



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Приборостроение»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсовой работы
по дисциплине

«Основы проектирования приборов и систем»

Авторы
Цыбрий И.К.,
Сыроватка В.Н.

Ростов-на-Дону, 2014



Аннотация

Методические указания предназначены для студентов направления 200100.62 очной, заочной форм обучения.

Автор

к.т.н., доцент
Цыбрий И.К.,
доцент
Сыроватка В.Н.





Оглавление

1. Принципы построения источников питания приборных устройств.....	4
1.1. Схемы построения источников питания	4
1.2. Выпрямители источников питания	6
1.3. Сглаживающий фильтр выпрямителя	7
1.4. Расчет выпрямителя	10
Проектное задание к разделу 1.	33
Литература к разделу 1.	34

1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

1.1. Схемы построения источников питания

Источники питания предназначены для обеспечения электроэнергией требуемого качества приборных устройств. Представление о входящих в источник питания функциональных элементах дает структурная схема рис. 1.1.

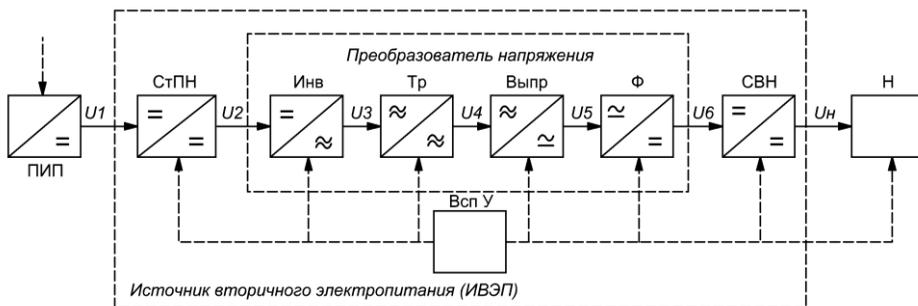


Рис. 1.1 – Структурная схема источника питания

Первичный источник питания (ПИП) представляет собой устройство, в котором вырабатывается электрическая энергия. Он является преобразователем одного вида неэлектрической энергии (механической, тепловой, химической и т.д.) в электрическую. В качестве первичных источников могут использоваться электромашинные генераторы, тепловые генераторы, гальванические элементы и аккумуляторы.

Напряжение на выходе первичного источника во время его работы не остается постоянным. Оно зависит как от подводимой к источнику неэлектрической мощности, так и от потребляемой от источника нагрузкой электрической мощности.

При больших колебаниях напряжения первичного источника в схему часто вводят стабилизатор первичного напряжения (СтПН), в качестве которого могут использоваться стабилизаторы переменного напряжения на магнитных усилителях или входные стабилизаторы постоянного напряжения на транзисторах.

Если первичный источник электропитания является источником постоянного тока, то для преобразования его в переменный, используется инвертор (Инв.). Преобразование постоянного тока в переменный преследует три цели: 1) применить трансфор-



Основы проектирования приборов и систем

матор (Тр) для гальванической развязки выходных звеньев от первичного источника; 2) изменить до удобного значения напряжение, подаваемое на последующие звенья; 3) получить переменное напряжение повышенной частоты, что позволяет выполнить трансформатор с малыми габаритами и массой.

Следующим звеном схемы является выпрямитель (Выпр), превращающий переменное повышенное или пониженное напряжение, полученное на выходе трансформатора, снова в постоянное. В выпрямителе используется свойство односторонней проводимости электрических вентилях, т.е. их способность пропускать ток преимущественно в одном направлении. В приборных устройствах в качестве вентилях чаще всего используют полупроводниковые диоды.

Выпрямитель не создает на своем выходе идеального постоянного напряжения. Помимо постоянной составляющей на его выходе присутствуют гармоники выпрямляемого переменного напряжения, называемые пульсациями. Для снижения пульсаций на выходе выпрямителя обычно включается сглаживающий фильтр (Ф).

Во многих случаях между фильтром и нагрузкой (Н) в схему включают стабилизатор выпрямленного напряжения (СВН), который служит для поддержания постоянства напряжения на выходе независимо от колебания напряжения на входе источника или тока нагрузки. При этом стабилизатор может быть линейным или импульсным. В последнем случае используются специальные микросхемы, которые позволяют повысить КПД стабилизатора.

Помимо названных в состав источника питания входит большое число других элементов и устройств, которые называют вспомогательными (Всп. У). К ним относят схемы включения и выключения, защиты, регулировки, управления и т.д.

Часть элементов схемы рис.5.1 без первичного источника и нагрузки, составляет источник вторичного электропитания (ИВЭП). В составе ИВЭП выделяют группу блоков, называемую преобразователем (конвертором). Преобразователь получает электрическую энергию от источника постоянного тока с одним напряжением, отдает ее в нагрузку под другим напряжением.

Рассмотренная структурная схема представляет один канал источника питания, обеспечивающий только один из номиналов выходного напряжения. Современные источники являются многоканальными, и обеспечивают электропитание по нескольким каналам с различными номиналами напряжения и тока, их пульсациями и стабильностями. В многоканальных источниках часть



блоков может быть общей для всех или части каналов.

По приведенной схеме строится не каждый источник питания. Ряд звеньев может исключаться. Например, в простейшем случае источник может состоять из питаемого от сети трансформатора, выпрямителя и фильтра. При этом, предпочитают использовать выпускаемые промышленностью стандартные компоненты. Если трансформатор и дроссель фильтра не являются покупными узлами, то их собирают на типовых сердечниках с использованием обмоточных проводов.

При проектировании простейшего источника питания решаются следующие основные задачи: 1) выбор оптимальной схемы выпрямителя; 2) определение требований к готовым изделиям, входящим в выпрямитель; 3) расчет исходных данных для проектирования трансформатора.

1.2. Выпрямители источников питания

Схемы выпрямителей классифицируют по числу выпрямленных фаз переменного напряжения. Различают одно-, двух-, трех- и шести – фазные схемы.

В самых простых схемах число выпрямленных фаз совпадает с числом вторичных обмоток трансформатора и числом вентилялей. Такие схемы характеризуются плохим использованием трансформатора при $m > 1$, поэтому обычно применяется многофазная схема с уменьшенным числом обмоток.

Однофазные схемы выпрямителей (рис. 5.2,а) используют для получения высоких напряжений при малых токах нагрузки. Основное достоинство таких схем – простота исполнения. К недостаткам следует отнести значительные составляющие токов обмоток трансформатора по сравнению с током нагрузки, вынужденное подмагничивание сердечника, малая частота пульсаций выпрямленного напряжения и большое их значение, существенное выходное сопротивление выпрямителя и низки к.п.д.

Двухфазные схемы выпрямителей по сравнению с однофазными позволяют получить более высокую частоту пульсаций выпрямленного напряжения при меньшем их значении, чем и объясняется широкое применение двухфазных схем выпрямления. Из них наиболее часто применяются основная и мостовая схемы.

В основной схеме (рис. 5.2,б) две фазы во вторичной обмотке трансформатора получают благодаря выводу ее средней точки. К достоинствам основной схемы следует отнести отсутствие подмагничивания сердечника, в два раза более низкое выходное сопротивление выпрямителя, более рациональное исполь-

Основы проектирования приборов и систем

зование трансформатора при работе на нагрузку индуктивного характера, простота и малые габариты фильтра. Основной недостаток таких схем – необходимость симметрирования обмоток трансформатора. При асимметрии двухфазных схем в выходном напряжении возникают пульсации с частотой сети, и схема лишается основного преимущества – повышенной частоты пульсаций.

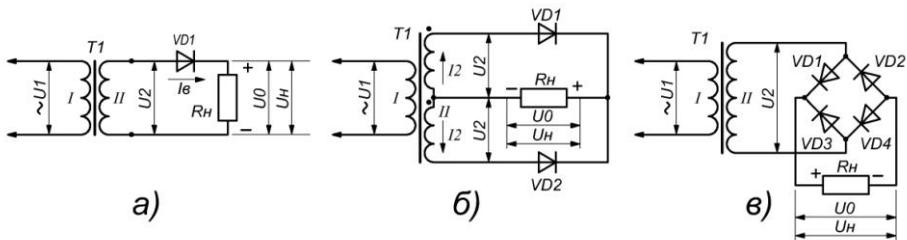


Рис. 1.2 – Схемы выпрямителей

Мостовая схема (рис. 1.2,в) строится на одной вторичной обмотке трансформатора. Помимо достоинств, характерных для основной схемы, мостовая схема позволяет снизить габаритную мощность трансформатора, не требует вывода средней точки вторичной обмотки. К недостаткам мостовых схем относится снижение выпрямленного напряжения и увеличение выходного сопротивления из-за последовательного включения вентиля.

Трехфазные схемы выпрямления работают с относительно сложным трансформатором. Применяют такие схемы при средних и больших мощностях и невысоких требованиях к пульсациям выпрямленного напряжения. Наиболее широкое применение получила схема Ларионова, которая, несмотря на некоторую сложность построения, позволяет получить низкие пульсации выпрямленного напряжения при средних и больших мощностях.

1.3. Сглаживающий фильтр выпрямителя

Для уменьшения переменных составляющих в выходном напряжении между нагрузкой и выпрямителем включаются сглаживающие фильтры. Необходимость в них вызвана тем, что мгновенная мощность переменного тока пульсирует во времени, а мгновенная мощность постоянного тока неизменна. Поэтому, на выходе выпрямителя должен быть элемент, запасаящий избыток мощности, когда она близка к максимальной, и отдающий этот запас в нагрузку в момент, соответствующий минимуму мгновенной мощности переменного тока.

Накопление мощности осуществляется в реактивных



Основы проектирования приборов и систем

элементах, поэтому фильтр должен содержать хотя бы один такой элемент. Характер процессов, происходящих в выпрямителе, задается тем реактивным элементом, который создает основное сопротивление переменной составляющей выпрямленного тока. В зависимости от характера реактивности первого элемента фильтра все схемы выпрямителей делятся на две группы: 1) выпрямитель, нагрузка которого начинается с индуктивного элемента; 2) выпрямитель, нагрузка которого начинается с емкостного элемента. Соответственно, различают индуктивные, емкостные и комбинированные фильтры.

Индуктивный фильтр применяют в источниках питания большой мощности, когда требуются большие токи при малом сопротивлении нагрузки. Он представляет собой дроссель с индуктивностью L , включенный последовательно с нагрузкой. Эпюры тока i_n и напряжения на нагрузке U_n при однополупериодном выпрямлении (рис. 1.3,а) показывают, что длительность протекания импульса тока λ превышает длительность полупериода выпрямленного напряжения $U_{вх.}$. Для устранения провалов напряжения на нагрузке и уменьшения пульсаций необходимо, чтобы индуктивное сопротивление дросселя X_L на частоте основной гармоники выпрямленного напряжения было намного больше сопротивления нагрузки: $X_L = \rho\omega L \gg R_n$, где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока до выпрямления; ρ – отношение частоты основной гармоники пульсаций выпрямленного напряжения к частоте переменного напряжения на входе выпрямителя. При однополупериодном выпрямлении $\rho = 1$, при двухполупериодном – $\rho = 2$. Трехфазные выпрямители, где ρ еще больше, для питания РЭА применяются редко. Эпюры входного и выходного (на нагрузке) напряжений при двухполупериодном выпрямлении и при соблюдении указанного условия показаны на (рис. 1.3,б).

Емкостной фильтр применяют при относительно большом сопротивлении нагрузки, в основном в источниках питания малой мощности. В источниках питания РЭА данный фильтр получил наибольшее распространение, так как содержит конденсатор C_0 , обычно оксидный, большой емкости, подключенный параллельно нагрузке (рис. 1.3,в). Пульсации напряжения на конденсаторе, а следовательно на нагрузке ($U_c = U_n$) уменьшаются при соблюдении условий: $X_c = 1/\rho\omega C \ll R_n$; $X_c \ll R_b$, где X_c – емкостное сопротивление конденсатора; R_b – выходное сопротивление выпрямителя. Чем сильнее выполняется первое неравенство, тем меньшая часть переменных составляющих тока протекает через нагрузку, а чем сильнее выполняется второе неравенство, тем



Основы проектирования приборов и систем

меньше падение напряжения переменных составляющих на нагрузке.

При особо жестких требованиях к фильтрации используют LC-фильтры, Г – образные (рис. 1.3,г), П-образные (рис 1.3,д) и многосвязные. Принцип действия всех фильтров основан на том, чтобы элемент, включенный последовательно с нагрузкой, не пропускал переменную составляющую тока, но свободно пропускал постоянную, а элемент, включенный параллельно нагрузке, хорошо пропускал переменную составляющую, но не пропускал постоянную.

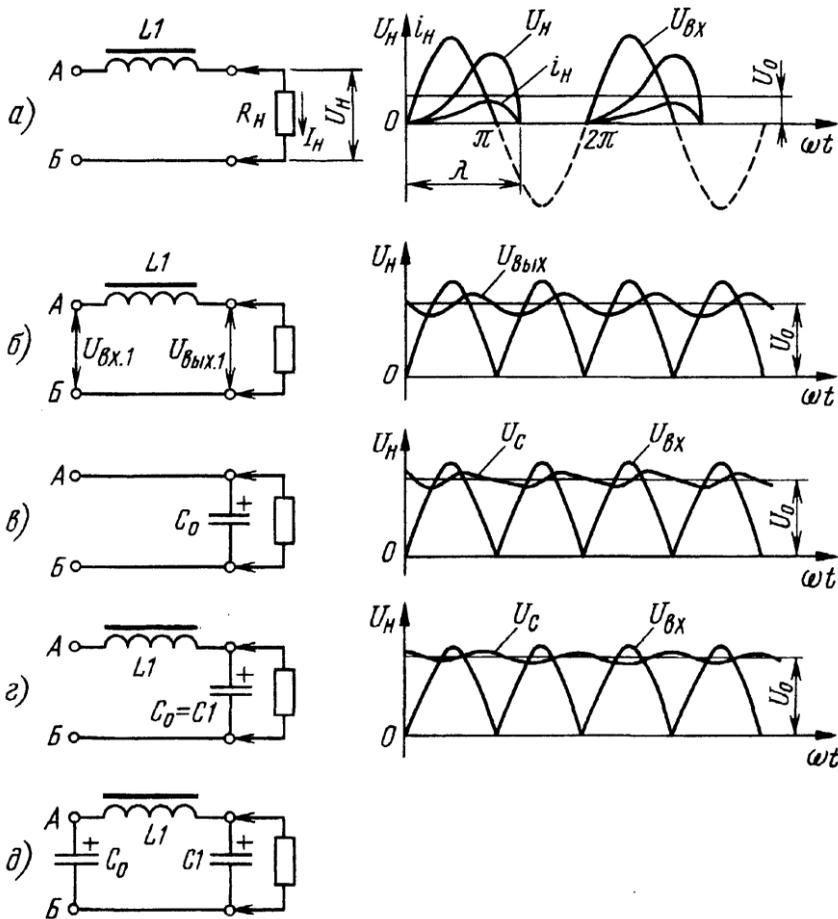


Рис. 1.3 – Виды сглаживающих фильтров



Основы проектирования приборов и систем

Эффективность сглаживания фильтром пульсаций характеризуется коэффициентом сглаживания q , равный отношению коэффициентов пульсации на входе и выходе фильтра: $q = K_{п0} / K_{п1}$.

На входе фильтра, в точках АБ (рис. 1.3), коэффициент пульсаций $K_{п0}$, равен отношению переменной составляющей (амплитуды первой гармоники пульсаций) к постоянной: $K_{п0} = U_{вх1} / U_{0\text{ вх1}}$. На выходе первого звена фильтра коэффициент пульсаций $K_{п1}$ будет равен: $K_{п1} = U_{вых1} / U_{0\text{ вх1}}$, где $U_{вых1}$ – переменная составляющая напряжения на выходе фильтра, $U_{0\text{ вх1}}$ – постоянная.

Общий коэффициент сглаживания многозвенного фильтра будет равен: $q_{\text{общ}} = q_1 \cdot q_2 \dots q_n = K_{п0} \cdot K_{пn}$.

В ряде случаев, для питания устройств потребляющих малый ток, вместо LC фильтров применяют RC фильтры. Они выполняются по схеме (рис. 1.3,г), но дроссель L1 заменяют резистором.

При проектировании выпрямителя с LC – фильтром исходят из заданной емкости всех элементов, входящих в схему. Если емкость конденсаторов больше некоторой минимальной емкости, то схема с нагрузкой, начинающейся с емкостного элемента, даст меньшие пульсации выпрямленного напряжения, чем схема с нагрузкой индуктивного характера. Если емкость конденсаторов меньше C_{min} , то следует выбирать нагрузку индуктивного характера.

Минимальная емкость определяется, исходя из выражения:

$$C_{\text{min}} \approx \frac{10^6}{f \cdot R_{\text{н}}},$$

(1.1)

где $R_{\text{н}}$, Ом – активное сопротивление нагрузки;

f , Гц – частота переменного тока;

C_{min} , мкФ – емкость конденсаторов фильтра.

1.4. Расчет выпрямителя

1.4.1. Порядок расчета выпрямителя с нагрузкой индуктивного характера.

Исходные данные для расчета:

$U_{\text{н}}$, В – напряжение на нагрузке,

I_0 , А – ток нагрузки,

$U_{\text{с}}$, В – напряжение переменного тока,

f , Гц – частота переменного тока,

C , мкФ – общая емкость всех конденсаторов, входящих в



Основы проектирования приборов и систем

систему выпрямителя и фильтра,

K_n – коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке.

Предположим, что необходимо спроектировать источник питания работающий от промышленной сети 220 В 50 Гц. При этом постоянное напряжение на нагрузке должно $U_n = 15$ В, сила тока в нагрузке – $I_0 = 1,3$ А, а пульсации выходного напряжения должны быть менее $K_n = 0,05$, общая емкость всех конденсаторов $C = 940$ мкФ.

Определить сопротивление нагрузки:

$$R_n = U_n / I_0 = 15 / 1,3 \approx 11,54 \text{ Ом.}$$

Определить величину выпрямленной мощности:

$$P_0 = U_n \cdot I_0 = 15 \cdot 1,3 = 19,5 \text{ Вт.}$$

Если выпрямленная мощность не велика, а требования к пульсации высоки, целесообразно выбирать мостовую схему выпрямления.

Определить вид нагрузки выпрямителя, для чего сравнить заданное значение емкости конденсаторов фильтра с минимально допустимой для выпрямителя, нагрузка которого начинается с емкостного элемента: $C_{\min} = 10^6 / (f \cdot R_n) = 10^6 / (50 \cdot 11,54) \approx 1733$ мкФ.

Поскольку $C_{\min} > C$, выбирается схема с нагрузкой, начинающейся с индуктивного элемента (рис. 1.3,г).

Определить величину постоянной составляющей выпрямленного тока, приходящуюся на один вентиль:

$$I_{0в} = I_0 / m = 1,3 / 2 = 0,65 \text{ А,}$$

где m – число фаз выпрямленного напряжения, для мостовой схемы $m = 2$.

Выбрать вентиль, обеспечивающий прямой выпрямленный ток $I_{пр}$, не меньше $I_{0в}$. Определить порог его выпрямления $E_{пор}$, прямое падение напряжения $U_{пр}$, обратный ток $I_{обр}$, обратное напряжение $E_{обр}$.

В выпрямителях применяют кремниевые и германиевые диоды. Порог выпрямления кремниевых диодов лежит в пределах 0,4-0,8 В, германиевых – 0,15-0,2 В. Если напряжение на диоде, приложенное к нему в прямом направлении больше указанной величины, диод пропускает ток.

Диоды, маркировка которых начинается с обозначения КД или 2Д являются кремниевыми. Марка германиевых диодов начинается с букв Д, 1Д, или ГД. Рекомендуется в качестве порога принять среднее значение для данного типа диодов.

По справочнику выберем диод КД226А и его параметры: $U_{пр} = 1,4$ В, $I_{пр} = 1,7$ А, $I_{обр} = 50$ мкА, $U_{обр} = 100$ В. По обратному на-



Основы проектирования приборов и систем

пряжению вентиль имеет хороший запас. Поскольку выбранный вентиль кремниевый, примем $E_{пор} = 0,6$ В.

Сопротивление вентиль определить из выражения:

$$r_B = (U_{пр} - E_{пор}) / I_{пр} = (1,4 - 0,6) / 1,7 = 0,47 \text{ Ом},$$

Найти ориентировочные значения активного и индуктивного сопротивления обмотки трансформатора:

$$r_{тр} = 3,5 \cdot \frac{U_H}{I_0 \cdot f \cdot B_m} \cdot \frac{\sqrt[4]{f \cdot B_m}}{\sqrt[4]{U_H \cdot I_0}} = 3,5 \cdot \frac{15}{1,3 \cdot 50 \cdot 1} \cdot \frac{\sqrt[4]{50 \cdot 1}}{\sqrt[4]{15 \cdot 1,3}} \approx 1,023 \text{ Ом},$$

$$L_s = 5 \cdot 10^{-3} \frac{U_H}{I_0 \cdot f \cdot B_m} \cdot \sqrt{\frac{U_H \cdot I_0}{f \cdot B_m}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{15}{1,3 \cdot 50 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{15 \cdot 1,3}{50 \cdot 1}} \approx 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где B_m , Тл – амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, для ориентировочного расчета $B_m \approx 1$ Тл.

Активное сопротивление дросселя принимается равным 2 – 7 % сопротивления нагрузки. Примем $r_{др} = R_H \cdot 5\% / 100\% = 11,54 \cdot 0,05 = 0,577$ Ом.

Определить выходное сопротивление выпрямителя и э.д.с. холостого хода:

$$R_{вых} = r_{тр} + 2 \cdot r_B + m \cdot f \cdot L_s + r_{др} = 1,023 + 2 \cdot 0,47 + 2 \cdot 50 \cdot 0,72 \cdot 10^{-3} + 0,577 \approx$$

$$2,612 \text{ Ом},$$

$$E_{ох} = U_H + E_{пор} + I_0 \cdot R_{вых} = 15 + 0,6 + 1,3 \cdot 2,612 \approx 19 \text{ В}.$$

Найти напряжение на вторичной обмотке трансформатора:

$$E_2 = E_{ох} \cdot V(m) = 19 \cdot 1,11 = 21,09 \text{ В},$$

где $V(m)$ – коэффициент, определяющий использование обмоток трансформатора по напряжению, $V(m)$ равен 1,11; 0,85; 0,74 при m , равном 2; 3; 6 соответственно.

Определить критическое значение индуктивности дросселя, т.е. минимальную индуктивность, при которой не возникает режим прерывистых токов:

$$L_{кр} = R_H \cdot x(m) / \omega = 11,54 \cdot 0,332 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50) \approx 0,0122 \text{ Гн},$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $x(m)$ – коэффициент, зависящий от числа фаз, $x(m)$ равен 0,332; 0,083; 0,01 при m , равном 2; 3; 6 соответственно.

Определить индуктивность дросселя, обеспечивающую получение пульсаций, меньших заданных:

$$L = \Delta(m) / (\omega^2 \cdot C \cdot K_n) = 0,168 / (314^2 \cdot 940 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05) \approx 0,036$$

Гн



Основы проектирования приборов и систем

где $\Delta(m)$ – коэффициент, зависящий от числа фаз, $\Delta(m)$ равен 0,168; 0,028; 0,002 для m , равного 2; 3; 6 соответственно.

Выбрать дроссель с некоторым запасом индуктивности – $L=0,04$ Гн (нормализованный дроссель Д157 для тока $I_0 = 1,6$ А).

Определить ток нагрузки, критический для выбранной индуктивности дросселя:

$$I_{0кр} = E_{0x} / \left(\frac{\omega \cdot L}{x(m)} + R_{\text{вых}} \right) = 19 / \left(\frac{6,28 \cdot 50 \cdot 0,04}{0,332} + 2,612 \right) = 0,47 \text{ А.}$$

Определить действующее значение тока вентиля для $I_0 \gg I_{0кр}$:

$$I_B = I_0 / \sqrt{m} = 1,3 / \sqrt{2} = 0,9191 \text{ А}$$

Найти действующее значение тока первичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = I_0 = \sqrt{2} \cdot I_B = 0,919 \cdot 1,414 \approx 1,3 \text{ А}$$

Действующее значение рабочего тока первичной обмотки:

$$I_1 = I_2 \cdot n = 1,3 \cdot 21,09 / 220 = 0,125 \text{ А,}$$

где n – коэффициент трансформации.

Определить габаритную мощность трансформатора:

$$V \cdot A_{\text{тр}} = E_2 \cdot I_2 = 21,09 \cdot 1,3 = 27,4 \text{ В} \cdot \text{А,}$$

Определить напряжение на нагрузке при холостом ходе:

$$E_{0\text{max}} = \sqrt{2} \cdot E_2 = 1,414 \cdot 21,09 = 29,8 \text{ В}$$

такое же значение имеют максимальное напряжение на конденсаторе фильтра и обратное напряжение на вентиле.

Рассчитать коэффициент пульсаций по первой гармонике для выходного напряжения. Коэффициент сглаживания пульсаций фильтром:

$$q = \omega_n^2 \cdot L \cdot C - 1 = (2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50)^2 \cdot 0,04 \cdot 940 \cdot 10^{-6} - 1 = 13,8$$

где $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot f$ – частота пульсаций напряжения на выходе.

$$\text{Тогда } K_{п\text{вых}} = K_{п\text{вх}} / q = 0,666 / 13,8 = 0,048 \approx K_{п},$$

где $K_{п\text{вх}}$ – коэффициент пульсаций по первой гармонике для входного напряжения, $K_{п\text{вх}}$ равен 0,666; 0,25; 0,06 для m , равного 2; 3; 6 соответственно.

Если рассчитанный $K_{п\text{вых}}$ меньше или равен заданному, расчет можно считать законченным.

Для последующего расчета силового трансформатора ис-



Основы проектирования приборов и систем

пользуют: $I_2 = 1,3 \text{ A}$ – ток вторичной обмотки трансформатора, $E_2 = 21,09 \text{ В}$ – действующее значение э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора.

1.4.2. Порядок расчета выпрямителя с нагрузкой емкостного характера.

Исходные данные для расчета см. п.1.4.1, однако, предположим, что общая емкость всех конденсаторов, входящих в схему $C = 2000 \text{ мкФ}$.

Выберем основную схему двухфазного выпрямителя.

Определить сопротивление нагрузки:

$$R_n = U_n / I_0 = 15 / 1,3 \approx 11,54 \text{ Ом.}$$

Определить величину выпрямленной мощности:

$$P_0 = U_n \cdot I_0 = 15 \cdot 1,3 = 19,5 \text{ Вт.}$$

Если значение выпрямленного напряжения мало, целесообразно выбирать мостовую схему выпрямления.

Определить вид нагрузки выпрямителя, для чего сравнить заданное значение емкости конденсаторов фильтра с минимально допустимой для выпрямителя, нагрузка которого начинается с емкостного элемента: $C_{\min} = 10^6 / (f \cdot R_n) = 10^6 / (50 \cdot 11,54) \approx 1733 \text{ мкФ}$.

Поскольку $C_{\min} < C$, выпрямитель должен работать на нагрузку, начинающуюся с емкостного элемента. Распределение емкостей конденсаторов, входящих в П-образный фильтр, необходимо производить так, чтобы $C_1 = C_2 = C/2 = 1000 \text{ мкФ}$ (рис. 5.3,д). В этом случае коэффициент пульсаций будет минимальным.

Определить средний ток одного вентиля и примерное значение обратного напряжения на вентиле:

$$I_{0в} = I_0 / m = 1,3 / 2 = 0,65 \text{ A,}$$

где m – число фаз выпрямленного напряжения, для основной схемы $m = 2$.

$$E_{обр} = 2,66 \cdot E_0 = 2,66 \cdot U_n = 2,66 \cdot 15 = 40 \text{ В.}$$

По полученным данным выбрать вентиль, диод из п. п.5.4.1 отвечает необходимым требованиям. Поскольку возникающее в выпрямителе обратное напряжение на вентиле может привести к пробое диодов, необходимо выбирать $U_{обр} > E_{обр}$ с большим запасом. Для КД226А – $U_{обр} = 100 \text{ В}$.

Сопротивление вентиле определить из выражения:

$$r_{в} = (U_{пр} - E_{пор}) / I_{пр} = (1,4 - 0,6) / 1,7 = 0,47 \text{ Ом,}$$

Найти ориентировочные значения активного и индуктивно-го сопротивления обмотки трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = 3,5 \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_0 \cdot f \cdot B_{\text{м}}} \cdot \frac{\sqrt[4]{f \cdot B_{\text{м}}}}{\sqrt[4]{U_{\text{н}} \cdot I_0}} = 3,5 \cdot \frac{15}{1,3 \cdot 50 \cdot 1} \cdot \frac{\sqrt[4]{50 \cdot 1}}{\sqrt[4]{15 \cdot 1,3}} \approx 1,023 \text{ Ом},$$

$$L_{\text{с}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{U_{\text{н}}}{I_0 \cdot f \cdot B_{\text{м}}} \cdot \sqrt{\frac{U_{\text{н}} \cdot I_0}{f \cdot B_{\text{м}}}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{15}{1,3 \cdot 50 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{15 \cdot 1,3}{50 \cdot 1}} \approx 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где $B_{\text{м}}$, Тл – амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, для ориентировочного расчета $B_{\text{м}} \approx 1$ Тл.

Активное сопротивление дросселя принимается равным 2 – 7 % сопротивления нагрузки. Примем $r_{\text{др}} = R_{\text{н}} \cdot 5\% / 100\% = 11,54 \cdot 0,05 = 0,577$ Ом.

Определить расчетное значение выпрямленного напряжения с учетом сопротивления дросселя фильтра и порога выпрямления выбранных вентиляй:

$$U_0 = I_0 \cdot (R_{\text{н}} + r_{\text{др}}) + E_{\text{пор}} = 1,3 \cdot (11,54 + 0,577) + 0,6 = 16,35 \text{ В}.$$

Определить значение параметра А как функции угла отсечки вентиляй:

$$A = \frac{\pi \cdot (r_{\text{п}} + r_{\text{в}})}{m \cdot U_0} \cdot I_0 = \frac{3,14 \cdot (1,023 + 0,47)}{2 \cdot 16,35} \cdot 1,3 \approx 0,19.$$

По графику рис. 1.4 определить вспомогательные коэффициенты: $B = 0,95$; $D = 2,4$; $F = 8,05$; $H = 16000$, зависящие от значения параметра А.

Найти действующее значение э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора:

$$E_2 = U_0 \cdot B(A) = 16,35 \cdot 0,95 = 15,5$$

В.

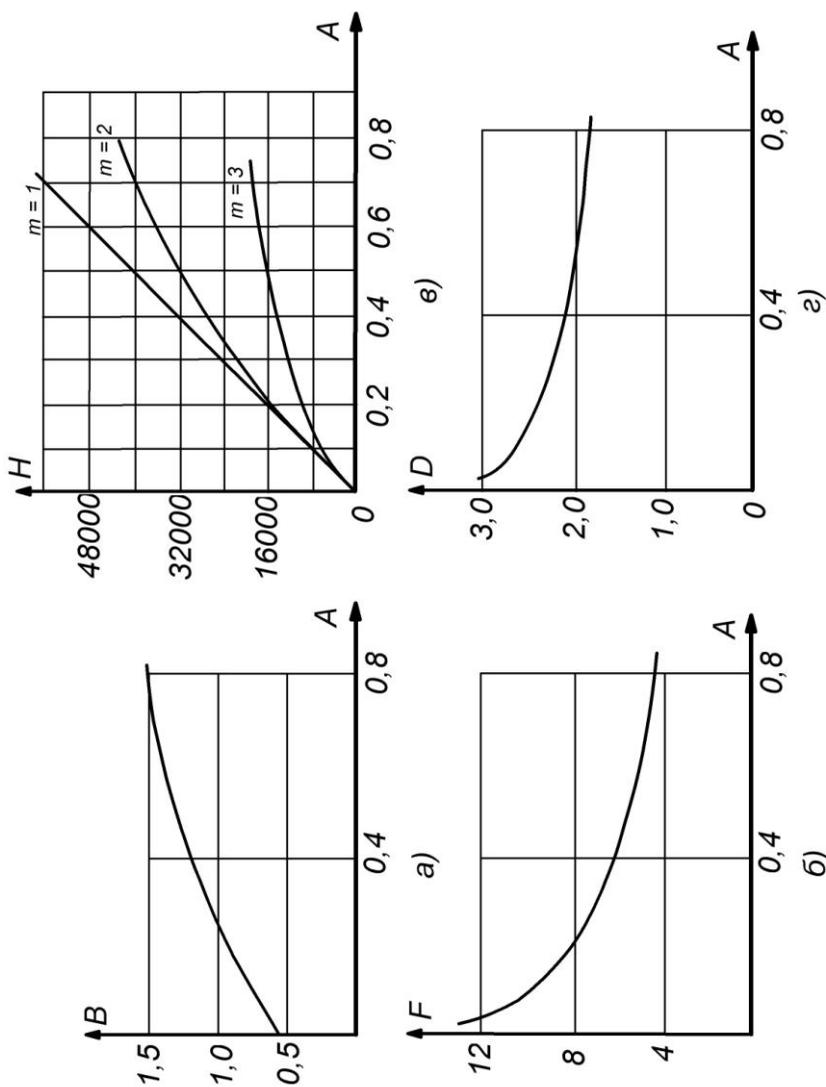


Рис. 5.4 - Зависимость вспомогательных коэффициентов от параметра A при расчете выпрямителя с нагрузкой емкостного характера

Определить действующее значение тока вентиля:

$$I_B = I_0 \cdot D(A)/m = 1,3 \cdot 2,4/2 = 1,56 \text{ A}$$



Основы проектирования приборов и систем

Рассчитать действующее значение тока первичной обмотки трансформатора, учитывая, что в основной схеме выпрямления $I_2 = I_B = 1,56$ А:

$$I_1 = n \cdot \sqrt{2} \cdot I_B = (15,5/220) \cdot 1,414 \cdot 1,56 = 0,155 \text{ А},$$

Определить габаритную мощность трансформатора для основной схемы выпрямителя:

$$V \cdot A_{\text{тр}} = (E_1 \cdot I_1 + 2 \cdot E_2 \cdot I_2) / 2 = (220 \cdot 0,155 + 2 \cdot 15,5 \cdot 1,56) / 2 = 41,23 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Проверить правильность выбора вентиля, для чего определить максимальное значение обратного напряжения на вентиле:

$$E_{\text{обр}} = 2 \cdot E_2 = 2 \cdot 15,5 = 31 \text{ В}.$$

Определить коэффициент пульсаций выпрямителя по первой гармонике:

$$K_{\text{п}} = H(A) / (f \cdot (r_{\text{тр}} + r_{\text{в}}) \cdot C) = 16000 / (50 \cdot 1000 \cdot 1,49) = 0,214$$

Определить коэффициент сглаживания первой гармоники пульсаций фильтром, необходимый для достижения заданного значения пульсаций напряжения на нагрузке:

$$q = K_{\text{п}} / K_{\text{н}} = 0,214 / 0,05 = 4,28$$

Определить необходимую индуктивность дросселя фильтра:

$$L = \frac{q+1}{k_{\text{п}}^2 \cdot \omega_{\text{п}}^2 \cdot C} = \frac{4,28+1}{2^2 \cdot 6,28^2 \cdot 50^2 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} = 0,013 \text{ Гн}.$$

Для последующего расчета силового трансформатора используют: $I_2 = 1,56$ А – ток вторичной обмотки трансформатора, $E_2 = 15,5$ В – действующее значение э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора. Однако необходимо учитывать, что в расчете по п.5.4.2 применена основная двухфазная схема выпрямления (рис. 5.2,6), из этого следует, что необходимо изготовить трансформатор с двумя одинаковыми вторичными обмотками, каждая из которых имела бы рассчитанные параметры I_2 , E_2 . Впоследствии по одному из выводов данных обмоток соединяют и образуют общий вывод. Возможно изготовление одной вторичной обмотки на напряжение $2 \cdot E_2$, с последующим отводом вывода от середины обмотки.

1.4.3 Сетевой трансформатор источника питания

В линейных источниках питания основной элемент – сетевой трансформатор, обычно понижающий, который уменьшает



Основы проектирования приборов и систем

сетевое напряжение до требуемого уровня. Также, трансформатор обеспечивает гальваническую развязку потребителя и источника.

Трансформатор представляет собой магнитопровод с нанесенными на него несколькими обмотками. Предназначен для преобразования переменного тока. На постоянном токе работа трансформатора не возможна.

При проектировании источников электропитания желательно использовать готовые трансформаторы, выпускаемые промышленностью и работающие от сети 220 В частотой 50 Гц. В тех случаях, когда токи и напряжения во вторичных обмотках или количество обмоток унифицированного трансформатора не соответствует требуемым значениям, необходимо проектировать и изготавливать трансформатор, параметры которого соответствуют исходным данным. При этом, исходными величинами для расчета трансформаторов служат напряжение питающей сети 220 В с частотой 50 Гц, а также токи и напряжения вторичных обмоток.

1.4.3.1 Выбор материалов и расчет трансформатора.

Конструкция магнитопровода. По конструктивному исполнению магнитопроводы для сетевых трансформаторов подразделяются на броневые (рис. 1.5,а и 1.6,а), стержневые (рис. 1.5,б и 1.6,б) и кольцевые или тороидальные (рис. 1.5,с и 1.6,с). По технологии изготовления магнитопроводы делятся на пластинчатые (рис. 1.5) и ленточные (рис. 1.6).

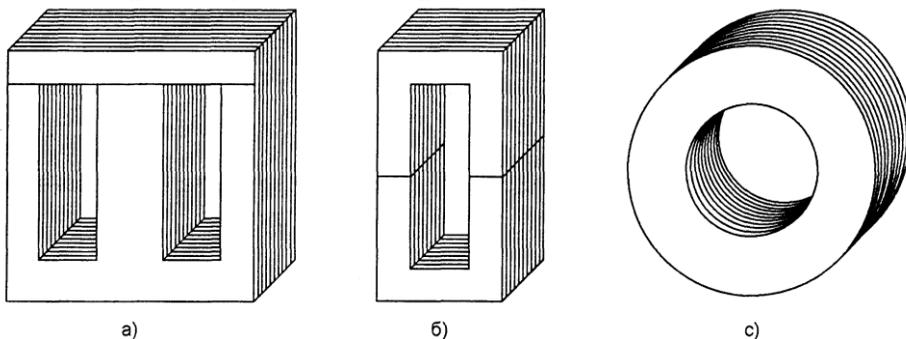


Рис. 1.5 - Пластинчатые магнитопроводы

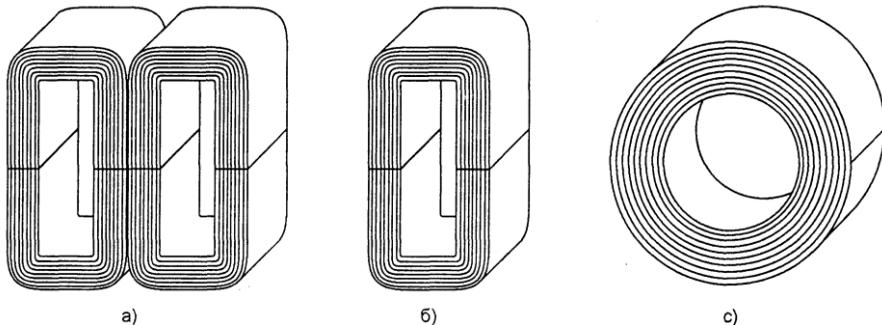


Рис. 1.6 - Ленточные магнитопроводы

В трансформаторах малой (до 300 Вт) и средней мощности (до 1000 Вт) предпочтительно используют ленточные магнитопроводы. Среди ленточных магнитопроводов более часто применяют стержневые магнитопроводы, они имеют ряд существенных эксплуатационных преимуществ перед броневыми: меньшая (на 30%) индуктивность рассеяния, более высокое КПД, большая поверхность охлаждения обмоток, меньшая (на 25%) масса и меньшая чувствительность к внешним магнитным полям. Однако, стержневым магнитопроводам присущи и недостатки, такие как: все еще значительная индуктивность рассеяния, необходимость изготовления двух катушек, меньшая защищенность катушек от механического воздействия.

Тороидальные трансформаторы обладают наилучшими эксплуатационными характеристиками, поскольку весь магнитный поток проходит по магнитопроводу, поэтому индуктивность рассеяния у них минимальна, однако они сложны в изготовлении.

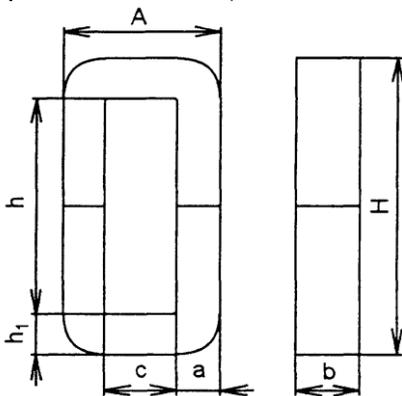


Рис. 1.7 – Основные размеры магнитопровода

Основы проектирования приборов и систем

При изготовлении трансформаторов сетевых источников питания наиболее часто применяются стержневые ленточные магнитопроводы. Выделяют следующие их типы: ПЛ – стержневой ленточный; ПЛВ – стержневой ленточный наименьшей массы; ПЛМ – стержневой ленточный с уменьшенным расходом меди; ПЛР – стержневой ленточный наименьшей стоимости.

На рис. 1.7 показаны обозначения габаритных размеров магнитопровода: А – ширина; Н – высота; а – толщина стержня; b – ширина ленты; с – ширина окна; h – высота окна; h1 – высота ярма. Магнитопроводы данного типа имеют сокращенное обозначение. Если присутствует запись: ПЛР25х50х65, то она расшифровывается как: ПЛР – стержневой ленточный наименьшей стоимости, толщина стержня - 25 мм., ширина ленты – 50 мм., высота окна – 65 мм. При определении размеров магнитопровода используют табл. 1.1 и 1.2.

Табл. 1.1 - Типоразмеры магнитопровода ПЛ

Типоразмер магнитопровода	a, мм	b, мм	c, мм	A, мм	H, мм	h, мм	h ₁ , мм	Масса, г	Площадь сечения магнитопровода S _{ст} , см ²	Площадь окна магнитопровода S _{ок} , см ²	Произведение витка S _{ст} * S _{ок} , см ⁴	Средняя длина витка l _{ср.} , см	Объем магнитопровода V _{ст} , см ³			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
ПЛ6,5х12,5х8	6	12,5	8	21	21	8	6,5	28	0,81	0,64	0,52	5,08	4,13			
ПЛ6,5х12,5х10					23	10		30						0,65	5,48	4,45
ПЛ6,5х12,5х12,5					25,5	12,5		33						0,81	5,98	4,86
ПЛ6,5х12,5х16					29	16		37						1,04	6,68	5,43
ПЛ8х12,5х12,5	8	12,5	10	26	28,5	12,5	8	47	1	1,25	1,25	7,01	7,01			
ПЛ8х12,5х16					32	16		51						1,6	7,71	7,71
ПЛ8х12,5х20					36	20		57						2	8,51	8,51
ПЛ8х12,5х25					41	25		63						2,5	9,51	9,51
ПЛ10х12,5х20	10	12,5	12,5	32,5	40	20	10	81	1,25	2,5	3,13	9,64	12,05			
ПЛ10х12,5х25					45	25		89						3,13	10,64	13,3
ПЛ10х12,5х32					52	32		98						4	12,04	15,05
ПЛ10х12,5х40					60	40		114						5	13,64	17,05
ПЛ12,5х16х25	12,5	16	16	41	50	25	12,5	163	2	4	8	12,13	24,25			
ПЛ12,5х16х32					55	32		182						5,12	13,53	27,05
ПЛ12,5х16х40					65	40		203						6,4	15,13	30,25
ПЛ12,5х16х50					75	50		230						8	17,13	34,25
ПЛ12,5х25х32	12,5	25	20	45	57	32	12,5	292	3,13	6,4	20	14,33	44,77			
ПЛ12,5х25х40					65	40		334						8	15,93	49,77
ПЛ12,5х25х50					75	50		376						10	17,93	56,02
ПЛ12,5х25х60					85	60		418						12	19,93	62,27
											31,25					
											37,5					

Основы проектирования приборов и систем

ПЛ16х32х40	16	32	25	57	72	40	16	612	5,12	10	51,2	18	92,16
ПЛ16х32х50					82	50		690		12,5	64	20	102,4
ПЛ16х32х65					97	65		795		16,25	83,2	23	117,76
ПЛ16х32х80					112	80		900		20	102,4	26	133,12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ПЛ20х40х50	20	40	32	72	90	50	20	1230	8	16	128	22,68	181,44
ПЛ20х40х60					100	60		1350		19,2	24,68	24,68	197,44
ПЛ20х40х80					120	80		1550		25,6	153,6	28,68	229,44
ПП20х40х100					140	100		1770		32	204,8	32,68	261,44
ПЛ25х50х65	25	50	40	90	115	65	25	2440	12,5	26	325	28,8	360
ПЛ25х50х80					130	80		2700		32	400	31,8	397,5
ПЛ25х50х100					150	100		3040		40	500	35,8	447,5
ПЛ25х50х120					170	120		3380		48	800	39,8	497,5

Существуют различные варианты размещения катушек на магнитопроводе. При изготовлении броневых магнитопроводов обмотки наматываются полностью - вторичная по верх первичной. Обмотки располагаются в окнах магнитопровода вокруг центрального стержня (рис. 1.8,а). При изготовлении стержневых трансформаторов наиболее оптимальна схема, при которой каждая из обмоток (первичная и вторичная) разделены на две равные части.

Таб. 1.2 – Типоразмеры магнитопровода ПЛР

Типоразмер магнитопровода	a, мм	b, мм	c, мм	A, мм	H, мм	h, мм	h ₁ , мм	Масса, г	Площадь сечения магнитопровода S _{ст} , см ²	Площадь окна магнитопровода S _{ок} , см ²	Произведение S _{ст} * S _{ок} , см ⁴	Средняя длина витка l _{ср.м} , см	Объем магнитопровода V _{стг} , см ³
ПЛР10х12,5	10	12,5	8	28	54	32	10	94	1,25	2,56	3,2	11,14	13,93
ПЛР10х16		16						1,6	17,82				
ПЛР10х20		20						2	22,28				
ПЛР10х25		25						2,5	27,85				
ПЛР12,5х12,5	12,5	12,5	10	35	65	40	12,5	148	1,56	4	6,25	13,93	21,83
5 ПЛР12,5х16		16						2	27,85				
ПЛР12,5х20		20						2,5	34,82				
ПЛР12,5х25		25						3,13	43,52				
ПЛР12,5х32		32						4	55,71				
ПЛР14х12,5	14	12,5	11,5	39,5	73	45	14	186	1,75	5,18	9,06	15,7	27,47
ПЛР14х16		16						2,24	35,16				
ПЛР14х20		20						2,8	43,95				
ПЛР14х25		25						3,5	54,94				
ПЛР14х32		32						4,48	70,33				
ПЛР14х36		36						5,04	79,12				

Основы проектирования приборов и систем

ПЛР16х12,5	16	12,5	16	48	92	60	16	274	2	9,6	19,2	20,23	40,45
ПЛР16х16		16						350	2,56		24,58		51,78
ПЛР16х20		20						438	3,2		30,72		64,73
ПЛР16х25		25						547	4		38,4		80,91
ПЛР16х32		32						700	5,12		49,15		103,5
ПЛР16х40		40						875	6,4		61,44		6
													129,4
													5
ПЛР18х16	18	16	18	54	107	71	18	457	2,88	12,78	36,81	23,46	67,55
ПЛР18х20		20						571	3,6		46,01		84,44
ПЛР18х25		25						713	4,5		57,51		105,5
ПЛР18х32		32						913	5,76		73,61		4
ПЛР18х40		40						1142	7,2		92,02		135,1
ППР18х45		45						1284	8,1		103,52		168,8
													8
													189,9
													9
ПЛР21х20	21	20	25	67	127	85	21	812	4,2	21,25	89,25	28,6	120,1
ПЛР21х25		25						1015	5,25		111,56		1
ПЛР21х32		32						1232	6,72		142,8		150,1
ПЛР21х36		36						1462	7,56		160,65		3
ПЛР21х40		40						1624	8,4		178,5		182,1
ПЛР21х45		45						1827	9,45		200,81		7
													216,1
													9
													240,2
													1
													270,2
													4

Изготавливаются две одинаковые катушки, содержащие по половине витков каждой из обмоток. Катушки располагают на двух стержнях (рис. 1.8,б и 1.9). При этом полуобмотки каждой из обмоток должны быть включены согласованно (рис. 1.10), чтобы создаваемые ими магнитные потоки имели одинаковое направление.

При преобразовании напряжения в трансформаторе происходят потери мощности. Суммарная мощность потерь в трансформаторе равна: $P_{\Sigma} = P_{\text{ст}} + P_{\text{м}} = P_{\text{вт}} + P_{\text{г}} + P_{\text{м}}$

где: $P_{\text{ст}}$ – мощность потерь в стали (в магнитопроводе), которая складывается из мощности потерь на вихревой ток $P_{\text{вт}}$ и мощности

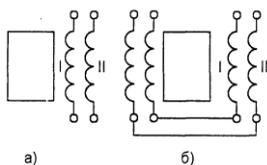


Рис. 1.8

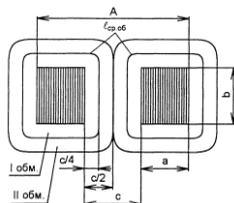


Рис. 1.9

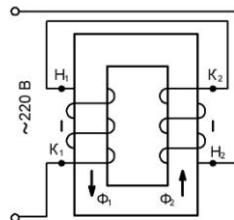


Рис. 1.10

потери на гистерезис P_g . Также в трансформаторе происходят потери в обмотках – мощность потерь в меди P_M .

Материал магнитопровода. Для уменьшения мощности потерь в стали, сталь подвергают термообработке - удаляют углерод, а также подвергают легированию – добавляют кремний, алюминий, медь и др. Это повышает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу и как следствие потери на гистерезис уменьшаются. Также сталь подвергают холодной или горячей прокатке для получения необходимой структуры (текстуры проката).

В зависимости от содержания легирующих элементов, структурного состояния, магнитных свойств, стали маркируют четырехзначными числами. К примеру, 1511. (Табл. 1.3).

Первая цифра означает класс электротехнической стали по структурному состоянию и классу прокатки: 1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой. *Вторая цифра* — процент содержания кремния: 0 — нелегированная сталь с суммарной массой легирующих элементов не более 0,5 %; 1 — легированная с суммарной массой свыше 0,5, но не более 0,8 %; 2 — 0,8... 1,8 %; 3 — 1,8...2,8 %; 4 - 2,8...3,8 %; 5 - 3,8...4,8 %. *Третья цифра* — группа по основной нормируемой характеристике (удельные потери и магнитная индукция): 0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл на частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$); 1 — потери при магнитной индукции 1,5 Тл на частоте 50 Гц ($P_{1,5/50}$); 2 — при индукции 1 Тл на частоте 400 Гц ($P_{1/400}$); 6 — индукция в слабых магнитных полях при напряженности 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 — индукция в средних магнитных полях при напряженности 10 А/м (B_{10}) или 5 А/м (B_5).

Первые три цифры обозначают тип электротехнической стали. Четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

Табл. 1.3 — Марки стали



Марка стали	Содержание кремния, %	Толщина ленты, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не более							
			$P_{1,50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	1000	2500	5000	10000	30000	
1511	3,8..4,8	0,5 0,35	1,55	3,5	-	-	-	1,3	1,46	1,57	1,7	1,9	
			1,35	3									
1512			1,4	3,1	-	-	-	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	
			1,2	2,8									
1513			1,25	2,9	-	-	-	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
			1,05	2,5									
1514			1,15	2,7	-	-	-	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
			0,9	2,2									
3411	2,8..3,8			1,1	2,45	3,2	-	-	1,6	1,75	1,83	1,91	1,98
				0,8	1,75	2,5							
3412			0,95	2,1	2,8	-	-	1,65	1,8	1,87	1,92	2	
			0,7	1,5	2,2								
3413			0,5	0,8	1,75	2,5	-	-	1,7	1,85	1,9	1,95	2
			0,35	0,6	1,3	1,9	-	-	1,7	1,85	1,9	1,95	2
			0,3	-	1,19	1,75	-	-	-	-	-	-	-
3414			0,5	0,7	1,5	2,2	1,6	1,7	-	1,88	-	-	-
			0,35	0,5	1,1	1,6	1,6	1,7	-	1,88	1,9	1,95	2
			0,3	-	1,03	1,5	1,6	1,7	-	1,88	-	-	-
		0,28	-	1,05	1,55	-	-	-	1,85	-	-	-	
3415		0,35	0,46	1,03	1,5	-	-	-	-	-	-	-	
		0,3	-	0,97	1,4	1,61	1,71	-	1,9	-	-	-	
		0,28	-	0,95	1,38	-	-	-	-	-	-	-	

Магнитопроводы для трансформаторов общего назначения изготавливают из холоднокатаной текстурованной стали марок 3411—3415 с нормированными удельными потерями при магнитной индукции 1,5 Тл на частоте 50 Гц и удельным сопротивлением $60 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Параметры некоторых марок электротехнической стали приведены в табл. 1.3.

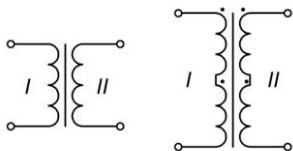
Холоднокатаная электротехническая сталь обладает более высокими магнитными характеристиками. Кроме того, более гладкая поверхность позволяет увеличить коэффициент заполнения объема магнитопровода ($k_{ст}$) до 98 %.

Расчет магнитопровода. Исходные данные для расчета. Трансформатор имеет первичную обмотку, которая подключена к источнику энергии (к промышленной сети). Эффективное (действующее) напряжение первичной обмотки $U_1 = 220$ В. Также присутствуют одна или более (n) вторичных обмоток U_2, U_3, \dots, U_n . Вторичные обмотки также характеризуются эффективным (действующим) током вторичных обмоток I_2, I_3, \dots, I_n . Частота сетевого напряжения 50Гц.

В качестве примера, представим расчет сетевого трансформатора с двумя вторичными обмотками, с параметрами $U_2 =$

Основы проектирования приборов и систем

5В; $I_2 = 0,5\text{А}$; $U_3 = 12\text{В}$; $I_3 = 1,4\text{А}$. Обобщенная электрическая схема трансформатора представлена на рис. 1.11,а, схема с учетом разделения каждой обмотки на две полуобмотки представлена на рис. 1.11,б. Точками указано начало каждой полуобмотки, для облегчения включения полуобмоток согласовано.



а) б)

Рис. 1.11 – Условное обозначение трансформатора

Основной параметр трансформатора – коэффициент трансформации, равен отношению напряжения на первичной к напряжению на разомкнутой (ЭДС) вторичной обмотке. (В режиме холостого хода, т. е. без нагрузки в цепи вторичной обмотки).

При этом, пренебрегают погрешностью, возникающей из-за отличия ЭДС от напряжения на первичной обмотке:

$$k = W_1/W_2 = U_1/U_2 = E_1/E_2 = I_2 / I_1.$$

где W_1 , W_2 – число витков, соответственно, первичной и вторичной обмоток; E_1 , E_2 – ЭДС первичной и вторичной(ных) обмоток.

Ток в первичной обмотке трансформатора равен:

$$I_1 = (I_2 \cdot U_2 + U_3 \cdot I_3 + \dots + U_n \cdot I_n) / U_1$$

$$I_1 = (0,5 \cdot 5 + 1,4 \cdot 12) / 220 = 0,088 \text{ А}$$

Находим габаритную мощность трансформатора:

$$P_{\text{габ.}} = (I_1 \cdot U_1 + U_2 \cdot I_2 + \dots + U_n \cdot I_n) / 2$$

$$P_{\text{габ.}} = (0,093 \cdot 220 + 0,5 \cdot 5 + 1,4 \cdot 12) / 2 = 19,3 \text{ Вт.}$$

Находим произведение площади поперечного сечения стержня на площадь окна магнитопровода. Стержнем называется участок магнитопровода ($a \times b \times h$), на котором размещена катушка.

$$S_{\text{ст}} \cdot S_{\text{ок}} = P_{\text{габ.}} \cdot 10^2 / (2,22 \cdot f \cdot B \cdot j \cdot \eta \cdot n \cdot k_c \cdot k_m)$$

где B – магнитная индукция, Тл; j – плотность тока в обмотках, А/мм²; η – КПД трансформатора; n – число стержней магнитопровода; k_c – коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью; k_m – коэффициент заполнения окна магнитопровода медью. Значения параметров B , j , η , k_m выбирают из табл. 1.4. При этом, $f = 50$ Гц. Коэффициент заполнения сечения магнитопровода для сталей 3411 – 3415 равен 0,95...0,97, а для сталей



Основы проектирования приборов и систем

1511-1514 – 0,89...0,93.

Выберем для магнитопровода сталь 3414. Следовательно $k_c = 0,96$. Толщину ленты выберем равной 0,35мм. (Таб. 5.3). Из таб. 1.4 выбираем по значению габаритной мощности (19,3Вт): $B = 1,26$ Тл; $j = 3,9$ А/мм²; $\eta = 0,89$; $k_m = 0,26$; $n = 2$.

$$S_{ст} \cdot S_{ок} = 19,3 \cdot 100 / (2,22 \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 3,9 \cdot 0,89 \cdot 2 \cdot 0,96 \cdot 0,26) = 7,96 \text{ см}^4$$

Толщину стержня магнитопровода вычисляют по формуле:

$$a = 0,7 \cdot (S_{ст} \cdot S_{ок})^{1/4}$$

$$a = 0,7 \cdot (7,96)^{1/4} = 1,18 \text{ см}$$

Табл. 1.4. – Характеристики магнитопровода

Габаритная мощность, $P_{габ}$ Вт	Магнитная индукция, Тл, при частоте 50Гц и толщине ленты		Плотность тока, А/мм ²	КПД	Коэффициент заполнения окна магнитопровода проводами ПЭЛ, ПЭВ-1
	0,05..0,1	0,35..0,5			
10	1,2	1,1	4,8	0,85	0,22
20	1,4	1,26	3,9	0,89	0,26
40	1,55	1,37	3,2	0,92	0,28
70	1,6	1,39	2,8	0,94	0,3
100	1,6	1,35	2,5	0,95	0,31
200	1,51	1,25	2	0,96	0,32
400	1,43	1,13	1,6	0,97	0,33
700	1,35	1,05	1,3	0,97	0,34
1000	1,3	1	1,2	0,97	0,35
2000	1,2	0,9	1,1	0,97	0,36
4000	1,1	0,8	1	0,97	0,36
7000	1,02	0,72	1	0,97	0,37
10000	0,97	0,68	1	0,97	0,37

Выбираем магнитопровод по табл. 1.1 и табл. 1.2. Предпочтительно подбирать магнитопровод с квадратным сечением или близким к квадратному, так как в этом случае расход провода для обмоток минимален.

Ширину ленты магнитопровода рассчитывают по формуле:

$$b = S_{ст} \cdot S_{ок} / (a \cdot c \cdot h)$$

$$b = 7,96 / (1,25 \cdot 1,0 \cdot 4,0) = 1,59 \text{ см.}$$

при этом c и h выбираем по таблицам согласно значения a .

Для магнитопровода ПЛР ближайшее от расчетного значение $a = 12,5$ мм. Следовательно, $c = 10$ мм., $h = 40$ мм.

Согласно расчетного значения b выбираем магнитопровод ПЛР 12,5x16. Его параметры: $a = 1,25$ см.; $b = 1,6$ см; $h = 4,0$ см; $S_{ст} \cdot S_{ок} = 8 \text{ см}^4$; $S_{ст} = 2 \text{ см}^2$; $S_{ок} = 4 \text{ см}^2$, $H = 6,5$ мм.

Расчет обмоток.

Вычислим ЭДС одного витка по формуле:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{ст} \cdot k_c \cdot 10^{-4}$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 2 \cdot 0,96 \cdot 10^{-4} = 0,0537 \text{ В}$$

Рассчитаем приблизительное падение напряжение на об-



Основы проектирования приборов и систем

мотках:

$$\Delta U \approx 1,5 \cdot U \cdot j \cdot a \cdot 10^{-3} / e$$

$$\Delta U_1 \approx 1,5 \cdot 220 \cdot 3,9 \cdot 1,25 / (1000 \cdot 0,0537) = 29,95B$$

$$\Delta U_2 \approx 1,5 \cdot 5 \cdot 3,9 \cdot 1,25 / (1000 \cdot 0,0537) = 0,68 B.$$

$$\Delta U_3 \approx 1,5 \cdot 12 \cdot 3,9 \cdot 1,25 / (1000 \cdot 0,0537) = 1,63 B.$$

Вычисляем число витков первичной и вторичных обмоток:

$$W_1 = (U_1 - \Delta U_1) / e \tag{1.2}$$

$$W_1 = (220 - 29,95) / 0,0537 \approx 3539 \text{ вит.}$$

Для вторичных обмоток:

$$W_2 = (U_2 + \Delta U_2) / e \tag{1.3}$$

$$W_2 = (5 + 0,68) / 0,0537 \approx 105,8 \text{ вит.}$$

$$W_3 = (12 + 1,63) / 0,0537 \approx 263,9 \text{ вит.}$$

Рассчитываем диаметр обмоточного провода без изоляции

по формуле:

$$d_n = 1,13 \cdot (I_n / j)^{1/2}$$

$$d_1 = 1,13 \cdot (0,088 / 3,9)^{1/2} \approx 0,17 \text{ мм.}$$

$$d_2 = 1,13 \cdot (0,5 / 3,9)^{1/2} \approx 0,4 \text{ мм.} \approx 0,41 \text{ мм.}$$

$$d_3 = 1,13 \cdot (1,4 / 3,9)^{1/2} \approx 0,68 \text{ мм.} \approx 0,69 \text{ мм.}$$

Согласно табл. 5.5 выбираем марку и диаметр обмоточного провода в изоляции, для первичной и вторичных обмоток – ПЭЛ или ПЭВ-1:

$$d_1 = 0,19 \text{ мм.}; d_2 = 0,45 \text{ мм.}; d_3 = 0,74 \text{ мм.}$$

Уточняем число витков обмоток. Для этого вычислим уточненное значение падения напряжения на обмотках:

$$\Delta U = I \cdot r = 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot I \cdot \pi / d^2 \tag{1.4}$$

Рассчитаем среднюю длину витка, используя рис. 1.9.

$$l_{\text{ср.обм.}} = 2 \cdot a + 2 \cdot b + \pi \cdot c / 2$$

$$l_{\text{ср.обм.}} = 2 \cdot 1,25 + 2 \cdot 1,6 + 3,14 \cdot 1,0 / 2 = 7,27 \text{ см} = 0,073 \text{ м.}$$

Рассчитываем длину провода в обмотках:

$$l_n = W_n \cdot l_{\text{ср.обм.}}$$

$$l_1 = 3539 \cdot 0,073 = 257,2 \text{ м.}$$

$$l_2 = 105,8 \cdot 0,073 = 7,69 \text{ м.}$$

$$l_3 = 263,9 \cdot 0,073 = 18,46 \text{ м.}$$

Табл. 1.5 – Справочные данные обмоточного провода

1	2	3	4	ПЭЛ		ПЭВ-1		ПЭЛШО	
				5	6	7	8	9	10
Диаметр медной жилы, мм	Сечение медной жилы, мм ²	Сопротивление 1 м провода при 20°С, Ом	Допустимый ток при плотности 2А/мм ² , А	Диаметр провода, мм	Масса 100 м провода, г	Диаметр провода, мм	Масса 100 м провода, г	Диаметр провода, мм	Масса 100 м провода, г

Основы проектирования приборов и систем

0,05	0,002	9,29	0,004	0,365	1,9	0,07	1,9	0,12	3,3
0,06	0,0028	6,44	0,0057	0,075	2,7	0,085	2,8	0,13	4,2
0,07	0,0039	4,73	0,0077	0,085	3,6	0,095	3,8	0,14	5,3
0,08	0,005	3,63	0,01	0,095	4,7	0,105	4,9	0,15	6,5
0,09	0,0064	2,86	0,0127	0,105	5,9	0,115	6,2	0,16	7,9
0,1	0,0079	2,23	0,0157	0,12	7,3	0,125	7,5	0,18	9,3
0,11	0,0095	1,85	0,019	0,13	8,8	0,135	9,1	0,19	11
0,12	0,0113	1,55	0,0226	0,14	10,4	0,145	10,7	0,2	12,7
0,13	0,0133	1,32	0,0266	0,15	12,2	0,155	12,4	0,21	14,7
0,14	0,0154	1,14	0,0308	0,16	14,1	0,165	14,4	0,22	16,7
0,15	0,0177	0,99	0,0354	0,17	16,2	0,18	16	0,23	18,9
0,16	0,02	0,873	0,0402	0,18	18,4	0,19	18,8	0,24	21,2
0,17	0,0227	0,773	0,0454	0,19	20,8	0,2	21,2	0,25	23,7
0,18	0,0255	0,688	0,051	0,2	23,3	0,21	23,6	0,26	26,3
0,19	0,0284	0,618	0,0568	0,21	25,9	0,22	26,3	0,27	29
0,2	0,0314	0,558	0,0628	0,225	26,7	0,23	29	0,29	32,2
0,21	0,0346	0,507	0,0692	0,235	31,6	0,24	32	0,3	35,2
0,23	0,0416	0,423	0,0832	0,255	37,8	0,27	38,3	0,32	41,7
0,25	0,0491	0,357	0,0982	0,275	44,6	0,29	45,2	0,34	48,8
0,27	0,0573	0,306	0,115	0,31	52,2	0,31	52,6	0,37	56,9
0,29	0,0661	0,266	0,132	0,33	60,1	0,33	60,5	0,39	65,1
0,31	0,0755	0,233	0,151	0,35	68,9	0,35	68	0,42	74,2
0,33	0,0855	0,205	0,171	0,37	78	0,37	78	0,44	83,6
0,35	0,0962	0,182	0,192	0,39	87,1	0,39	87,1	0,46	93,5
0,38	0,1134	0,155	0,226	0,42	103	0,42	103	0,49	109
0,41	0,132	0,133	0,264	0,45	120	0,45	120	0,52	127
0,44	0,1521	0,115	0,304	0,49	138	0,48	138	0,55	145
0,47	0,1735	0,101	0,346	0,52	157	0,51	157	0,58	165
0,49	0,1855	0,093	0,378	0,54	171	0,53	171	0,6	179
0,51	0,2043	0,066	0,408	0,56	185	0,58	186	0,63	194
0,53	0,2206	0,0795	0,441	0,58	200	0,58	201	0,65	209
0,55	0,2376	0,0737	0,476	0,6	216	0,6	216	0,67	225
0,57	0,2552	0,0687	0,51	0,62	230	0,62	230	0,69	241
0,59	0,2734	0,0641	0,547	0,64	248	0,64	248	0,71	257
0,62	0,3019	0,058	0,604	0,67	273	0,67	274	0,75	283
0,64	0,3217	0,0545	0,644	0,69	291	0,69	292	0,76	301
0,67	0,3526	0,0497	0,705	0,72	319	0,72	319	0,79	330
0,69	0,3739	0,0469	0,748	0,74	338	0,74	338	0,81	349
0,72	0,4072	0,043	0,814	0,78	367	0,77	367	0,85	378
0,74	0,43	0,0407	0,86	0,8	390	0,8	390	0,87	402
0,77	0,4657	0,0376	0,93	0,83	421	0,83	422	0,9	434
0,8	0,5027	0,0348	1	0,86	455	0,86	455	0,93	468
0,83	0,5411	0,0324	1,08	0,89	489	0,89	489	0,96	507
0,86	0,5809	0,03	1,16	0,92	525	0,92	525	0,99	538
0,9	0,6362	0,0275	1,27	0,96	574	0,96	574	1,03	588
0,93	0,6793	0,0258	1,36	0,99	613	0,99	613	1,06	627
0,96	0,7238	0,0242	1,45	1,02	653	1,02	653	1,09	668

Основы проектирования приборов и систем

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7854	0,0224	1,57	1,07	710	1,08	712	1,14	727
1,04	0,8495	0,0206	1,7	1,12	764	1,12	770	1,18	783
10,8	0,9161	0,0191	1,83	1,16	827	1,16	829	1,21	844
1,12	0,9852	0,0178	1,97	1,2	886	1,2	892	1,26	906
1,16	1,057	0,0166	2,11	1,24	953	1,24	956	1,3	971
1,2	1,131	0,0155	2,26	1,28	1020	1,28	1030	1,34	1040
1,25	1,227	0,0143	2,45	1,33	1110	1,33	1110	1,39	1130
1,3	1,327	0,0132	2,65	1,38	1190	1,38	1200	1,44	1220
1,35	1,431	0,0123	2,86	1,43	1290	1,43	1290	1,49	1310
1,4	1,539	0,0113	3,08	1,48	1390	1,46	1390	1,54	1400
1,45	1,651	0,0106	3,3	1,53	1490	1,53	1490	1,59	1500
1,5	1,767	0,0098	3,53	1,58	1590	1,58	1590	1,86	1620
1,58	1,911	0,0092	3,82	1,84	1720	1,64	1720	1,72	1750
1,62	2,06	0,0085	4,12	1,71	1850	1,7	1850	1,78	1880

По формуле 1.4 вычисляем уточненные значения падения напряжения на обмотках трансформатора:

$$\Delta U_1 = 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot 0,088 \cdot 257,2 / 0,17^2 = 17,6 \text{ В.}$$

$$\Delta U_2 = 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 7,69 / 0,41^2 = 0,514 \text{ В.}$$

$$\Delta U_3 = 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1,4 \cdot 18,46 / 0,69^2 = 1,22 \text{ В.}$$

С учетом полученных значений вычислим уточненное число витков первичной и вторичных обмоток по формулам 1.2 и 1.3:

$$W_1 = (220 - 17,6) / 0,0537 \approx 3770 \text{ вит.}$$

$$W_2 = (5 + 0,514) / 0,0537 \approx 102 \text{ вит.}$$

$$W_3 = (12 + 1,22) / 0,0537 \approx 246 \text{ вит.}$$

Рассчитываем массу провода обмоток (погонную массу провода - m_n для обмоток подставляем согласно диаметру d_n провода обмотки n из табл. 1.5):

$$M = l \cdot m$$

$$M_1 = 257,2 \cdot 20,8 / 100 = 54 \text{ г.}$$

$$M_2 = 7,69 \cdot 1 \cdot 20 / 100 = 9,2 \text{ г.}$$

$$M_3 = 18,46 \cdot 338 / 100 = 62 \text{ г.}$$

Массу магнитопровода определяем из таб. 1.2: $M_M = 188 \text{ г.}$

Масса трансформатора без учета массы деталей крепления равна:

$$M = M_M + M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_4$$

$$M = 188 + 54 + 9,2 + 62 = 313 \text{ г.}$$

Максимальные размеры (по рис. 1.7 и 1.9):

$$(b + c) \times (a + c) \times H$$

$$26 \times 22,5 \times 65 \text{ мм.}$$

Коэффициент трансформации для 2 и 3 обмоток вычисляем по формуле:

$$k_2 = W_1 / W_2 = 3770 / 102 = 36,96$$

$$k_3 = W_1 / W_3 = 3770 / 246 = 15,33$$

Расчет мощности потерь.

Потери в магнитопроводе равны:

$$P_{ст.} = M_m \cdot P_{уд.}$$

где $P_{уд.}$ – удельные потери в магнитопроводе. Выбираются из табл. 1.3. Для магнитопровода из стали 3414, с толщиной ленты равной 0,35мм., $P_{уд.} = 1,1$ Вт/кг.

$$P_{ст.} = 0,188 \cdot 1,1 = 0,207 \text{ Вт.}$$

Потери в обмотке – на активном сопротивлении проводов вычисляется по формуле:

$$P_m = (I'_1)^2 \cdot r_1 + I_2^2 \cdot r_2 + I_3^2 \cdot r_3 + \dots + I_n^2 \cdot r_n \quad (1.5)$$

где $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ – активное сопротивление первичной и вторичных обмоток; I'_1 – ток первичной обмотки с учетом потерь.

Определяем активное сопротивление обмоток:

$$r_1 = k_1 \cdot r_{1м}$$

$$r_1 = 257,2 \cdot 0,773 = 199 \text{ ом.}$$

$$r_2 = 7,69 \cdot 0,133 = 1,02 \text{ ом.}$$

$$r_3 = 18,46 \cdot 0,0469 = 0,86 \text{ ом.}$$

где r_m – погонное сопротивление проводов, выбирается для каждой обмотки по табл. 1.5.

Пересчитаем ток вторичных обмоток в ток первичной обмотки:

$$I_{1(2)} = I_2/k_2 + I_3/k_3 + \dots + I_n/k_n$$

$$I_{1(2)} = 0,5/36,96 + 1,4/15,33 = 0,104 \text{ А.}$$

Ток первичной обмотки с учетом потерь равен:

$$I'_1 = I_{1(2)} / \eta$$

$$I'_1 = 0,104 / 0,89 = 0,118 \text{ А}$$

где $\eta = 0,89$ – КПД трансформатора из табл. 1.4 для мощности 20 Вт.

Потери в обмотках равны (1.5) :

$$P_m = 0,118^2 \cdot 199 + 0,5^2 \cdot 1,02 + 1,4^2 \cdot 0,86 = 4,71 \text{ Вт.}$$

Полная мощность трансформатора с учетом потерь равна:

$$P_{тр.} = U_1 \cdot I'_1$$

$$P_{тр.} = 220 \cdot 0,118 = 25,9 \text{ Вт.}$$

КПД трансформатора рассчитываем по формуле:

$$\eta = 1 - (P_{ст.} + P_m) / (P_{тр.} + P_{ст.} + P_m)$$

$$\eta = 1 - (0,207 + 4,71) / (25,9 + 4,71 + 0,207) = 0,84$$

Изготовление трансформатора. Расположение катушек показано на рис. 1.9. Трансформатор имеет две катушки, расположенные на стержнях магнитопровода. Необходимо изготовить две катушки, каждая из которых содержит половину витков первичной и каждой вторичной обмоток.

$$W'_1 = W_1/2$$



Основы проектирования приборов и систем

$$W'_1 = 3770/2 = 1885 \text{ вит.} \quad d_1 = 0,19 \text{ мм (ПЭЛ)}$$

$$W'_2 = 102/2 = 51 \text{ вит.} \quad d_2 = 0,45 \text{ мм. (ПЭЛ)}$$

$$W'_3 = 246/2 = 123 \text{ вит.} \quad d_3 = 0,74 \text{ мм. (ПЭЛ)}$$

Поскольку трансформатор имеет малую мощность и габариты, катушки можно изготовить бескаркасными. Толщина катушки $b \leq c/2 = 10/2 = 5 \text{ мм.}$, её высота $h_k \leq 40 \text{ мм.}$

Число витков в слоях первичной и вторичных обмоток:

$$n = (h - 1,5)/d$$

$$n_1 = (40 - 1,5)/0,19 = 202 \text{ вит.}$$

$$n_2 = (40 - 1,5)/0,45 = 85 \text{ вит.}$$

$$n_3 = (40 - 1,5)/0,74 = 52 \text{ вит.}$$

Определяем число слоев:

$$n_{\text{сл}} = W'/n$$

$$n_{1\text{сл}} = 1885/202 = 9 \text{ слоев} + 67 \text{ витков.}$$

$$n_{2\text{сл}} = 51/85 = 0 \text{ слоев} + 51 \text{ витков.}$$

$$n_{3\text{сл}} = 123/52 = 2 \text{ слоя} + 19 \text{ витков.}$$

Обмотки наматывают на деревянной оправке, изготовленной в точном соответствии с размерами участка магнитопровода, на котором будут расположены катушки (12,5x16x40 мм). К торцам оправки прикрепляют щечки.

Обычно между слоями обмотки прокладывают дополнительную бумажную изоляцию. Чаще всего для изолирования обмоток от магнитопровода и между собой применяют трансформаторную бумагу толщиной 0,1 мм. Рассчитаем максимальное напряжение между двумя соседними слоями первичной обмотки:

$$U_{\text{сл.}} = 2 \cdot n_1 \cdot e,$$

$$U_{\text{сл.}} = 2 \cdot 202 \cdot 0,0537 = 21,7 \text{ В.}$$

Поскольку напряжение между слоями небольшое, дополнительную изоляцию можно укладывать через слой или сделать ее более тонкой, например, использовать конденсаторную бумагу. Между первичной и вторичными обмотками следует поместить экранирующую обмотку — один незамкнутый виток тонкой медной фольги или один слой обмоточного провода, которая препятствует проникновению помех из сети во вторичные обмотки и наоборот.

Оправку обматывают тремя слоями бумажной ленты (рисунок 1.12), лепестки ленты приклеивают к щечкам. Затем наматывают первичную обмотку, прокладывая каждый слой изоляцией. Между первичной, экранирующей и вторичными обмотками прокладывают один-два слоя изоляции. Общая толщина изготовленных катушек:

$$S = n_{\text{изол.1}} \cdot S_{\text{изол.1}} + n_{\text{изол.2}} \cdot S_{\text{изол.2}} + 0,93 \cdot (S_{\text{экр}} + (n_{1\text{сл}} + 1) \cdot d_1 +$$

$$(n_{\text{2сл}} + 1) \cdot$$

$$d_2 + \dots + (n_{\text{псл}} + 1) \cdot d_n),$$

где $n_{\text{изол.}}$ – количество слоев изоляции в катушке;

$S_{\text{изол.}}$ - толщина слоя изоляции;

$S_{\text{экр}}$ - толщина экрана;

В нашем случае согласно рекомендациям (изоляцию укладываем через слой) : $n_{\text{изол.1}} = 3+1+1+1 = 6$; $S_{\text{изол.1}} = 0,1$ мм.; $S_{\text{экр}} = 0,12 \dots 0,2$ мм. = $0,12$ мм.; $n_{\text{изол.2}} = 8+1 = 9$; $S_{\text{изол.2}} = 0,05$ мм.;

В силу того что вторичные и первичные обмотки имеют не полные слои, то в результате дополнения обмоток толщиной слоя в $0,45$ мм можно пренебречь.

Находим:

$$S = (6 \cdot 0,1 + 9 \cdot 0,05 + 0,93 \cdot (0,12 + 10 \cdot 0,19 + 1 \cdot 0,45 \cdot 0 + 3 \cdot 0,74)) = 4,99 \text{ мм.}$$


Рис. 5.12 – Бумажная лента.

Проверка трансформатора. Собранный трансформатор сначала проверяют в режиме холостого хода — без нагрузки. При сетевом напряжении 220 В ток в первичной обмотке:

$$I_1 = I_{\text{xx}} = P_{\text{ст}} / U_1,$$

$$I_{\text{xx}} = 0,207 / 220 = 0,94 \text{ мА}$$

Напряжение на вторичных обмотках в режиме холостого хода:

$$U_{\text{xx}} = U_1 / k,$$

$$U_{2\text{xx}} = 220 / 36,96 = 5,95 \text{ В.}$$

$$U_{3\text{xx}} = 220 / 15,33 = 14,35 \text{ В.}$$



ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ 1.

Рассчитать источник питания с параметрами выходного напряжения, указанными в табл. 1.6. Для всех вариантов $U_c = U_1 = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Табл. 1.6 – Варианты проектных заданий

Вар.	$U_{нр}$, В	$I_{нр}$, А	$K_{п}$	Вар.	$U_{нр}$, В	$I_{нр}$, А	$K_{п}$
1	10	1	0,05	26	5	0,31	0,1
2	15	0,25	0,03	27	10	0,55	0,012
3	25	1,5	0,05	28	12	0,4	0,04
4	30	0,5	0,07	29	15	1,35	0,08
5	18	1,25	0,08	30	18	0,9	0,02
6	20	0,65	0,05	31	16	1,1	0,05
7	25	1,45	0,04	32	21	0,5	0,06
8	16	0,75	0,04	33	19	0,7	0,07
9	21	0,55	0,05	34	34	1,8	0,01
10	13	1,25	0,03	35	28	1,6	0,09
11	17	1,1	0,05	36	15	1,2	0,04
12	25	0,6	0,07	37	31	1,4	0,05
13	15	0,95	0,08	38	40	0,65	0,07
14	9	0,85	0,04	39	26	2,1	0,05
15	8	0,32	0,04	40	20	0,9	0,04
16	14	1	0,03	41	24	0,75	0,03
17	25	0,46	0,07	42	12	0,85	0,07
18	19	0,5	0,08	43	16	1,25	0,05
19	24	0,85	0,04	44	18	1,6	0,09
20	25	1,5	0,05	45	7	2	0,05
21	14	2	0,01	46	14	1,75	0,12
22	13	1,3	0,02	47	21	1	0,024
23	21	1,25	0,05	48	15	1,6	0,03
24	9	1	0,07	49	9	1,2	0,07
25	6	1,75	0,01	50	4	3	0,09



ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 1.

1. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных схем. М.: Высшая школа, 1991.
2. Китаев В.Е., Бокуняев А.А., Колканов М.Ф. Расчет источников электропитания устройств связи. – М.: Радио и связь, 1993.
3. Горский А.Н. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. – М.: Радио и связь, 1988.
4. Сидоров И.Н. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники. Справочник. – М.: Радио и связь, 1989.