$P_{ст} = \sigma B^2 \tau \quad (4)$$

где σ - удельные потери (Вт/кг), которые зависят от марки стали, толщины пластин или ленты, магнитной индукции и частоты сети, $G_{ст}$ - масса стали магнитопровода. На рис.3 приведены зависимости удельных потерь в стали от магнитной индукции.

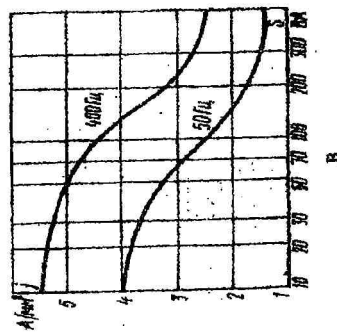
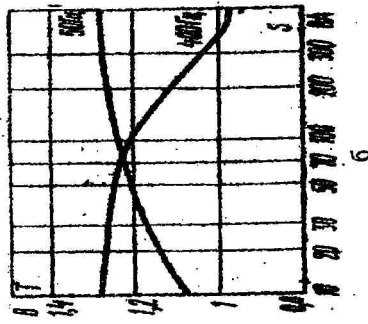
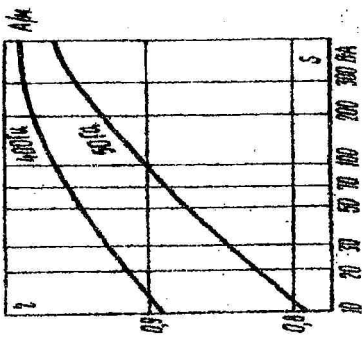


Рис. 2 Зависимости ориентировочных значений расчетных величин от полной мощности трансформатора $S_{тр}$: а - к.п.д., б - максимального значения магнитной индукции B , в - плотности тока

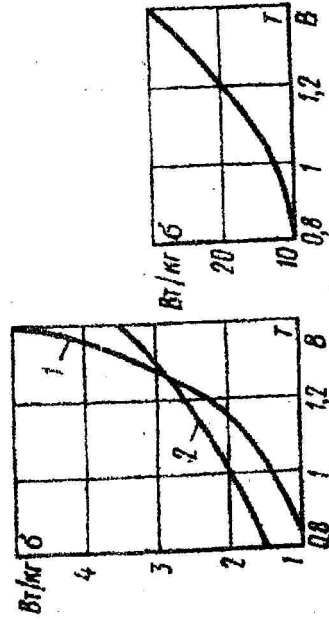


Рис.3. Удельные потери в трансформаторной стали
а - частота 50 Гц (1 - Э42, 2 - Э310), б - частота 400 Гц (Э40)

Если при неизменной частоте известны удельные потери в стали σ_1 и σ_2 для двух значений магнитной индукции B_1 и B_2 , то при любом другом значении магнитной индукции B_x удельные потери в стали будут составлять

$$\sigma_x = \sigma_1 \left(\frac{B_x}{B_1} \right)^\alpha, \quad \text{где } \alpha = \lg \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) / \lg \left(\frac{B_2}{B_1} \right).$$

При изменении частоты потери в стали также меняются. Если магнитная индукция остается неизменной, то изменение частот от f_1 до f_2 вызовет изменение удельных потерь в стали от значения σ_1 до значения σ_2 , зависимость между которыми имеет вид

$$\sigma_2 = \sigma_1 (f_2/f_1)^{1.3}$$

Если изменение частоты тока происходит при неизменном напряжении, приложенном к первичной обмотке трансформатора, то магнитная индукция изменится обратно пропорционально изменению частоты, т. е. $B_2/B_1 = f_1/f_2$ и удельные потери в стали

$$\sigma_2 = \sigma_1 (f_1/f_2)^{0.13}$$

Активная составляющая тока холостого хода, потребляемая трансформатором на покрытие потерь в стали и выражаемая в процентах от номинального тока,

$$i_0 = (P_{\sigma} / S_{\text{нп}}) \cdot 100 \quad (5)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода, выражения в процентах от номинального тока,

$$i_0 = (Q_c / S_{\text{нп}}) \cdot 100 = (q_c \cdot G_r / S_{\text{нп}}) \cdot 100, \quad (6)$$

где Q_c - реактивная мощность (вар), q_c - удельная намагничивающая мощность (вар/кг), определяемая по кривым рис. 4.

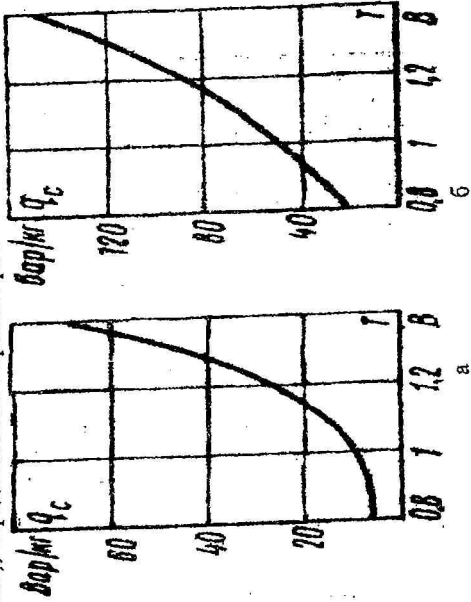


Рис. 4. Удельная намагничивающая мощность:
а - для $f = 50$ Гц, б - для $f = 400$ Гц.

Ток холостого хода, выраженный в процентах от номинального

$$i_0 = \sqrt{i_0^2 + i_0^2} \quad (7)$$

Номинальное значение тока первичной обмотки

$$I_1 = S_{\text{нп}} / U_1 \cos \phi_1 \quad (8)$$

Для коэффициента мощности принимаем $\cos \phi_1 = 0.9 - 0.95$ при $f = 50$ Гц и $\cos \phi_1 = 0.85 - 0.95$ при $f = 400$ Гц. Чем выше мощность трансформатора, тем больше $\cos \phi_1$. Абсолютное значение тока холостого хода (А)

$$I_0 = (i_0 / 100) I_1 \quad (9)$$

В трансформаторах малой мощности его величина лежит обычно в пределах 25 - 40% от номинального значения при частоте 50 Гц и 10 - 30% при частоте 400 Гц. У автотрансформаторов ток холостого хода значительно меньше, чем у трансформаторов и обычно не превышает 15 - 20% при частоте 50 Гц.

После расчета магнитопровода и определения всех его размеров следует перейти к расчету обмоток, который сводится к определению поперечного сечения и диаметра провода каждой обмотки, а также к выбору марки провода.

Ток первичной обмотке I_1 уже определен. Ток во вторичной обмотке

$$I_2 = S_2 / U_2 \quad (10)$$

а для многообмоточного трансформатора

$$I_i = S_i / U_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

По величинам токов находят поперечные сечения проводов

$$q_i = I_i / j, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

Далее по таблице, приведенной в приложении 2, выбирают ближайшие стандартные сечения проводов q_1, q_2, q_3 и их марку. При напряжении обмоток до 500 В следует выбрать провод ПЭЛ или ПЭВ-1 при токах в обмотках до 5 А. При напряжении обмоток более 500 В следует выбрать провод ПЭВ-2. При этом для всех обмоток трансформатора определяют следующие данные: поперечное сечение (мм^2), диаметр провода с изоляцией d_1, d_2, d_3 (мм), и без нее d'_1, d'_2, d'_3 (мм), массу 1 м провода g_1, g_2, g_3 (г).

Действительные плотности тока в обмотках составляют

$$j_i = I_i / q_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Средняя плотность тока трансформатора

$$j = \sqrt{j_1 j_2 \dots j_n}$$

Амплитуда магнитного потока (В·с) в магнитопроводе трансформатора

$$\Phi = B Q_{c4} = B Q_c k_c \cdot 10^{-4}$$

где $Q_{ск}$ - активное сечение магнитопровода (см^2), k_c - коэффициент за-
 понижения стальной сечения магнитопровода.

Числа витков обмоток определяются формулами:

$$w_i = E_i \cdot 10^4 / 4,44 f B Q_{ск}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

При расчете трансформатора для выпрямителя определяется напряже-
 ние вторичной обмотки при холостом ходе. Поэтому э.д.с. обмоток трансфор-
 матора равны их напряжениям, т. е. $E_i = U_i$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

При работе трансформатора под нагрузкой в сопротивлениях его об-
 моток происходит падение напряжения, и для определения чисел витков об-
 моток следует вычислить э.д.с. обмоток при нагрузке. Обозначив процент-
 ное падение напряжения в первичной обмотке Δu_1 и во вторичной Δu_2 , э.д.с.
 обмоток определим выражениями:

$$E_i = U_i (1 - \Delta u_i), \quad E_i = U_i (1 - \Delta u_i), \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (14)$$

Ориентировочные значения Δu_1 и Δu_2 , в зависимости от мощности
 трансформаторов бронзового типа с напряжением обмоток до 1000 В и
 температурой перегрева до 50°C приведены на рис.5. При расчете много-
 обмоточного трансформатора следует иметь в виду, что по мере удаления
 вторичных обмоток от первичной их активные и реактивные сопротивле-
 ния увеличиваются. Поэтому следует принимать Δu_2 для вторичной обмот-
 ки, расположенной непосредственно над первичной, меньше, а для наруж-
 ной обмотки больше, чем показано на рисунке на 10 - 20 %.

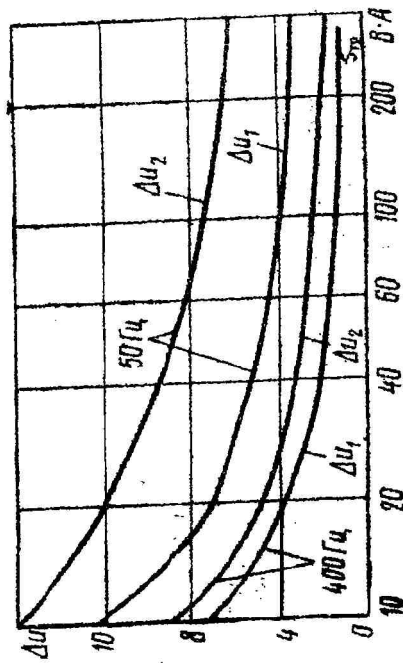


Рис. 5. Зависимость процентного падения напряжения от мощности

Поскольку обмотки стержневых трансформаторов имеют меньшие ак-
 тивные и реактивные сопротивления, чем броневых, при расчете транс-
 форматоров стержневого типа следует Δu_1 и Δu_2 уменьшить на 20 - 30 %
 по сравнению с приведенными на рис.5 значениями.

После определения сечения проводов и чисел витков проверяют их
 размещение на магнитопроводе. Обмотки трансформаторов укладываются на
 каркасе, изготовленном из изоляционного материала, в качестве которого ис-
 пользуются электрокартон, пропитанный изолирующим лаком, гетинакс,
 пластмасса и другие негигроскопичные изоляционные материалы, обла-
 дающие достаточно высокой нагревостойкостью.

Каркас состоит из гильзы, представляющей собой трубку прямоуголь-
 ного, квадратного или круглого сечения. На концах гильзы укрепляются
 боковые щечки. При изготовлении каркаса из пластмассы его прессуют
 целиком. Иногда при прессовке каркаса в щечки запрессовывают выводные
 лепестки, предназначенные для присоединения концов обмоток. Широкое
 применение нашла так называемая бескаркасная намотка. При этом спосо-
 бе обмотка наматывается на гильзу, не имеющую боковых щечек. Витки
 обмотки на гильзе плотно укладываются рядами.

При изготовлении обмоток (особенно при малом диаметре провода)
 может происходить «западание» витков из последующих рядов в нижеле-
 жщие, в результате чего напряжение между отдельными витками может
 возрасти настолько, что это вызовет пробой изоляции и выход трансформа-
 тора из строя. Для предотвращения «западания» после намотки каждого
 ряда укладывается межслоевая изоляция, в качестве которой применяется
 конденсаторная бумага толщиной 0,01 мм при диаметре провода обмот-
 ки менее 0,1 мм, телефонная бумага толщиной 0,05 мм при диаметре про-
 вода 0,1 - 0,5 мм и кабельная бумага толщиной 0,12 мм при диаметре про-
 вода более 0,5 мм.

Размещение обмоток на магнитопроводе изображено на .б. Ближе к
 стержню магнитопровода обычно располагают первичную обмотку (сетевую)
 и затем вторичную. В многообмоточном трансформаторе ближе к стержню
 помещается обмотка более высокого напряжения (анодная), а снаружи - бо-
 лее низкая (накальная). Если трансформатор имеет экранированную обмотку, ее
 помещают между обмотками сетевой и более высокого напряжения. Перед
 намоткой обмотки на каркас укладывается изоляционная лента из лакоткани,
 концы которой склеиваются полистироловым лаком. Обычно гильза и боковые
 щечки каркаса имеют одинаковую толщину ($\delta_1 = \delta_{щ}$). Каркасы из электрокар-
 тона или бакелитизированной бумаги при напряжении обмотки до 500 В имеют
 толщину $\delta_1 = \delta_{щ} = 1 - 2$ мм, а каркасы из гетинакса или пластмассы $\delta_1 = \delta_{щ}$
 $= 1 - 2$ мм. Зазор между щечкой каркаса и магнитопроводом составляет $\delta_3 =$
 $0,5 - 1$ мм на сторону. Следовательно, высота обмотки (мм) равна

$$h_{\text{об}} = h - 2\delta_{щ} - 2\delta_3, \quad (15)$$

где h - высота окна магнитопровода (мм).

а между поверхностями наружных обмоток двух стержней в трансформаторе стержневого типа

$$\delta_c = c - 2(\delta_3 + \delta_r + \delta_r) \quad (22)$$

где c - ширина окна магнитопровода.

Свободный промежуток должен быть не менее 1 - 4 мм (чем больше мощность трансформатора, тем больше δ_c). Если свободный промежуток меньше указанного, то нет уверенности в том, что обмотки разместятся на сердечнике. В этом случае следует выбрать магнитопровод с большей площадью окна или увеличить либо магнитную индукцию, либо плотность тока. Если свободный промежуток окажется достаточно большим, то также πρέπει произвести новый вариант расчета.

Масса меди каждой обмотки (кг)

$$G_{мi} = w_i g l_i \cdot 10^{-3} \quad (23)$$

где g_i - масса одного метра провода, l_i - средние длины витков, которые определяются по формулам

$$l_i = 2(a + b + \pi r_i) \quad (24)$$

где

$$r_i = \delta_3 + \delta_r + (i-1)\delta_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j - \frac{\delta_i}{2} \quad (25)$$

Удельное сопротивление меди при 20°C равно $\rho_{20} = 0,0175$ Ом·мм²/м. При температуре обмоток T удельное сопротивление

$$\rho_T = \rho_{20} [1 + 0,004(T - 20)]$$

Таким образом $\rho_{75} = 0,0214$, $\rho_{90} = 0,0224$, $\rho_{105} = 0,0234$ Ом·мм²/м.

Так как удельная масса меди 8,9 кг/дм³, то проволока длиной 1 км и сечением 1 мм² весит 8,9 кг, а проволока длиной 1 км и сечением q мм² - 8,9 q кг. Мощность, расходуемая на нагревание проволоки длиной 1 км и сечением q мм², равна $I^2 \rho / 8,9 q$, или потери на 1 кг

$$\frac{I^2 \rho \cdot 1000}{8,9 q^2} = j^2 \rho$$

где $\rho = 1000 \rho / 8,9$ - удельные потери в меди (Вт/кг), имеющие следующие значения при различных температурах обмоток $\rho_{75} = 2,4$, $\rho_{90} = 2,5$, $\rho_{105} = 2,63$ (Вт/кг).

Потери в меди каждой обмотки при ее температуре T

$$P_{Mi} = \rho_T j_i^2 G_{Mi} \quad (26)$$

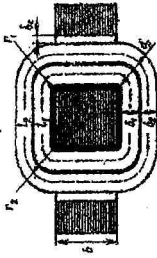
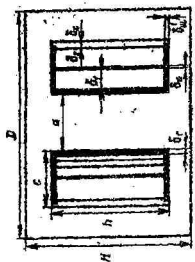


Рис. 6. Размещение обмоток в магнитопроводе

Число витков в одном слое каждой обмотки

$$N_i = (h_{0B} / k_y d_i) - 1 \quad (16)$$

где d_i - диаметр провода i -ой обмотки с изоляцией (мм), k_y - коэффициент, учитывающий неплотность намотки и равный 1,1 - 1,15.

Числа рядов в обмотках

$$M_i = w_i / N_i \quad (17)$$

где w_i - число витков рассчитываемой обмотки для броневых трансформаторов. Для трансформаторов стержневого типа берется половинное число витков рассчитываемой обмотки, т.е.

$$M_i = w_i / 2N_i \quad (18)$$

После укладки каждой обмотки на каркас помещается междуобмоточная изоляция, представляющая собой ленту из лакоткани в два слоя или какулю-либо марку изоляционной бумаги, намотанной в несколько слоев. При напряжении обмоток до 1000 В между обмотками укладывают дополнительную изоляцию из электротона, бумаги, гетинакса или другого изоляционного материала. Радиальный размер каждой обмотки равен

$$\delta_i = 1,2 M_i d_i \quad (19)$$

где множитель 1,2 учитывает межслойную изоляцию и разбухание обмотки при намотке и пропитке. Следовательно, радиальный размер всех обмоток

$$\delta_r = \delta_1 + \delta_2 + \dots + (n-1)\delta_0 \quad (20)$$

Между гильзой каркаса и магнитопроводом имеется зазор. Свободный промежуток в окне магнитопровода от поверхности последней обмотки до ярма в броневом трансформаторе

$$\delta_c = c - \delta_3 - \delta_r - \delta_r \quad (21)$$

где ρ_1 - плотность тока в i -ой обмотке (A/mm^2), $G_{мв}$ - масса этой обмотки (кг).
Общие потери в меди всех обмоток

$$P_{мв} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (27)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P}{P + P_{ст} + P_{мв}} \quad (28)$$

где $P = S_{пр} \cos \phi_1$ - полезная мощность в нагрузке трансформатора (автотрансформатора или на одну фазу трехфазного трансформатора).

Относительная нагрузка β , при которой х.п.д. трансформатора максимален,

$$\beta = \sqrt{\frac{P_{ст}}{P_{мв}}} \quad (29)$$

Активные сопротивления обмоток трансформатора

$$r_i = \rho \frac{l_i w_i}{q_i} \quad (30)$$

где ρ - удельное сопротивление медного провода, которое зависит от температуры.

Полное активное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первичной обмотке

$$r_k = r_1 + r_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \quad (31)$$

Для многообмоточного трансформатора полное активное сопротивление короткого замыкания n -ой обмотки, приведенное к первичной обмотке

$$r_k = r_1 + r_n \left(\frac{w_1}{w_n} \right)^2 \quad (32)$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, выраженная в процентах,

$$u_a = \left(I_1 r_k / U_1 \right) \cdot 100, \quad (33)$$

где U_1 и I_1 - номинальные напряжение и ток первичной обмотки соответственно.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, выраженная в процентах

$$u_r = \frac{180 AW \delta}{\sqrt{3} Q_{ст} h_n} \cdot 10^2, \quad (34)$$

где

AW - средняя м.д.с., определяемая через ток в обмотках по формуле

$$AW = \sqrt{\frac{(I_0 w_0)^2}{2} + \sum_{i=1}^n (I_i w_i)^2},$$

I - средняя длина витков обмоток, определяемая через средние длины витков всех обмоток по формуле

$$I = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n l_i,$$

v - число стержней, несущих обмотки (для броневые и трехфазного трансформатора $v = 1$, для стержневого $v = 2$),

W - амплитуда магнитной индукции (Т),

$Q_{ст}$ - активное сечение магнитопровода ($см^2$),

$h_{об}$ - высота обмотки (мм),

δ - расчетный зазор для погожа рассеяния (мм), равный

$$\delta = \delta_0 + \frac{1}{3} \left[(n-1) \delta_0 + \sum_{i=1}^n \delta_i \right].$$

Напряжение короткого замыкания, выраженное в процентах

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_r^2} \quad (35)$$

Изменение вторичного напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной, выраженное в процентах,

$$\Delta u = \Delta u_1 + \Delta u_2 = u_a \cos \phi_2 + u_r \sin \phi_2 \quad (36)$$

При чисто активной нагрузке $\Delta u = u_a$. Вычисленные падения напряжения следует сопоставить с теми, которыми задавались, и уточнить при необходимости число витков обмоток.

Температура перегрева обмоток относительно окружающей среды может быть приблизительно определена по следующей формуле

$$\Delta T = \frac{P_{ст} + P_{мв}}{\alpha_T Q_{охла}} \quad (37)$$

где $P_{ст}$ и $P_{мв}$ - потери в стали и меди (Вт), α_T - коэффициент теплоотдачи трансформатора, зависящий как от мощности трансформатора, так и от частоты сети. В расчетах принимают $\alpha_T = 11-13$ Вт/м²°С, $Q_{охла}$ - общая поверхность охлаждения ($м^2$), равная сумме поверхностей охлаждения обмотки Q_1 и магнитопровода Q_2 ,

$$Q_{охла} = Q_1 + Q_2,$$

причем для броневые трансформатора они равны

$$Q_1 = 2h_{об} [a + \pi(c-d)] \cdot 10^{-6}, \quad Q_2 = 2[(C+Y)b + (C+h)a + yb] \cdot 10^{-6},$$

а для стержневого -

$$Q_1 = 2h_{об} [2a + b + \pi(c/2 - 2d)] \cdot 10^{-6}, \quad Q_2 = 2[2Ca + b(C + 2a)] \cdot 10^{-6}.$$

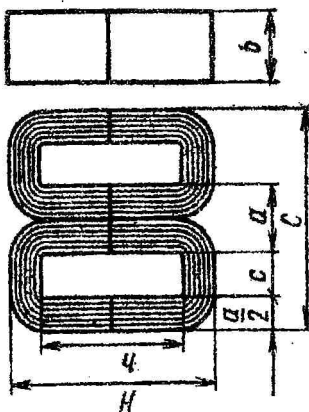
Определив температуру перегрева и прибавив к ней температуру окружающей среды, получим рабочую температуру провода обмотки. Эта температура не должна превышать предельно допустимую величину, на которую рассчитана изоляция применяемого провода. Например, для провода ПЭЛЛ предельно допустимая температура равна 105°С, а для ПЭВ-2 в зависимости от класса - 120 и 130°С.

Трансформатор, закрепленный на шасси, рассеивает значительно большую мощность, чем в случае, когда он омывается воздухом со всех сторон, так как шасси играет роль теплоотвода, увеличивающего поверхность охлаждения. В местах крепления трансформатора на шасси на пути теплового потока возникает термическое (контактное) сопротивление, которое в значительной степени зависит от состояния соприкасающихся поверхностей и качества монтажа. В крупных трансформаторах с непровитанными обмотками отвод тепла от внутренних слоев обмоток осуществляется медными шинами, вводимыми во внутренние слои моток и закрепляемыми на шасси.

Варианты заданий

Вариант	Напряжение сети [В]	Напряжение вторичной обмотки [В]	Частота сети [Гц]	Ток нагрузки [А]
1	U ₁	U ₂	f	I ₂
2	220	24	50	3
3				2
4				1,5
5				3
6				2
7	45	45	50	1,5
8				3
9				2
10				1,5
11				3
12	115	24	400	2
13				1,5
14				3
15				2
16				1,5
17	45	45	50	3
18				2
19				1,5
20				3
21				2
22	400	45	50	1,5
23				3
24				2

Типовые броневые легочные магнитопроводы



Обозначение	Размеры, мм												
	a	b	c	с	С	Н	h	б	Q _{сн}	l _{ср}	Q _{д0}	V _{ср}	G _{ср}
ШЛ10х10	10	25	10	40	40	35	10	0,87	8,5	2,50	7,4	67	
ШЛ10х12,5	10	25	10	40	40	35	12,5	1,09	8,5	3,12	9,26	71	
ШЛ10х16	10	25	10	40	40	35	16	1,39	8,5	4	11,8	91	
ШЛ10х20	10	25	10	40	40	35	20	1,74	8,5	5	14,8	113	
ШЛ12х12,5	12	30	12	48	48	42	12,5	1,31	10,2	5,4	13,36	100	
ШЛ12х16	12	30	12	48	48	42	16	1,68	10,2	6,9	17,1	130	
ШЛ12х20	12	30	12	48	48	42	20	2,10	10,2	8,7	21,4	165	
ШЛ12х25	12	30	12	48	48	42	25	2,63	10,2	10,8	26,8	205	
ШЛ16х16	16	40	16	64	64	56	16	2,24	13,6	16,6	30,46	235	
ШЛ16х20	16	40	16	64	64	56	20	2,80	13,6	20,5	38,1	295	
ШЛ16х25	16	40	16	64	64	56	25	3,50	13,6	25,6	47,6	370	
ШЛ16х32	16	40	16	64	64	56	32	4,50	13,6	32,6	61,2	470	
ШЛ20х20	20	50	20	80	80	70	20	3,50	17,1	40	59,9	460	
ШЛ20х25	20	50	20	80	80	70	25	4,40	17,1	50	75,2	575	
ШЛ20х32	20	50	20	80	80	70	32	5,60	17,1	64	95,8	735	
ШЛ20х40	20	50	20	80	80	70	40	7,10	17,1	80	121,4	920	
ШЛ25х25	25	62,5	25	100	100	87,5	25	5,50	21,3	98	117	900	
ШЛ25х32	25	62,5	25	100	100	87,5	32	7,10	21,3	125	151,2	1150	
ШЛ25х40	25	62,5	25	100	100	87,5	40	8,80	21,3	156	187,4	1440	
ШЛ25х50	25	62,5	25	100	100	87,5	50	11	21,3	195	234	1800	
ШЛ32х32	32	80	32	128	128	112	32	9,10	27,3	261	284,4	1900	
ШЛ32х40	32	80	32	128	128	112	40	11,30	27,3	328	308,5	2370	
ШЛ32х50	32	80	32	128	128	112	50	14,20	27,3	410	388	2970	
ШЛ32х64	32	80	32	128	128	112	64	18,10	27,3	523	494	3800	
ШЛ40х40	40	100	40	160	160	140	40	14,20	34,2	640	486	3720	
ШЛ40х50	40	100	40	160	160	140	50	17,70	34,2	800	605	4650	
ШЛ40х64	40	100	40	160	160	140	64	22,70	34,2	1025	776	5960	
ШЛ40х80	40	100	40	160	160	140	80	28,40	34,2	1280	971	7430	

Намоточные данные проводов круглого сечения

Номиналь- ный диа- метр d' (мм)	Сечение q, (мм ²)	Масса 1м провода в, (г)	Макс. наружный диаметр d (мм)		
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2
0,03	0,00071	0,0115	0,04		
0,04	0,00126	0,0144	0,05		
0,05	0,00196	0,0175	0,065		
0,06	0,00283	0,0251	0,075	0,085	0,09
0,07	0,00385	0,0342	0,085	0,095	0,10
0,08	0,00503	0,0447	0,095	0,105	0,11
0,09	0,00636	0,0565	0,105	0,115	0,12
0,10	0,00785	0,0698	0,12	0,125	0,13
0,11	0,00950	0,0845	0,13	0,135	0,14
0,12	0,01131	0,1010	0,14	0,145	0,15
0,13	0,01327	0,118	0,15	0,155	0,16
0,14	0,01539	0,137	0,16	0,165	0,17
0,15	0,01767	0,157	0,17	0,18	0,19
0,16	0,02011	0,179	0,18	0,19	0,20
0,17	0,02270	0,202	0,19	0,20	0,21
0,18	0,02545	0,226	0,20	0,21	0,22
0,19	0,02835	0,252	0,21	0,22	0,23
0,20	0,03142	0,279	0,225	0,23	0,24
0,21	0,03464	0,308	0,235	0,24	0,25
0,22	0,03808	0,339	0,255	0,27	0,28
0,23	0,04115	0,369	0,275	0,29	0,30
0,25	0,04909	0,436	0,31	0,31	0,32
0,27	0,05726	0,509	0,33	0,33	0,34
0,29	0,06605	0,587	0,35	0,35	0,36
0,31	0,07548	0,671	0,370	0,37	0,38
0,33	0,08563	0,760	0,390	0,39	0,41
0,35	0,09621	0,855	0,420	0,42	0,44
0,38	0,1134	1,010	0,450	0,45	0,47
0,41	0,1320	1,11	0,49	0,48	0,50
0,44	0,1521	1,35	0,52	0,51	0,53
0,47	0,1735	1,54	0,54	0,53	0,55
0,49	0,1886	1,68	0,56	0,56	0,58
0,51	0,2043	1,82	0,58	0,58	0,60
0,53	0,2206	1,96	0,60	0,60	0,62
0,55	0,2375	2,11	0,62	0,62	0,64
0,57	0,2552	2,27	0,64	0,64	0,66
0,59	0,2734	2,43	0,67	0,67	0,69
0,62	0,3019	2,68	0,69	0,69	0,72
0,64	0,3217	2,86	0,72	0,72	0,75
0,67	0,3526	3,13	0,74	0,74	0,77
0,69	0,3739	3,32	0,78	0,78	0,80
0,72	0,4072	3,60			

Пример расчета

Задание. Рассчитать трансформатор минимальной массы для выпрямителя с исходными данными, соответствующими варианту 24 ($U_1 = 115$ В, $U_2 = 45$ В, $f = 400$ Гц, $I_2 = 1,5$ А).

Расчет ведем в следующем порядке.

1. Определяем расчетную мощность $S_{TP} = 45 \cdot 1,5 = 67,5$ В·А.
2. Выбираем броневой ленточный магнитопровод из стали Э330 толщиной 0,15 мм.
3. Из графиков рис. 2 выбираем величины $\eta = 0,93$, $V = 1,4$ Т; $j = 1,4$ А/мм². По таблицам 3 и 4 определяем $k_w = 0,27$; $k_s = 0,9$.

Из выражения (1) определяем

$$Q_c Q_0 = \frac{1 + \eta}{\eta} \frac{S_{TP} \cdot 10^3}{4,44 \sqrt{B} k_w k_s} = \frac{(1 + 0,93) \cdot 67,5 \cdot 10^3}{0,93 \cdot 4,44 \cdot 400 \cdot 1,4 \cdot 0,27 \cdot 0,9} = 5,3 \text{ см}^4.$$

Из (3) определяем граничные значения размера a (см)

$$a = \sqrt{\frac{Q_c Q_0}{5 + 2,5}} = \sqrt{\frac{5,3}{7,5}} = 0,84 \text{ см}.$$

4. По таблице приложения 1 выбираем магнитопровод ШД 12×16, размеры которого: $a = 12$ мм, $h = 30$ мм, $c = 12$ мм, $b = 16$ мм, $H = 42$ мм, $C = 48$ мм, активная площадь сечения $Q_{ак} = 1,8 \text{ см}^2$, средняя длина магнитной силовой линии ленты $l_{CT} = 10,2$ см, величина произведения сечения стали на сечение окна $Q_c Q_0 = 6,9 \text{ см}^4$, активный объем $V_{CT} = 17,1 \text{ см}^3$, масса $G_{CT} = 130$ г.

5. Из графиков рис. 3 и рис. 4 для стали Э330 толщиной 0,15 мм определить удельные потери $\sigma = 27$ Вт/кг и удельную намагничивающую мощность $q_C = 145$ вар/кг. Из (4) определяем потери в стали

$$P_{CT} = \sigma G_{CT} = 27 \cdot 0,13 = 3,5 \text{ Вт}.$$

6. Из выражений (5) – (7) определяем ток холостого хода и его составляющие

$$i_0 = \frac{P_{CT}}{S_{TP}} \cdot 100 = \frac{3,5}{67,5} \cdot 100 = 5,2\%,$$

$$i_p = \frac{q_C G_{CT}}{S_{TP}} \cdot 100 = \frac{145 \cdot 0,13}{67,5} \cdot 100 = 27,8\%,$$

$$i_0 = \sqrt{i_p^2 + i_c^2} = \sqrt{27,8^2 + 5,2^2} = 28,3\%.$$

Из (8) определяем ток первичной обмотки, полагая $\cos \phi_0 = 0,9$

$$I_1 = S_{TP} / U_1 \cos \phi_0 = 67,5 / 115 \cdot 0,93 = 0,645 \text{ А}.$$

Из (9) определяем абсолютное значение тока холостого хода

$$I_0 = (i_0 / 100) I_1 = (28,3 / 100) \cdot 0,645 = 0,184 \text{ А}.$$

7. Из (12) определяем поперечные сечения проводов обмоток

$$q_1 = I_1 / j = 0,645 / 1,4 = 0,46 \text{ мм}^2, \quad q_2 = I_2 / j = 1,5 / 1,4 = 1,07 \text{ мм}^2.$$

Из приложения 2 выбираем провод марки ПЭВ-1, при этом

$$q_1 = 0,152 \text{ мм}^2, \quad d_1 = 0,44 \text{ мм}, \quad d_2 = 0,49 \text{ мм}, \quad g_1 = 1,35 \text{ г}.$$

$$q_2 = 0,352 \text{ мм}^2, \quad d_2 = 0,67 \text{ мм}, \quad d_3 = 0,72 \text{ мм}, \quad g_2 = 3,13 \text{ г}.$$

Действительная плотность тока в обмотках составляет

$$j_1 = I_1 / q_1 = 0,645 / 0,152 = 4,25 \text{ А/мм}^2,$$

$$j_2 = I_2 / q_2 = 1,5 / 0,352 = 4,27 \text{ А/мм}^2.$$

Средняя плотность тока в обмотках равна

$$j = \sqrt{j_1 j_2} = \sqrt{4,25 \cdot 4,27} = 4,26 \text{ А/мм}^2.$$

8. Из (13) определяем числа витков обмоток. Так как заданы напряжения обмоток при холостом ходе выпрямителя, то э.д.с. обмоток равны напряжениям, т.е. $E_1 = U_1$ и $E_2 = U_2$. Поэтому для чисел витков получим

$$\omega_1 = U_1 \cdot 10^4 / 4,44 \sqrt{B} Q_{ак} = 115 \cdot 10^4 / 4,44 \cdot 400 \cdot 1,4 \cdot 1,68 = 274,$$

$$\omega_2 = U_2 \cdot 10^4 / 4,44 \sqrt{B} Q_{ак} = 45 \cdot 10^4 / 4,44 \cdot 400 \cdot 1,4 \cdot 1,68 = 108.$$

9. Конструктивный расчет обмоток.

Из (15) следует

$$k_{ст} = h - 2\delta_{ш} - 2\delta_3 = 30 - 3 = 27 \text{ мм}.$$

С помощью формулы (16) найдем числа витков в одном слое

$$N_1 = (k_{ст} / k_1 d_1) - 1 = 25 / (1,1 \cdot 0,49) - 1 = 46,$$

$$N_2 = (k_{ст} / k_2 d_2) - 1 = 25 / (1,1 \cdot 0,72) - 1 = 30.$$

Из (17) определяем число рядов обмоток

$$M_1 = \omega_1 / N_1 = 274 / 46 = 6,$$

$$M_2 = \omega_2 / N_2 = 108 / 30 = 4.$$

Из (19) определяем радиальные размеры обмоток

$$\delta_1 = 1,2 M_1 d_1 = 1,2 \cdot 6 \cdot 0,49 = 3,52 \text{ мм},$$

$$\delta_2 = 1,2 M_2 d_2 = 1,2 \cdot 4 \cdot 0,72 = 3,45 \text{ мм}.$$

и размер двух обмоток из (20):

$$\delta_p = \delta_1 + \delta_2 + \delta_0 = 3,52 + 3,45 + 0,3 = 7,3 \text{ мм}.$$

Из (21) определяем свободный промежуток в окне магнитопровода

$$\delta_c = c - \delta_3 - \delta_1 - \delta_2 = 12 - 1 - 1,5 - 7,3 = 2,2 \text{ мм}.$$

Из (23) – (27) определяем потери в проводах обмоток

$$r_1 = \delta_3 + \delta_1 + \frac{\delta_1}{2} = 1 + 1,5 + 1,76 = 4,26 \text{ мм},$$

$$I_1 = 2(\sigma a + b + \pi r) \cdot 10^{-3} = 2(12 + 16 + 3,14 \cdot 4,26) \cdot 10^{-3} = 0,083 \text{ М},$$

$$G_{M1} = \pi g_1 I_1 \cdot 10^{-3} = 274 \cdot 1,35 \cdot 0,083 \cdot 10^{-3} = 0,0305 \text{ кг},$$

$$r_2 = \delta_1 + \delta_2 + \delta_1 + \delta_0 + \frac{\delta_2}{2} = 1 + 1,5 + 3,52 + 0,3 + 1,73 = 8 \text{ мм},$$

$$I_2 = 2(a + b + \pi r_2) \cdot 10^{-3} = 2(12 + 16 + 3.14) \cdot 10^{-3} = 0,107 \text{ м,}$$

$$G_{M2} = w_2 g_2 I_2 \cdot 10^{-3} = 108 \cdot 3,13 \cdot 0,107 \cdot 10^{-3} = 0,035 \text{ кг,}$$

$$P_{M1} = 2,6 I_1^2 G_{M1} = 2,6 \cdot 4,25^2 \cdot 0,0305 = 1,5 \text{ Вт,}$$

$$P_{M2} = 2,6 I_2^2 G_{M2} = 2,6 \cdot 4,27^2 \cdot 0,0305 = 1,8 \text{ Вт,}$$

$$P_{M0} = P_{M1} + P_{M2} = 1,5 + 1,8 = 3,3 \text{ Вт.}$$

11. Из (28) определяем к.п.д. трансформатора

$$\eta = \frac{S_{NH} \cos \varphi_1}{S_{T1} \cos \varphi_1 + P_{CT} + P_{M0}} = \frac{67,5}{67,5 + 3,5 + 3,3} = 0,91.$$

Нагрузка, при которой к.п.д. максимален

$$\beta = \sqrt{\frac{P_{CT}}{P_{M0}}} = \sqrt{\frac{3,5}{3,3}} = 1,02.$$

12. Из (1.20) - (1.31) определяем r_1, r_2 и r_K

$$r_1 = \rho \frac{I_{M1}}{q_1} = 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,083 \cdot 274}{0,152} = 3,55 \text{ Ом,}$$

$$r_2 = \rho \frac{I_{M2}}{q_2} = 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,107 \cdot 108}{0,352} = 0,77 \text{ Ом,}$$

$$r_K = r_1 + r_2 (\omega_1 / \omega_2)^2 = 3,55 + 0,77 (274 / 108)^2 = 8,5 \text{ Ом.}$$

13. Из (32) - (35) определяем величины $u, u_n, u_p, \Delta u$

$$u_n = (I r_K / U_1) \cdot 100 = (0,645 \cdot 8,5 / 115) \cdot 100 = 4,75\%,$$

$$I = (I_1 + I_2) / 2 = (0,083 + 0,107) / 2 = 0,095 \text{ А,}$$

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2}{2}\right)^2 + (I_0 \omega_1)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,645 \cdot 274 + 1,5 \cdot 108}{2}\right)^2 + (0,184 \cdot 274)^2} = 173 \text{ А,}$$

$$\delta' = \delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} = 0,3 + \frac{3,52 + 3,45}{3} = 2,62 \text{ н.н.}$$

$$u_p = \frac{180 \text{ А/ВТ} \cdot \delta'}{v B Q_c h_{\text{м}}} \cdot 10^3 = \frac{180 \cdot 173 \cdot 0,6095 \cdot 2,62}{1 \cdot 1,4 \cdot 1,68 \cdot 25 \cdot 10^2} = 1,4\%,$$

$$u_n = \sqrt{u_n^2 + u_p^2} = \sqrt{4,75^2 + 1,4^2} = 4,95\%.$$

При активной нагрузке $\cos \varphi_2 = 1$ и $\Delta u = u_p = 4,75\%$.

14. Из (1.36) определяем температуру перегрева:

$$Q_K = 2 h_{\text{в}} [a + \pi(c-4)] \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 25 [2 + \pi(12-4)] \cdot 10^{-6} = 1,85 \cdot 10^{-3},$$

$$Q_C = 2[(C + H)b + (C + h)a + \pi b] \cdot 10^{-6} =$$

$$= 2[(48 + 42) \cdot 16 + (48 + 30) \cdot 12 + 30 \cdot 16] \cdot 10^{-6} = 5,112 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$Q_{\text{охла}} = Q_K + Q_C = (1,85 + 5,112) \cdot 10^{-3} = 0,696 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2,$$

$$\Delta T = \frac{P_{CT} + P_M}{\alpha_r Q_{\text{охла}}} = \frac{3,5 + 3,3}{13 \cdot 0,7 \cdot 10^{-2}} = 74^\circ \text{ С.}$$