

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования
**«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени акад. С.П. КОРОЛЕВА»**

РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ РЭС

Методические указания

САМАРА 2007

Составители: Пияков А.В., Пияков И.В.

УДК 621.382-71

Расчет маломощных трансформаторов питания для РЭС: Метод. Указания к практическим занятиям / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. Пияков А.В., Пияков И.В., Самара, 2007. 28с.

Приводятся краткие теоретические основы по трансформаторам. Дается порядок расчёта маломощных трансформаторов питания, тепловой расчёт. Имеются приложения стандартных рядов некоторых магнитопроводов и проводов, а также вариантов заданий для самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности 210201 – Конструирование и технология радиоэлектронных средств и выполняющих лабораторные работы по дисциплине “Основы проектирования электронных средств”. Разработаны на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензент: Н.Д. Семкин.

Содержание.

1.	Основные определения.....	3
2.	Классификация трансформаторов и дросселей.....	4
3.	Основные теоретические положения.....	5
4.	Методика расчёта трансформаторов питания малой мощности.....	8
5.	Расчёт тепловых режимов трансформаторов.....	14
6.	Приложения.....	19
7.	Варианты заданий.....	23
8.	Список использованной литературы.....	24

1. Основные определения.

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий электрическую энергию переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию также переменного тока. Но с иными параметрами.

Основным назначением трансформатора является преобразование переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины. Трансформаторы могут быть использованы также для преобразования числа фаз, частоты и формы кривой напряжения и для некоторых других целей.

В устройствах электропитания трансформаторы применяются в основном для преобразования напряжения источника переменного тока до величины, обеспечивающей получение требуемого значения выпрямленного напряжения, а также для преобразования числа фаз.

Трансформаторы не имеют движущихся частей, поэтому их относят не к электрическим машинам, а аппаратам. В конструкторском отношении трансформатор состоит из одной, а при трёхфазном токе - из нескольких магнитных цепей, сцеплённых с одной или несколькими обмотками. Во всех этих обмотках индуцируется напряжение, которое приблизительно пропорционально количеству витков обмотки. Магнитная цепь трансформатора подвергается переменному намагничиванию, поэтому она выполняется из листовой стали. Для уменьшения потерь в стали применяются высоколегированные стальные листы толщиной порядка 0,35 мм с малыми удельными потерями. Для крупных трансформаторов применяют листовую сталь с ориентированной структурой. Только у самых малых трансформаторов магнитная цепь выполняется из цельных листов. Обычно же цепь выполняется, с учётом размеров, а также монтажа обмотки, из нескольких частей. При сборке они образуют несколько соединительных стыков. Листы сжимаются и крепятся с помощью немагнитных нажимных плит. Окружённую обмоткой часть магнитной цепи называют сердечником или стержнем, а остальную часть ярмом. При монтаже трансформатора сначала с сердечниками соединяется одно ярмо, затем на сердечнике устанавливаются обмотки и после этого монтируется второе ярмо. Трёхфазный трансформатор имеет три сердечника. В очень больших трансформаторах, наряду с сердечниками и обмотками, иногда предусматриваются ещё два сердечника без обмоток и с вдвое меньшим сечением. Благодаря этому получается некоторый выигрыш в отношении конструктивной высоты, что очень важно при транспортировке.

Неотъемлемой частью любого трансформатора являются обмотки. Различают два принципиальных типа обмоток: цилиндрическую (Рисунок 1) и дисковую (Рисунок 2).

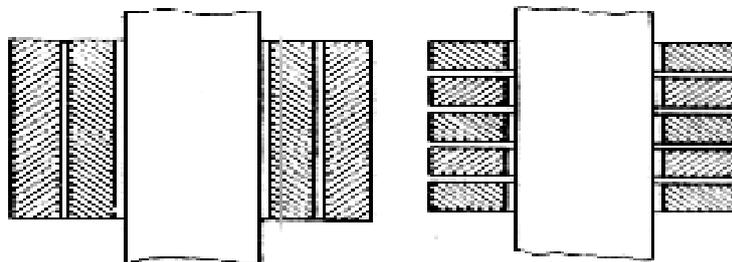


Рисунок 1 - Цилиндрическая обмотка. Рисунок 2 - Дисковая обмотка.

В первом случае обе обмотки образуют концентрические цилиндры, а во втором случае обе обмотки состоят из нескольких дисков, которые относятся попеременно то к одной то к другой обмотке. Цилиндрическая обмотка требует меньше места для изоляции, но имеет большее рассеивание, а вместе с тем и большее падение напряжения, чем дисковая обмотка. Обмотки крупных трансформаторов при коротком замыкании

подвергаются действию достаточно больших усилий, поэтому механическое крепление обмоток является очень важным вопросом.

Магнитные обмотки и сердечники больших силовых трансформаторов, вследствие их нагрева, помещаются в масляные баки. Масло является не только хорошим изолятором, но и теплоносителем. Для того чтобы улучшить отвод тепла стенки бака делают из волнистой листовой стали или бак устанавливается на боковые охладители. У крупногабаритных силовых трансформаторов собственное охлаждение становится недостаточным, поэтому приходится применять искусственные охладители. Наряду с водяным охлаждением применяют также воздушное охлаждение.

Основными параметрами трансформатора являются:

- электромагнитная мощность;
- полная отдаваемая мощность;
- полная потребляемая мощность;
- потери в энергии;
- коэффициент полезного действия (КПД);
- коэффициент мощности.

Электромагнитной мощностью трансформатора называется мощность, передаваемая из первичной обмотки во вторичную электромагнитным путём.

Полной отдаваемой мощностью трансформатора называется произведение действующих значений напряжений вторичной обмотки на величину протекающего по ней тока (тока нагрузки).

Полной потребляемой мощностью трансформатора называется произведение действующего значения на зажимах первичной обмотки на величину тока, потребляемого трансформатором от сети.

Потери энергии в трансформаторе могут быть подразделены на активные (потери на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе и потери в активных сопротивлениях обмоток) и реактивные (потери на создание магнитного поля в магнитопроводе и реактивных сопротивлениях обмоток).

Коэффициент полезного действия – это отношение активной мощности, отдаваемой нагрузке, к полной активной мощности, потребляемой трансформатором от сети.

Коэффициент мощности – это отношение активной мощности, потребляемой трансформатором от сети, к полной потребляемой мощности.

2. Классификация трансформаторов

По количеству обмоток различают:

- автотрансформаторы;
- двухобмоточные трансформаторы;
- многообмоточные трансформаторы.

Автотрансформатором называется трансформатор, имеющий только одну обмотку. Эта единственная обмотка имеет отвод. В таком трансформаторе часть обмотки выполняет роль как первичной, так и вторичной обмотки. За счёт этого получается экономия в меди, но автотрансформатор не может гальванически развязать цепи. Автотрансформаторы применяются лишь при небольших коэффициентах трансформации.

Двухобмоточные трансформаторы по напряжению первичной и вторичной обмоток делятся на понижающие, у которых напряжение вторичной обмотки ниже напряжения первичной обмотки, и повышающие, у которых напряжение вторичной обмотки выше напряжения первичной обмотки.

Многообмоточные трансформаторы имеют одну первичную и несколько вторичных обмоток. Достоинством таких трансформаторов является использование одного

магнитопровода для получения нескольких напряжений. Основной недостаток таких трансформаторов – это взаимное влияние вторичных обмоток друг на друга, т.е. при изменении тока в одной обмотке изменяется ток (а вместе с ним и падение напряжения) в первичной обмотке, что влечёт за собой изменения напряжений и токов в всех остальных вторичных обмотках.

В зависимости от преобразуемого тока трансформаторы делятся на однофазные и трёхфазные.

По конструкторскому исполнению трансформаторы делятся на: броневые, стержневые, тороидальные и кабельные.

В зависимости от напряжений первичной и вторичной обмоток трансформаторы делятся на: понижающие (напряжение вторичной обмотки меньше напряжения вторичной обмотки) и повышающие (напряжение первичной обмотки меньше напряжения вторичной обмотки).

3. Основные теоретические положения.

Трансформатор, принципиальная схема которого приведена на рисунке 3, состоит из магнитопровода и обмоток. Обмотка провода, подключаемая к источнику питания, называется первичной, остальные обмотки - вторичные.

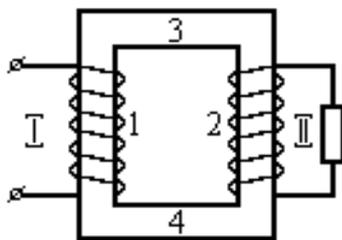


Рисунок 3 - Схема простейшего трансформатора.

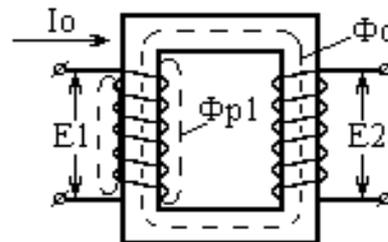


Рисунок 4 - Холостой ход трансформатора.

Предположим, что вторичная обмотка трансформатора разомкнута (рисунок 4). Это будет соответствовать режиму работы, называемому холостым ходом. При подключении первичной обмотки к источнику электрической энергии с напряжением U_1 через первичную обмотку трансформатора потечёт переменный ток I_0 , который называют током холостого хода. Этот ток возбуждает в магнитопроводе трансформатора магнитный поток Φ_0 , который, замыкаясь через магнитопровод, пронизывает витки первичной и вторичной обмоток. В результате этого в обеих обмотках индуцируется ЭДС, действующее значение которых при синусоидальной форме кривой питающего напряжения равны:

- для первичной обмотки - $E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_{\text{макс}}$; (1)

- для вторичной обмотки - $E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{\text{макс}}$; (2)

где f - частота источника переменного тока;

w_1 - число витков в первичной обмотке;

w_2 - число витков во вторичной обмотке;

$\Phi_{\text{макс}}$ - амплитуда магнитного потока.

Разделив выражение (1) на выражение (2) получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_T;$$

где k - коэффициент трансформации.

В реальном трансформаторе ток холостого хода состоит из двух составляющих: активной и реактивной. Активная составляющая тока холостого хода обусловлена потерями энергии на вихревые токи и на циклическое перемагничивание - гистерезис.

Явление гистерезиса обусловлено внутренней структурой ферромагнитного материала. Петля гистерезиса не только характеризует работу гистерезиса, но и выражает ее величину. На восходящей ветви кривой материалу сообщается работа (энергия), которая, однако, на нисходящей ветви отдается обратно не полностью. Затраченная работа равна площади петли гистерезиса. Ее величина на единицу объема (м^3) при циклическом перемагничивании составляет:

$$V_H = \int HdB \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{см}}{\text{м}^3} \right];$$

Эта энергия не зависит от формы тела, т. е. толщины листов, и от изменения напряженности поля во времени, т. е. быстрого или медленного нарастания и ослабления. При циклическом перемагничивании работа гистерезиса приводится в зависимость от предельных величин индукции. В этом случае энергия будет независима от промежуточных значений индукции лишь при условии, что между предельными значениями индукция изменяется плавно в одном направлении.

Энергия, выражаемая уравнением, выделяется при однократном перемагничивании. При многократном перемагничивании она пропорциональна числу перемагничиваний. Энергия зависит от материала, а при циклическом перемагничивании — от предельных величин индукции.

При перемагничивании в пределах между $+B$ и $-B$ энергию в единице объема можно выразить уравнением:

$$V_H = \varepsilon \cdot f \cdot \varphi(B) \quad (3)$$

где ε — коэффициент, зависящий от свойств материала, который для данного материала принимается за постоянную величину;
 f — частота.

Зависимость от индукции т.е. $\varphi(B)$, очень сложна. Измерения, произведенные Брейлсфордом (Brailsford) и Бредшоу (Bradshaw), показали, что вначале эта функция быстро увеличивается вместе с индукцией, а затем стремится к постоянной величине (рисунок 5). Последнее, однако, соответствует очень высоким индукциям, которые на практике применяются крайне редко, например в зубцах якоря машин постоянного тока.

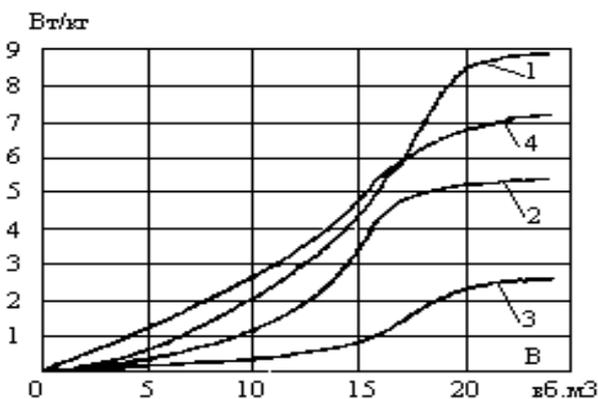


Рисунок 5 – Потери на гистерезисе при перемагничивании с частотой 50 Гц для различных материалов.

- 1 - низколегированная горячекатаная листовая сталь толщиной 0,487 мм.
(Si-0,5 %; $s = 7,85$; $\rho = 0,15$);
- 2 - высоколегированная горячекатаная листовая сталь толщиной 0,37 мм.
(Si-0,4 %; $s = 7,55$; $\rho = 0,55$);
- 3 - высоколегированная холоднокатаная листовая сталь толщиной 0,34 мм.;
- 4 - железо-кобальто-вандиевый сплав толщиной 0,23 мм.

Для практически наиболее важного диапазона индукции от 1,0 до 1,6 вБ/м² характерна квадратичная зависимость потерь от индукции, так что уравнение (3) можно записать в следующей форме:

$$V_H \approx \varepsilon \frac{f}{50} B^2 \quad [\text{Вт.кг}];$$

Реактивная (намагничивающая) составляющая тока холостого хода создаёт в сердечнике трансформатора магнитный поток. При прохождении тока (его реактивной составляющей) по первичной обмотке создаётся не только основной магнитный поток (Φ_0 на рисунке 4), но и магнитный поток рассеяния (Φ_{p1} на рисунке 4), замыкающийся в основном по воздуху. Этот поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС рассеяния. При холостом ходе можно без существенной погрешности пренебречь величинами активного и реактивного падений напряжений по сравнению с величиной ЭДС. Поэтому коэффициент трансформации можно с достаточной степенью точности определять как отношение напряжений обмоток при холостом ходе.

Если к первичной обмотке трансформатора подвести напряжение U_1 , а вторичную обмотку соединить с нагрузкой, то в первичной и во вторичной обмотках появятся токи I_1 и I_2 ; (рисунок 6), а в его магнитопроводе — магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . Так как причиной появления потока Φ_2 является поток Φ_1 то оба потока на основании закона Ленца направлены встречно.

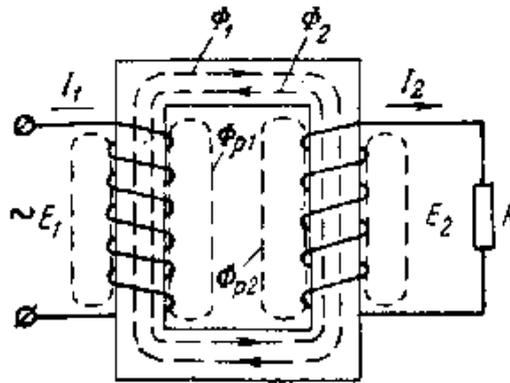


Рисунок 6 - Работа трансформатора под нагрузкой.

При увеличении тока нагрузки I_2 поток Φ_2 увеличивается, а суммарный магнитный поток в магнитопроводе $\Phi_1 - \Phi_2$ уменьшается. Вследствие этого индуцированные суммарным магнитным потоком ЭДС E_1 и E_2 уменьшаются. Уменьшение E_1 вызывает увеличение тока первичной обмотки I_1 и потока Φ_1 , а также суммарного магнитного потока $\Phi_1 - \Phi_2$. Уменьшение E_2 уменьшает величину тока I_2 и потока Φ_2 и поэтому приводит к увеличению суммарного потока.

Таким образом, изменения суммарного магнитного потока, вызванные увеличением тока I_2 , взаимно компенсируются, в результате чего суммарный магнитный поток остается практически неизменным при увеличении нагрузки.

Совершенно очевидно, что и при постепенном уменьшении тока до нуля суммарный поток остается неизменным. Отсюда следует, что суммарный поток равен потоку при холостом ходе трансформатора. Величину тока I_1 можно найти на основе закона сохранения энергии. Если пренебречь потерями мощности в обмотках и в магнитопроводе, то мощность первичной обмотки равна мощности вторичной обмотки. Магнитный поток в сердечнике трансформатора остается неизменным при различных значениях тока нагрузки. Поэтому не изменяется и магнитодвижущая сила (МДС), создающая этот поток. На основании этого:

$$(AW)_0 = (AW)_H,$$

где $(AW)_0$ — ампер-витки холостого хода;

$(AW)_H$ — ампер-витки нагруженного трансформатора.

4. Методика расчёта трансформаторов питания малой мощности.

В этом разделе излагается методика расчёта выпрямительных трансформаторов малой мощности (до 1000 Вт при частоте сети 50 Гц и до 2500 Вт при частоте сети 400 Гц) при напряжении вторичных обмоток не более 1000 В.

Данными для расчёта трансформатора являются:

- Частота тока питающей сети;
- Номинальные напряжения первичной и вторичных обмоток;
- Номинальные токи вторичных обмоток;
- Типовая мощность трансформатора.

Расчёт ведётся в следующем порядке:

4.1. По заданной величине типовой мощности $P_{\text{тип}}$ из таблицы 1 находим ориентировочные значения магнитной индукции B , плотности тока δ , коэффициента заполнения обмотки медью k_M , коэффициента заполнения сечения магнитопровода сталью $k_{\text{ст}}$ и коэффициента полезного действия (КПД) η .

Таблица 1 – Ориентировочные значения B , δ , k_M и η .

Частота f , Гц	Конфигурация магнитопровода	Марка стали и её толщина, мм	$k_{\text{ст}}$	Типовая мощность трансформатора $P_{\text{тип}}$, Вт					
				15-50	50-150	150-300	300-1000	1000-2500	
50	Бронева (пластинчатая)	Э-42 0,35	0,94	B , тл	1,3	1,3-1,35	1,35	1,35-1,2	-
				δ , а/мм ²	5-3,8	3,8-1,9	1,9-1,3	1,3-1,1	-
				k_M	0,22-0,28	0,28-0,34	0,34-0,36	0,36-0,38	-
				η	0,5-0,8	0,8-0,9	0,9-0,93	0,93-0,95	-
400	Бронева (ленточная)	Э-320 0,15	0,85	B , тл	1,6	1,6-1,45	1,45-1,20	1,2-0,95	0,95-0,8
				δ , а/мм ²	6-4,5	4,5-3,5	3,5-2,5	2,5-1,5	1,5-1,2
				k_M	0,21-0,25	0,25-0,28	0,28-0,30	0,30-0,37	0,37-0,38
				η	0,87	0,87-0,94	0,94-0,96	0,96-0,97	0,97

4.2. Определим величину произведения сечения сердечника на сечение окна магнитопровода по формуле:

$$S_{\text{ст}} S_{\text{ок}} = \frac{P_{\text{тип}} \cdot 10^2}{1,11 \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) f \cdot B \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_M}$$

где $P_{\text{тип}}$ - типовая мощность трансформатора;

η - коэффициент полезного действия;

f - частота питающей сети;

B - значение индукции магнитного поля;

$k_{\text{ст}}$ - коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью;

k_M - коэффициент заполнения обмотки медью.

4.3. По величине $S_{\text{ст}} S_{\text{ок}}$ и пользуясь данными таблиц приложений 1 и 2, выбираем магнитопровод.

Для дальнейшего расчета в этих таблицах понадобятся следующие данные:

- Активное сечение стали ($S_{\text{ст}}$);

- Вес сердечника ($G_{ст}$);
- Ширина сердечного стержня (a);
- Ширина окна (b);
- Высота окна (h).

На рисунках 12 и 13 представлены конструкции броневых пластинчатого и броневых ленточного магнитопроводов.

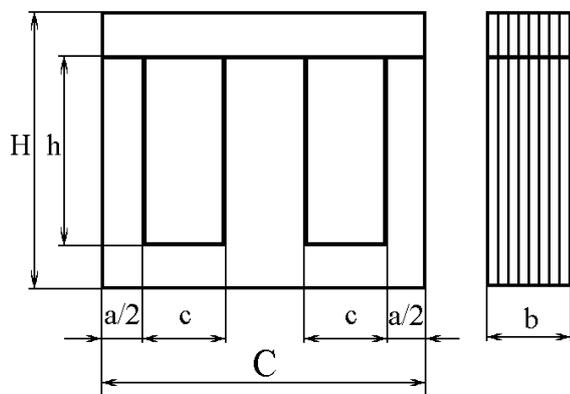


Рисунок 12 – конструкция броневых пластинчатого магнитопровода.

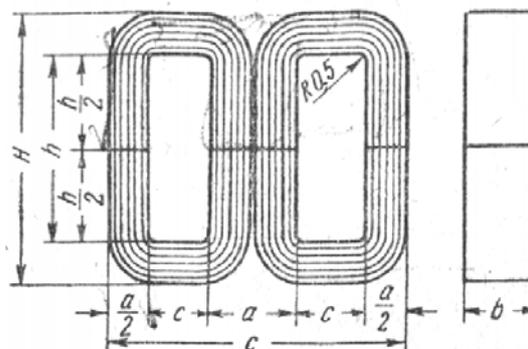


Рисунок 13 – конструкция броневых ленточного магнитопровод

4.4. По величине магнитной индукции B и по данным таблицы 2 определим полные потери в стали по формуле:

$$P_{ст} = p_{ст} G_{ст}, \text{ Вт};$$

где $P_{ст}$ - полные потери в стали;

$p_{ст}$ - удельные потери в стали (находятся из таблицы 2);

$G_{ст}$ - вес сердечника.

Таблица 2 - Удельные потери в стали и удельная намагничивающая мощность.

Частота Гц	Марка стали и её толщина, мм.		Магнитная индукция B , Тл								
			0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
50	Э-42 0,35	$p_{ст}$, Вт/кг	0,90	1,15	1,47	1,85	2,4	3,2	4,5	-	-
		$q_{ст}$, ва/кг	5	7,5	10	15	22,5	35	65	-	-
400	Э-320 0,15	$p_{ст}$, Вт/кг	4,25	6,3	8,0	10	12	14,2	16,5	20	24
		$q_{ст}$, ва/кг	22	36	48	68	90	118	114	180	220

4.5. Находим активную составляющую тока холостого хода по формуле:

$$I_{оа} = \frac{P_{ст}}{U_1};$$

где $I_{оа}$ - активная составляющая тока холостого хода;

$P_{ст}$ - полные потери в стали;

U_1 - напряжение первичной обмотки.

4.6. По величине магнитной индукции B и по данным таблицы 2 определим полную намагничивающую мощность сердечника по формуле:

$$Q_{ст} = q_{ст} G_{ст};$$

где $Q_{ст}$ - полная намагничивающая мощность сердечника;

$q_{ст}$ - удельная намагничивающая мощность сердечника (находятся из таблицы 2);
 $G_{ст}$ - вес сердечника.

4.7. Находим реактивную составляющую тока холостого хода по формуле:

$$I_{ор} = \frac{Q_{ст}}{U_1};$$

где $I_{ор}$ - реактивная составляющая тока холостого хода;
 $Q_{ст}$ - полная намагничивающая мощность сердечника;
 U_1 - напряжение первичной обмотки.

4.8. Находим ток холостого хода по формуле:

где I_0 - ток холостого тока;

$$I_0 = \sqrt{I_{оа}^2 + I_{ор}^2};$$

$I_{оа}$ - активная составляющая тока холостого хода;
 $I_{ор}$ - реактивная составляющая тока холостого хода.

4.9. Находим относительное значение тока холостого хода по формуле:

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\%;$$

где $I_{0\%}$ - относительное значение тока холостого хода;
 I_0 - ток холостого тока;
 I_1 - ток в первичной обмотке.

Если величина $I_{0\%}$ при частоте $f = 50$ Гц лежит в пределах $30 \div 50\%$, при частоте $f = 400$ Гц - в пределах $5 \div 15\%$, то выбор магнитопровода на этой стадии расчёта можно считать окончанным. Если $I_{0\%}$ превышает указанные выше верхние пределы, то следует уменьшать индукцию в сердечнике; при $I_{0\%}$ меньшем нижних пределов, индукцию следует увеличивать.

4.10. Определим число витков в обмотках по формулам:

$$w_1 = \frac{U_1 \left(1 + \frac{\Delta U_1\%}{100}\right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{cm}};$$

$$w_2 = \frac{U_2 \left(1 + \frac{\Delta U_2\%}{100}\right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{cm}};$$

где w_1, w_2 - число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно;
 $\Delta U_1\%, \Delta U_2\%$ - относительные падения напряжения в обмотках (находятся по таблице 3).

Таблица 3 – Относительные падения напряжения в обмотках.

Частота, Гц		Типовая мощность $P_{тип}$, Вт				
		15 ÷ 50	50 ÷ 150	150 ÷ 300	300 ÷ 1000	1000 ÷ 2500
50	$\Delta U_1\%$	15 ÷ 5	5 ÷ 4	4 ÷ 3	3 ÷ 1	-
	$\Delta U_2\%$	20 ÷ 10	10 ÷ 8	8 ÷ 6	6 ÷ 2	-
400	$\Delta U_1\%$	8 ÷ 4	4 ÷ 1,5	1,5 ÷ 1	1 ÷ 0,5	0,5
	$\Delta U_2\%$	10 ÷ 5	5 ÷ 2	2 ÷ 1,2	1,2 ÷ 0,5	0,5

4.11. Находим сечение проводов обмоток по формуле:

$$S_{пр} = \frac{I}{\delta};$$

где $S_{\text{пр}}$ - сечение провода обмотки;

I - ток обмотки;

δ - плотность тока в обмотке (определяется по таблице 1).

4.12. Выбираем стандартные сечения и диаметры проводов по данным приложения 3, после чего уточняем фактические плотности тока по формуле:

$$\delta = \frac{I}{S_{\text{пр}}};$$

где $S_{\text{пр}}$ - сечение провода обмотки;

I - ток обмотки;

δ - плотность тока в обмотке (определяется по таблице 1).

4.13. Находим допустимую осевую длину обмотки по формуле:

$$h_{\text{д}} \approx h - 5, \text{ мм};$$

где $h_{\text{д}}$ - осевая длина обмотки;

h - высота окна магнитопровода.

4.14. Определяем число витков в одном слое и число слоёв каждой обмотки по формулам:

$$w_{\text{с}} = \frac{h_{\text{д}}}{k_{\text{у}} d_{\text{из}}}; \quad N = \frac{w}{w_{\text{с}}};$$

где $w_{\text{с}}$ - число витков в одном слое;

$h_{\text{д}}$ - осевая длина обмотки;

$k_{\text{у}}$ - коэффициент укладки, примерно равный $1,07 \div 1,15$
(в зависимости от диаметра провода).

$d_{\text{из}}$ - диаметр изолированного провода;

N - число слоёв в обмотке;

w - число витков в обмотке.

4.15. Выбираем междуслоевую и междуобмоточную изоляцию.

В качестве междуслоевой изоляции рекомендуется выбирать:

- при проводах диаметром менее 0,1 мм - конденсаторную бумагу толщиной 0,01 мм,
- при проводах диаметром 0,1 ÷ 0,5 мм - телефонную бумагу толщиной 0,05 мм,
- при проводах диаметром более 0,5 мм - кабельную бумагу толщиной 0,12 мм.

В качестве междуобмоточной изоляции при напряжениях до 1000 В можно использовать различные марки изоляционной бумаги, намотанной в несколько слоёв. Общую толщину этой изоляции можно принимать равной 0,2 ÷ 0,3 мм.

4.16. Находим радиальный размер каждой обмотки по формуле:

$$\alpha_n = k_{\text{у}} \cdot N \cdot d_{\text{из}} + (N - 1)\Delta_{\text{из}};$$

где $\Delta_{\text{из}}$ - толщина междуслоевой изоляции;

n - номер обмотки.

4.17. Находим радиальный размер катушки, то есть её толщину, по формуле:

$$\alpha = \Delta_{\text{з}} + \Delta_{\text{к}} + \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_{1i});$$

- где Δ_3 - зазор между внутренней частью каркаса (гильзы) и сердечником ($\Delta_3 = 0,5$ мм).
 Δ_k - толщина каркаса ($\Delta_k \approx 1 \div 2$ мм.)
 α_i - радиальные размеры каждой обмотки;
 α_{1i} - толщины междуобмоточной изоляции ($\alpha_{1i} \approx 0,2 \div 0,3$ мм.; $\alpha_{1n} \approx 0,2 \div 0,3$ мм. – толщина верхнего слоя изоляции катушки);
 n - количество обмоток.

4.18. Проверим зазор между катушкой и сердечником $c - \alpha$. Катушка нормально размещается в окне сердечника, если $c - \alpha \geq 2 \div 4$ мм. в зависимости от мощности трансформатора. Если полученный размер меньше, чем 2 мм, то следует либо увеличить индукцию, либо подобрать провода меньших диаметров.

4.19. Определим среднюю длину витков каждой обмотки по формуле:

$$l_{\text{ср.в}} = 2 \cdot 10^{-3} (a_k + b_k + \pi r), \text{ [м]};$$

где a_k, b_k - внутренние размеры катушки (см. рисунок 8);

r - верхний радиус предыдущей обмотки

($r_1 = \alpha_1/2$; $r_2 = \alpha_1 + \alpha_{12} + \alpha_2/2$; $r_3 = \alpha_1 + \alpha_{12} + \alpha_2 + \alpha_{23} + \alpha_3/2 \dots$ и т.д.).

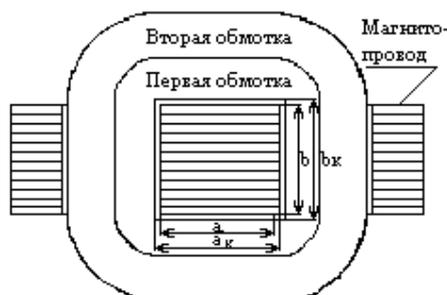


Рисунок 8 – Размещение катушки на магнитопроводе.

4.20. Определим вес меди каждой обмотки по формуле:

$$G_M = l_{\text{ср.в}} \cdot w \cdot g_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}, \text{ [кг]};$$

где w - общее число витков в обмотке;

$l_{\text{ср.в}}$ - средняя длина витка;

$g_{\text{пр}}$ - вес 1-го метра изолированного провода (см. приложение 3).

4.21. Находим потери в меди каждой обмотки по формуле:

где ρ - температурный коэффициент (находится из таблицы 4);

$$P_M = \rho \cdot \delta \cdot G_M, \text{ [Вт]};$$

δ - плотность тока в обмотке;

G_M - вес меди каждой обмотки.

Таблица 4 - Значения температурного коэффициента.

Температура провода, °С	20	90	105	120	130	155	180	200
Температурный коэффициент $[\rho]$	2,26	2,52	2,65	2,76	2,84	3,02	3,23	3,38

4.22. Найдём суммарные потери в меди катушки по формуле:

$$P_{M\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{mi};$$

где P_{mi} - потери в меди i -ой обмотки.

4.23. Определим поверхность охлаждения катушки по формуле:

$$S_{\text{охл.м}} = 2 \cdot h_{\text{д}} [a_{\text{к}} + \pi \cdot (\alpha - \Delta_{\text{з}} - \Delta_{\text{к}})] \cdot 10^{-6}, [\text{м}];$$

где $h_{\text{д}}$ - осевая длина обмотки;

$\Delta_{\text{з}}$ - зазор между внутренней частью каркаса (гильзы) и сердечником ($\Delta_{\text{з}} = 0,5$ мм.);

$\Delta_{\text{к}}$ - толщина каркаса ($\Delta_{\text{к}} \approx 1 \div 2$ мм.);

α - радиальный размер катушки;

$a_{\text{к}}$ - внутренний размер катушки;

4.24. Определим удельную поверхностную нагрузку катушки по формуле:

$$q_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м}}}{S_{\text{охл.м}}}, [\text{Вт}/\text{м}^2];$$

4.25. По кривым на рисунках 9 и 10 (в зависимости от частоты тока сети) определяют среднюю температуру перегрева катушки $\Delta\tau$.

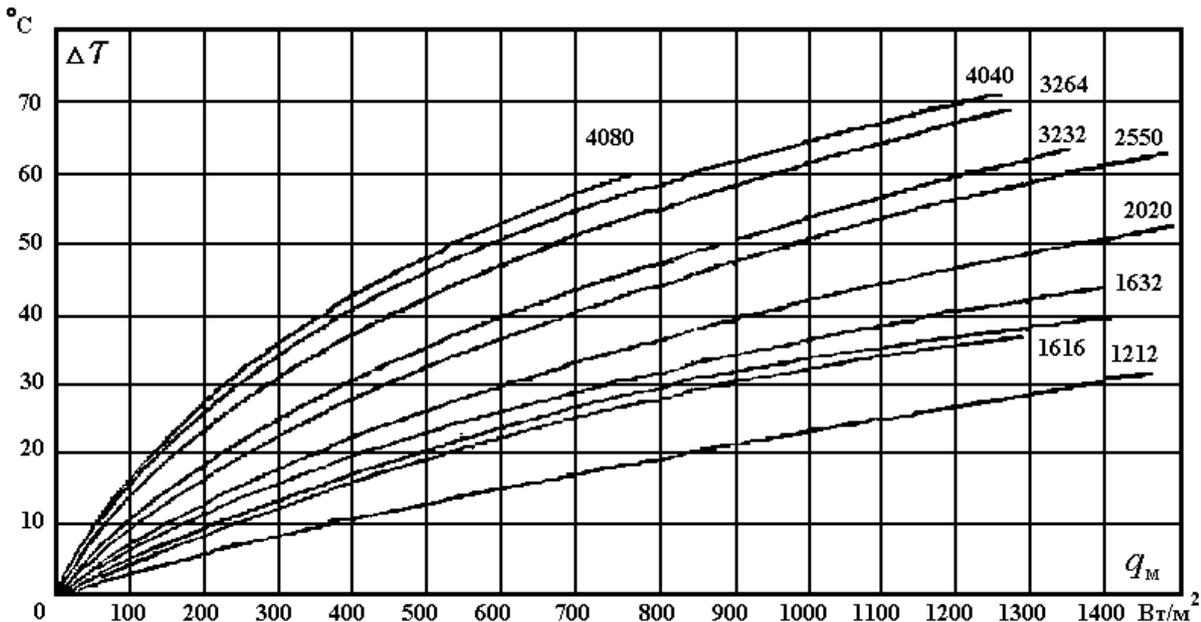


Рисунок 9 - Кривые зависимости температуры перегрева от удельной нагрузки обмоток броневого трансформатора с пластинчатыми сердечниками при частоте тока сети 50 Гц.

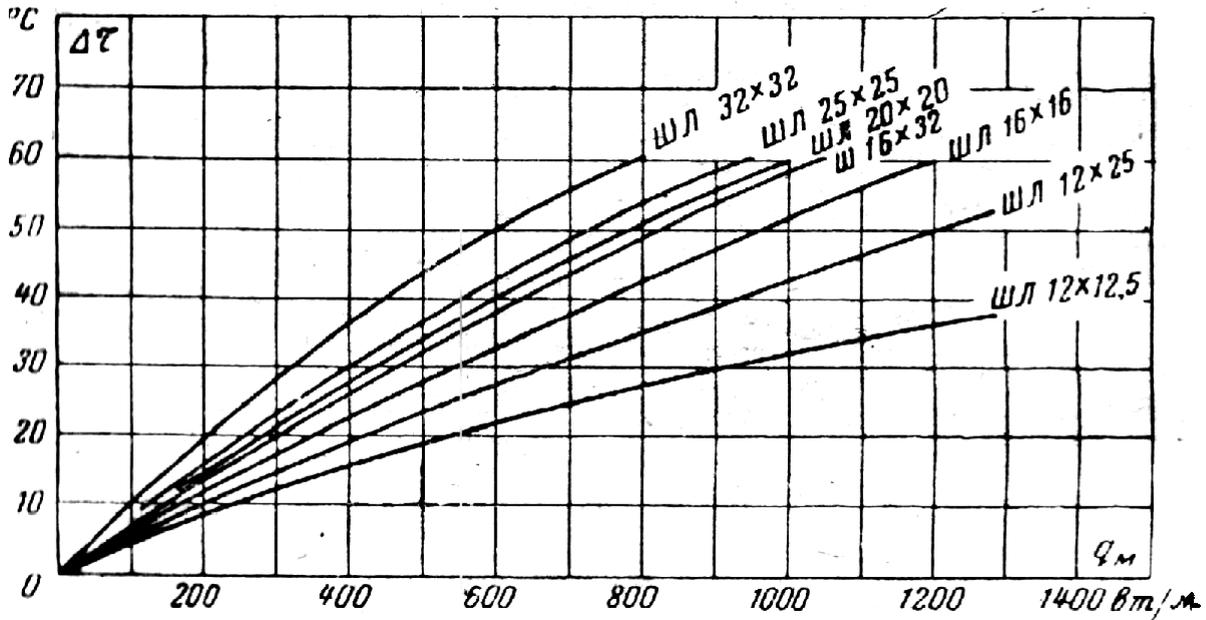


Рисунок 10 - Кривые зависимости температуры перегрева от удельной нагрузки обмоток броневых трансформаторов с ленточными сердечниками при частоте тока сети 400 Гц.

Прибавив к ней заданную температуру окружающей среды, при которой будет работать трансформатор, получим рабочую температуру проводов обмотки. Эта температура не должна превосходить +100 °С для проводов марки ПЭЛ и +105 °С для проводов марки ПЭВ.

4.26. Определим сопротивление каждой обмотки по формуле:

$$r = \frac{2,35 \cdot 10^{-2} \cdot l_{\text{ср.в}} \cdot w}{S_{\text{пр}}}, [\text{Ом}];$$

4.27. Определим фактические падения напряжения в каждой обмотке по формуле:

$$\Delta U = \frac{I \cdot r}{U}, [\%];$$

При значительном расхождении величин ΔU с ранее принятыми следует откорректировать числа витков обмоток.

На этом расчёт трансформатора заканчивается.

5. Расчёт тепловых режимов трансформаторов.

Основными источниками тепла в трансформаторах и дросселях являются потери в обмотке и магнитопроводе, причём потери в магнитопроводе являются внешним источником теплоты по отношению к катушке (обмотке). Соответственно потери в катушке будут внешним источником теплоты по отношению к магнитопроводу. Собственные потери в катушке и магнитопроводе являются источниками теплоты в отношении нагрева этих элементов конструкций.

В зависимости от условий теплообмена с окружающей средой трансформаторы и дроссели могут быть разделены на два типа: Трансформаторы и дроссели, теплообмен которых с окружающей средой осуществляется через обмотку и сердечник, и

трансформаторы и дроссели, магнитопровод (или обмотка) которых полностью закрыт обмоткой (или магнитопроводом) и теплообмен с окружающей средой осуществляется только через обмотку (магнитопровод). К последнему типу относятся элементы тороидальной и кабельной конструкции.

Для расчёта тепловых режимов используется схема замещения трансформатора или дросселя, приведённая на рисунке 11. В ней распределённые тепловые параметры заменены сосредоточенными электромагнитными параметрами.

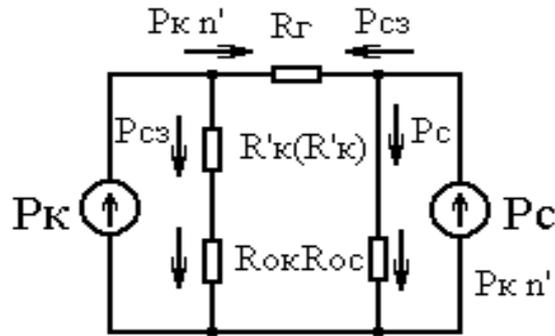


Рисунок 11 - Тепловая схема замещения трансформатора.

Потери в катушке P_k и магнитопроводе P_c представлены как источники тока, параллельно которым включены тепловые сопротивления обмотки R_k (или R'_k для внешнего источника теплоты), тепловые сопротивления “обмотки – окружающая среда” $R_{ок}$ и тепловые сопротивления перехода “окружающая среда - магнитопровод” $R_{ос}$. Тепловой поток от катушки к магнитопроводу (или наоборот) проходит через сопротивление перехода (гильзы) $R_г$. Для тепловой схемы замещения, представленной на рисунке 11, справедливы следующие выражения:

$$n' = \frac{R_k + R_{ок}}{R_{ок} + R'_k + R_г + R_{ос}} \quad s = \frac{R_{ос}}{R_{ос} + R'_н + R_г + R_{ок}}$$

где n' - коэффициент, характеризующий составляющую теплового потока между катушкой и магнитопроводом от потерь в катушке.

s - коэффициент, характеризующий составляющую теплового потока между катушкой и магнитопроводом от потерь в стали.

Теплоой поток между катушкой и магнитопроводом может быть положительным или отрицательным:

$$p_{кс} = P_k \cdot n' - P_c \cdot s = P_k (n' - vs)$$

При положительном $p_{кс}$ часть потерь в катушке отводится в окружающую среду через магнитопровод, а при отрицательном - потери мощности в магнитопроводе отводятся в окружающую среду частично и через поверхность катушки, создавая в катушке дополнительный перепад температур $p_{кс} \cdot R_н$. Максимально нагретая область будет расположена в зоне на границе раздела между катушкой и сердечником.

В тороидальных трансформаторах и дросселях отсутствует теплообмен сердечника непосредственно с окружающей средой, поэтому в тепловой схеме замещения на рисунке 19 можно принять $R_{ос} = \infty$. Тогда $s=1$ и $n'=0$, а весь тепловой поток от сердечника проходит через обмотку, создавая в ней дополнительный перепад температур $P_0 R'_к$.

Максимально нагретая область обмотки будет находиться на границе с сердечником. Для трансформаторов кабельного типа $s=0$ и $n'=1$.

Расчётные зависимости для определения перегрева обмоток по отношению к температуре окружающей среды и коэффициент перепада температур в катушке $k_{пт} = 1 + \Delta T_{кт}/T_{ок}$ приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Формулы для расчёта перегрева трансформаторов.

Параметры	Броневые и стержневые		Тороидальные	Кабельные
	$r_{к.с}$ положительный	$R_{к.с}$ отрицательный		
Перепад температуры в обмотке ΔT_k	$\frac{P_{тр} (1 - n' + vs) \cdot R_k}{1 + v}$	$\frac{P_{тр} (R_k + (vs - n') \cdot R'_k)}{1 + v}$	$\frac{P_{тр} (R_k + v \cdot R'_k)}{1 + v}$	$\frac{P_{тр} \cdot R_k}{1 + v}$
Поверхностное превышение температуры обмотки $\Delta T_{ко}$	$\frac{P_{тр} (1 - n' + vs) \cdot R_{ок}}{1 + v}$	$\frac{P_{тр} (1 - n' + vs) \cdot R_n}{1 + v}$	$P_{тр} \cdot R_{ок}$	$P_{тр} \cdot R_{ос}$
Максимальное превышение температуры в катушке $\Delta T_{к max}$	$\Delta T_{п} \cdot k_{пт}$	$\Delta T_{п} \cdot k_{пт}$	$\Delta T_{п} \cdot k_{пт}$	$\Delta T_{п} \cdot k_{пт}$
Среднее превышение температуры в катушке $\Delta T_{к ср}$	$\frac{P_{тр} (1 - n' + vs) (R_{ок} + R_k / 2)}{1 + v}$	$\frac{P_{тр} (1 - n' + vs) R_{ок}}{4(1 + v)}$	$\frac{P_{тр} [2(1 + v) R_{ок} + R_k + v R'_k]}{2(1 + v)}$	$P_{тр} [R_{ос} + R_k / (1 + v)]$
Коэффициент перепада температуры в катушке $k_{пт}$	$1 + (R_k / R_{ок})$	$\frac{R_k + (vs - n') R'_k}{(1 - n' + vs) \cdot R_{ок}}$	$1 + \frac{(R_k + v \cdot R'_k)}{(1 + v) R_{ок}}$	$1 + \{R_k / [(1 + v) R_{ос}]\}$

Расчёт теплового сопротивления R_k для катушек с внутренним источником теплоты при отводе его через наружную цилиндрическую поверхность, т.е. при отрицательном значении $r_{к.с}$, для броневых, стержневых и тороидальных трансформаторов производится по формуле:

$$R_k = \frac{r_0^2}{4 \cdot \lambda \cdot V_k} \left[\left(\frac{r_k}{r_0} \right)^2 + 2 \cdot \ln \frac{r_0}{r_k} - 1 \right] \approx \frac{R_k}{2}$$

Тепловое сопротивление катушки при положительном значении $r_{к.с}$ находится по формуле:

$$R_k = \frac{r_k^2 - r_{вн}^2}{4 \cdot \lambda \cdot V_k} \left[1 - \frac{2r_1^2}{r_k^2 - r_{вн}^2} \ln \frac{r_n}{r_1} \right]$$

Тепловое сопротивление катушки для потока, идущего со стороны внутренней поверхности находится по формуле:

$$R'_k = \frac{(r_n^2 - r_{вн}^2) \ln \frac{r_n}{r_{вн}}}{2 \cdot \lambda \cdot V_k}$$

Сопротивление на границах “катушка – окружающая” среда, “сердечник – окружающая среда” и “сердечник - катушка” (гильзы) находятся по формулам:

$$r_{вн} = \sqrt{\frac{S_o}{\pi}}; \quad r_n = \sqrt{\frac{S_m + S_o}{\pi}}; \quad r_0 = \sqrt{\frac{r_n^2 - r_{вн}^2}{2 \ln(r_n / r_{вн})}}$$

где Π_k , Π_c и Π_r - поверхности охлаждения катушки, сердечника и гильзы.

Приведённые размеры катушек определяются из выражений:

$$R_{ок} = \frac{1}{\alpha_k \cdot \Pi_k} \quad R_r = \frac{\delta_r}{\lambda \cdot \Pi_r}$$

$$R_{oc} = \frac{1}{\alpha_c \cdot \Pi_c}$$

Для тороидальных трансформаторов $S_m = V_k / l_c$, а для броневых и стержневых $S_m = a_k \cdot l_w$

Коэффициент теплоотдачи α_m может быть представлен как сумма коэффициентов теплоотдачи конвекций α_k и лучеиспускания α_l . Коэффициент теплоотдачи конвекций находится по формуле:

$$\alpha_k = 0,9 \cdot A \left(\frac{T_n - T_c}{h} \right) \sqrt{\frac{H}{H_0}} \cdot 10^{-4}$$

где h - высота конструкций для броневой и стержневой конструкций;

$h = 2r_n$ для тороидальных конструкций;

A - коэффициент зависящий от физических параметров среды (см. рисунок 12);

T_n - температура поверхности катушки

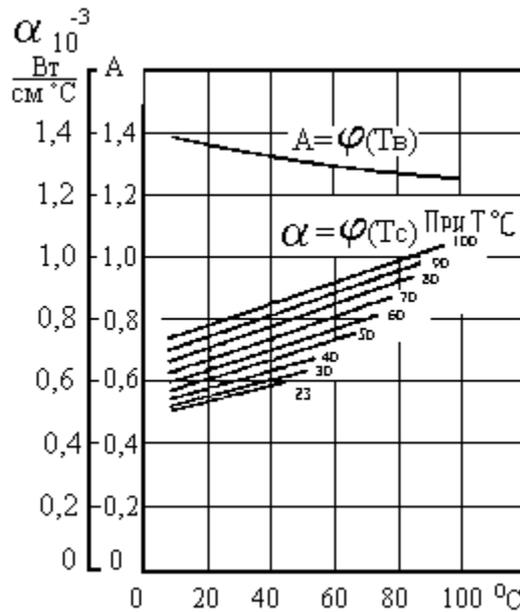


Рисунок 12 - Зависимость коэффициентов A и α от температуры.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспускания находится по формуле:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_r C_0 \left[\left(\frac{T_n + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4}}{T_n - T_c}$$

где ε_r - степень черноты тела;

C_0 - коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела ($C_0 = 5,67$).

Зависимости коэффициента теплоотдачи лучеиспускания от температуры окружающей среды при $T_n = \text{const}$ приведены на рисунке 12.

Расчёт коэффициента теплопроводности производится в следующей последовательности:

1. Определяется средняя условная теплопроводность обмотки без учёта межслоевой изоляции:

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{np}}{0,7 \sqrt{\frac{d_{из} - d}{d}}}$$

где $\lambda_{np} = 2,3 \text{ Вт/см}^{\circ}\text{С}$ - для лаковой изоляции провода.

2. Эквивалентная толщина прослойки между проводами, заполненная воздухом или пропиточным лаком (компаундом) при цилиндрической и дисковой укладке провода равны соответственно:

$$h_{uz.o} = 0,5 \cdot d_{uz} \left[2 - 0,5 \cdot \sqrt{4 - \left(\frac{d}{d_{uz}}\right)^2} - \frac{d_{uz}}{d} \arcsin \frac{d}{d_{uz}} \right]$$

$$h_{uz.u} = 0,5 \cdot d_{uz} \left[2 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{d_{uz}}\right)^2} - \frac{d_{uz}}{d} \arcsin \frac{d}{d_{uz}} \right]$$

Последнее выражение справедливо и для тороидальной обмотке.

3. Проверочный расчёт тепловых режимов.

Перегрев катушки трансформаторов и дросселей броневой и стержневой конструкций определяется по формуле:

$$\Delta T_{\kappa} = \frac{P_c + P_{\kappa}}{\alpha_m \Pi_{\kappa} \left[1 + \frac{\Pi_c}{\Pi_{\kappa}} \sqrt{\frac{\nu + 0,6}{1 + 0,2 \cdot \nu \cdot \Pi_c / \Pi_{\kappa}}} \right]}$$

Перегрев обмотки для тороидальных трансформаторов определяется по формуле:

$$\Delta T_{\kappa} = \frac{P_c + P_{\kappa}}{\alpha_m \Pi_{\kappa}}$$

6. Приложения.

Приложение 1 - Броневые пластинчатые магнитопроводы.

Обозначение магнитопровода	Размеры, мм						Активная площадь сечения среднего стержня, см	Средняя длина силовой магнитной линии, См	Сечение стали X Сечение окна, см ⁴	Активный объём магнитопровода, См ³	Вес магнитопровода, г.	Кол - во пластин, шт.
	a	h	c	C	H	b						
Ш 09 x 09	9	22,5	9	36	31,5	9	0,74	7,72	1,62	5,71	45	23
Ш 09 x 12	9	22,5	9	36	31,5	12	0,98	7,72	2,16	7,56	60	31
Ш 12 x 10	12	30	12	48	42	10	0,98	10,03	4,30	9,82	90	26
Ш 12 x 12	12	30	12	48	42	12	1,31	10,03	5,20	13,14	110	31
Ш 12 x 16	12	30	12	48	42	16	1,75	10,03	6,80	17,55	140	42
Ш 12 x 20	12	30	12	48	42	20	2,18	10,03	8,60	21,86	180	52
Ш 12 x 25	12	30	12	48	42	25	2,73	10,03	10,80	27,38	230	65
Ш 12 x 32	12	30	12	48	42	32	3,49	10,03	13,70	35,00	280	83
Ш 16 x 10	16	40	16	64	56	10	1,31	13,7	10,2	17,97	156	26
Ш 16 x 12	16	40	16	64	56	12	1,75	13,7	12,1	24,0	190	31
Ш 16 x 16	16	40	16	64	56	16	2,33	13,7	16,6	32,0	260	42
Ш 16 x 20	16	40	16	64	56	20	2,91	13,7	20,5	39,6	320	52
Ш 16 x 25	16	40	16	64	56	25	3,64	13,7	25,6	49,8	400	65
Ш 16 x 32	16	40	16	64	56	32	4,66	13,7	32,6	63,8	510	83
Ш 16 x 40	16	40	16	64	56	40	5,82	13,7	41,0	79,6	630	104
Ш 20 x 12	20	50	20	80	70	12	2,18	17,14	24	37,4	300	31
Ш 20 x 16	20	50	20	80	70	16	2,91	17,14	32	50,0	400	42
Ш 20 x 20	20	50	20	80	70	20	3,64	17,14	40	62,4	500	52
Ш 20 x 25	20	50	20	80	70	25	4,55	17,14	50	78,1	620	65
Ш 20 x 32	20	50	20	80	70	32	5,82	17,14	64	99,8	800	83
Ш 20 x 40	20	50	20	80	70	40	7,28	17,14	80	125,0	990	104
Ш 20 x 50	20	50	20	80	70	50	9,10	17,14	100	156,2	1240	130
Ш 25 x 16	25	62,5	25	100	86,5	16	3,64	21,4	62,5	77,9	620	42
Ш 25 x 20	25	62,5	25	100	86,5	20	4,55	21,4	78	97,4	770	52
Ш 25 x 25	25	62,5	25	100	86,5	25	5,68	21,4	97,5	121,8	970	65
Ш 25 x 32	25	62,5	25	100	86,5	32	7,28	21,4	125	156,0	1230	83
Ш 25 x 40	25	62,5	25	100	86,5	40	9,10	21,4	156	195,0	1560	104
Ш 25 x 50	25	62,5	25	100	86,5	50	11,4	21,4	195	244	1930	130
Ш 25 x 64	25	62,5	25	100	86,5	64	14,5	21,4	250	310	2470	166
Ш 32 x 20	32	80	32	128	112	20	5,82	27,4	164	159,5	1270	52
Ш 32 x 25	32	80	32	128	112	25	7,28	27,4	205	199,3	1580	65
Ш 32 x 32	32	80	32	128	112	32	9,32	27,4	261	255,5	2020	83
Ш 32 x 40	32	80	32	128	112	40	11,65	27,4	328	319,0	2530	104
Ш 32 x 50	32	80	32	128	112	50	14,56	27,4	410	399,0	3170	130
Ш 32 x 64	32	80	32	128	112	64	18,63	27,4	522	510,0	4040	166
Ш 32 x 80	32	80	32	128	112	80	23,29	27,4	656	640,0	5070	208
Ш 40 x 25	40	100	40	160	140	25	9,10	34,3	400	312	2470	65
Ш 40 x 32	40	100	40	160	140	32	11,65	34,3	512	400	3160	83
Ш 40 x 40	40	100	40	160	140	40	14,56	34,3	640	500	4950	130
Ш 40 x 50	40	100	40	160	140	50	18,2	34,3	800	625	4950	130
Ш 40 x 65	40	100	40	160	140	64	23,29	34,3	1025	800	6320	166
Ш 40 x 80	40	100	40	160	140	80	29,12	34,3	1280	998	7920	208
Ш 40 x 100	40	100	40	160	140	100	36,40	34,3	1600	1250	9860	260

Примечание. В таблице приведены данные для сердечников из стали Э42 толщиной 0,35 мм.

Приложение 2 - Броневые ленточные магнитопроводы.

Обозначение магнитопровода	Размеры, мм						Активная площадь сечения среднего стержня, см	Средняя длина силовой магнитной линии, См	Сечение стали X Сечение окна, см ⁴	Активный объём магнитопровода, см ³	Вес магнитопровода, г.
	a	h	c	C	H	b					
ШЛ 6 x 6	6	15	6	24	21	6,5	0,32	5,1	0,140	1,64	14
ШЛ 6 x 8	6	15	6	24	21	8	0,40	5,1	0,173	2,04	17
ШЛ 6 x 10	6	15	6	24	21	10	0,50	5,1	0,216	2,55	21
ШЛ 6 x 12,5	6	15	6	24	21	12,5	0,62	5,1	0,270	3,15	26
ШЛ 8 x 8	8	20	8	32	28	8	0,53	6,8	0,41	3,6	31
ШЛ 8 x 10	8	20	8	32	28	10	0,67	6,8	0,51	4,55	38
ШЛ 8 x 12,5	8	20	8	32	28	12,5	0,83	6,8	0,64	5,63	48
ШЛ 8 x 16	8	20	8	32	28	16	1,06	6,8	0,82	7,2	62
ШЛ 10 x 10	10	25	10	40	35	10	0,84	8,5	2,5	7,15	60
ШЛ 10x12,5	10	25	10	40	35	12,5	1,06	8,5	3,12	9,0	75
ШЛ 10 x 16	10	25	10	40	35	16	1,35	8,5	4,0	11,4	96
ШЛ 10 x 20	10	25	10	40	35	20	1,69	8,5	5,0	14,4	120
ШЛ 12x12,5	12	30	12	48	42	12,5	1,28	10,2	5,4	13,1	105
ШЛ 12 x 16	12	30	12	48	42	16	1,64	10,2	6,9	16,8	138
ШЛ 12 x 20	12	30	12	48	42	20	2,05	10,2	8,7	20,9	175
ШЛ 12 x 25	12	30	12	48	42	25	2,56	10,2	10,8	26,2	220
ШЛ 16 x 16	16	40	16	64	56	16	2,20	13,6	16,6	29,9	250
ШЛ 16 x 20	16	40	16	64	56	20	2,75	13,6	20,5	37,4	310
ШЛ 16 x 25	16	40	16	64	56	25	3,44	13,6	25,6	46,7	390
ШЛ 16 x 32	16	40	16	64	56	32	4,40	13,6	32,6	59,9	500
ШЛ 20 x 20	20	50	20	80	70	20	3,47	17,1	40,0		490
ШЛ 20 x 25	20	50	20	80	70	25	4,34	17,1	50,0		610
ШЛ 20 x 32	20	50	20	80	70	32	5,56	17,1	64,0		780
ШЛ 20 x 40	20	50	20	80	70	40	6,95	17,1	80,0		975
ШЛ 25 x 25	25	62,5	25	100	87,5	25	5,44	21,3	98		950
ШЛ 25 x 32	25	62,5	25	100	87,5	32	6,95	21,3	125		1220
ШЛ 25 x 40	25	62,5	25	100	87,5	40	8,69	21,3	156		1520
ШЛ 25 x 50	25	62,5	25	100	87,5	50	10,90	21,3	195		1900
ШЛ 32 x 32	32	80	32	128	112	32	8,96	27,3	261		2000
ШЛ 32 x 40	32	80	32	128	112	40	11,2	27,3	328		2500
ШЛ 32 x 50	32	80	32	128	112	50	14,0	27,3	410		3140
ШЛ 32 x 64	32	80	32	128	112	64	17,9	27,3	523		4000
ШЛ 40 x 40	40	100	40	160	140	40	14,00	34,2	640		3900
ШЛ 40 x 50	40	100	40	160	140	50	17,5	34,2	800		4900
ШЛ 40 x 64	40	100	40	160	140	64	22,4	34,2	1025		6300
ШЛ 40 x 80	40	100	40	160	140	80	28,1	34,2	1280		7900

Примечание. В таблице приведены данные для сердечников из стали Э330 толщиной 0,15 мм.

Приложение 3 – Номинальные данные обмоточных проводов круглого сечения.

Номинальный диаметр проволоки по меди, мм	Сечение проволоки, мм	Вес 1м медной проволоки, г	Диаметр провода с изоляцией, мм			
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПБД
0,03	0,00071	0,0063	0,05	0,045	—	—
0,04	0,00126	0,0112	0,06	0,055	—	—
0,05	0,00196	0,0175	0,065	0,08	—	—
0,06	0,00283	0,0251	0,075	0,085	0,09	—
0,07	0,00385	0,0342	0,084	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	0,120	0,125	0,13	—
0,11	0,00950	0,0845	0,130	0,135	0,14	—
0,12	0,01131	0,101	0,140	0,145	0,15	—
0,13	0,01327	0,118	0,150	0,155	0,16	—
0,14	0,01539	0,137	0,160	0,165	0,17	—
0,15	0,01767	0,157	0,170	0,18	0,19	—
0,16	0,02011	0,179	0,180	0,19	0,20	—
0,17	0,02270	0,202	0,190	0,20	0,21	—
0,18	0,02545	0,226	0,200	0,21	0,22	—
0,19	0,02835	0,252	0,210	0,22	0,23	—
0,20	0,31042	0,279	0,225	0,23	0,24	—
0,21	0,03464	0,308	0,235	0,24	0,25	—
0,23	0,04155	0,369	0,255	0,27	0,28	—
0,25	0,04909	0,436	0,275	0,29	0,30	—
0,27	0,05726	0,509	0,310	0,31	0,32	—
0,29	0,06605	0,587	0,330	0,33	0,34	—
0,31	0,07548	0,671	0,350	0,35	0,36	—
0,33	0,08553	0,760	0,370	0,37	0,38	—
0,35	0,09621	0,855	0,390	0,39	0,41	—
0,38	0,1134	1,010	0,420	0,42	0,44	0,01
0,41	0,1320	1,180	0,450	0,45	0,47	0,64
0,44	0,1521	1,350	0,490	0,48	0,50	0,67
0,47	0,1735	1,540	0,52	0,51	0,53	0,70
0,49	0,1886	1,680	0,54	0,53	0,55	0,72
0,51	0,2043	1,820	0,560	0,56	0,58	0,74
0,53	0,2206	1,960	0,580	0,58	0,60	0,76
0,55	0,2376	2,110	0,600	0,60	0,62	0,78
0,57	0,2552	2,270	0,620	0,62	0,64	0,80
0,59	0,2734	2,430	0,640	0,64	0,66	0,82
0,62	0,3019	2,680	0,670	0,67	0,69	0,85
0,64	0,3217	2,860	0,690	0,69	0,72	0,87
0,67	0,3526	3,130	0,720	0,72	0,75	0,90
0,69	0,3739	3,320	0,740	0,74	0,77	0,92
0,72	0,4072	3,600	0,780	0,77	0,80	0,96
0,74	0,4301	3,820	0,800	0,80	0,83	0,98
0,77	0,4657	4,140	0,830	0,83	0,86	1,01
0,80	0,5027	4,470	0,860	0,86	0,89	1,04
0,83	0,5411	4,810	0,890	0,89	0,92	1,07
0,86	0,5809	5,160	0,920	0,92	0,95	1,10
0,90	0,6362	5,660	0,960	0,96	0,99	1,14
0,93	0,6793	6,04	0,990	0,99	1,02	1,17
0,96	0,7238	6,44	1,020	1,02	1,05	1,20
1,00	0,7854	6,98	1,070	1,08	1,11	1,29
1,04	0,8495	7,55	1,120	1,12	1,15	1,33
1,08	0,9161	8,14	1,160	1,16	1,19	1,37
1,12	0,9852	9,76	1,200	1,20	1,23	1,41
1,16	1,0570	9,40	1,240	1,24	1,27	1,45
1,20	1,1310	10,10	1,280	1,28	1,31	1,49
1,25	1,2270	10,90	1,330	1,33	1,36	1,54
1,30	1,3270	11,80	1,380	1,38	1,41	1,59

Приложение 3 – Номинальные данные обмоточных проводов круглого сечения (продолжение).

Номинальный диаметр проволоки по меди, мм	Сечение проволоки, мм	Вес 1м медной проволоки, г	Диаметр провода с изоляцией, мм			
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПБД
1,35	1,4310	12,70	1,430	1,43	1,46	1,64
1,40	1,5390	13,70	1,480	1,48	1,51	1,69
1,45	1,6510	14,70	1,530	1,53	1,56	1,74
1,50	1,7670	15,70	1,580	1,58	1,61	1,79
1,56	1,9110	17,00	1,640	1,64	1,67	1,86
1,62	2,061	18,30	1,710	1,70	1,73	1,91
1,68	2,217	18,7	1,770	1,76	1,79	1,98
1,74	2,378	21,10	1,830	1,82	1,85	2,04
1,81	2,5730	22,9	1,900	1,90	1,93	2,11
1,88	2,776	24,7	1,970	1,97	2,00	2,18
1,95	2,987	26,5	2,040	2,04	2,07	2,25
2,02	3,205	28,5	2,12	2,11	2,14	2,32
2,10	3,464	30,80	2,200	2,20	2,23	2,40
2,26	4,0120	35,70	2,360	2,36	2,39	2,62
2,44	4,676	41,6	2,540	2,54	2,57	2,80
2,63	5,433	48,30	—	—	—	2,99
2,83	6,290	55,9	—	—	—	3,19
3,05	7,306	65,0	—	—	—	3,42
3,28	8,450	75,1	—	—	—	3,65
3,53	9,787	87,0	—	—	—	3,90
3,80	11,34	101,0	—	—	—	4,17
4,10	13,20	117,0	—	—	—	4,47
4,50	15,90	142,0	—	—	—	4,88
4,80	18,10	161,0	—	—	—	5,18
5,20	21,24	189,0	—	—	—	5,53

7. Варианты заданий

Рассчитать трансформатор со следующими параметрами:

№ варианта	Первичная обмотка	Первая вторичная обмотка		Вторая вторичная обмотка	
	Напряжение, В	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А
1	220	5	1	5	1
2	220	6	1	6	1
3	220	7	1	7	1
4	220	8	0,9	8	0,9
5	220	9	0,9	9	0,9
6	220	10	0,8	10	0,8
7	220	11	0,8	11	0,8
8	220	12	0,7	12	0,7
9	220	13	0,7	13	0,7
10	220	14	0,6	14	0,6
11	220	15	0,6	15	0,6
12	220	16	0,5	16	0,5
13	220	17	0,5	17	0,5
14	220	18	0,4	18	0,4
15	220	19	0,4	19	0,4
16	220	20	0,3	20	0,3
17	220	5	1	20	0,2
18	220	6	1	19	0,3
19	220	7	1	18	0,4
20	220	8	0,9	17	0,5
21	220	9	0,8	16	0,4
22	220	10	0,7	15	0,3
23	220	11	0,6	14	0,3
24	220	12	0,5	13	0,3
25	220	13	0,4	12	0,3
26	220	14	0,3	11	0,3
27	220	15	0,2	10	0,3

Частота сети для всех вариантов 50 Гц.

8.Список использованной литературы.

1. Белопольский И.И. и др. Расчёт трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2 - ое, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973.
2. Свитенко В. Н. Электрорадиоэлементы. Учебное пособие для вузов. – М.: В.Ш., 1987.
3. Дымков А.М. Трансформаторы напряжения. – М.: Энергия, 1975.
4. Мазель К. Б. Трансформаторы электропитания, М.: Энергия, 1982.
5. Шуйский В.П. Расчёт электрических машин, М.: В.Ш., 1969.

Учебное издание

РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ РЭС

Методические указания

Составители: *Пияков Алексей Владимирович*
Пияков Игорь Владимирович

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе,34