

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Н.С. Легостаев

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие

Томск
Издательство ТУСУРа
2019

Легостаев, Николай Степанович

Магнитные элементы электронных устройств: учеб.-метод. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. 2019. – 146 с.

Пособие содержит задачи, решение которых позволяет глубже понять физические закономерности, определяющие свойства и поведение магнитных элементов в функциональных узлах силовой электроники. Задачи для самостоятельного решения снабжены ответами в виде общего выражения или конечного результата вычисления. Приведены методики расчета конструктивных и электромагнитных параметров сглаживающих дросселей, высокочастотных дросселей переменного тока и высокочастотных трансформаторов функциональных узлов энергетической электроники.

Даны рекомендации по самостоятельному изучению теоретического материала.

Для студентов, обучающихся по федеральному государственному образовательному стандарту ФГОС++ – программе бакалавриата по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», имеющей направленность (профиль) «Промышленная электроника».

© Легостаев Н. С., 2019
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники , 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ	
1.1. Теоретические основы проектирования магнитных элементов	8
1.2. Конструкции магнитопроводов магнитных элементов	17
1.3. Конструкции обмоток магнитных элементов	24
1.4. Эффективные параметры магнитных элементов	28
2. ДРОССЕЛИ	
2.1. Параметры сглаживающих дросселей	34
2.2. Дроссели переменного тока	39
3. ТРАНСФОРМАТОРЫ	
3.1. Эквивалентная схема трансформатора	42
3.2. Электромагнитные и геометрические соотношения в трансформаторах	49
4. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	
4.1. Методика расчета конструктивных и электромагнитных параметров сглаживающего дросселя	57
4.2. Методика расчета конструктивных и электромагнитных параметров дросселя переменного тока	69
4.3. Методика расчета конструктивных и электромагнитных параметров трансформатора для напряжения прямоугольной формы	75
4.4. Методика расчета трансформатора двухтактного мостового высокочастотного транзисторного преобразователя	87
4.5. Методика расчета трансформатора однотактного обратного преобразователя	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
ЛИТЕРАТУРА	124
Приложение А. Конструктивные компоненты магнитных элементов ...	125
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	144

ВВЕДЕНИЕ

Предметом дисциплины «Магнитные элементы электронных устройств» являются методы анализа, расчета, конструирования и технологии изготовления магнитных элементов электронных устройств.

Цель преподавания дисциплины – изучение свойств, статистических и динамических характеристик и параметров магнитных элементов (МЭ), как функциональных элементов электронных устройств.

Задачи дисциплины: обеспечить знания по устройству, принципу действия и электромагнитным свойствам типовых классов магнитных элементов – высокочастотных трансформаторов и дросселей.

Дисциплина «Магнитные элементы электронных устройств» относится к модулю Б1.В (часть, формируемая участниками образовательных отношений) основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программе бакалавриата по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», имеющей направленность (профиль) «Промышленная электроника».

Процесс изучения дисциплины по ФГОС++ направлен на формирование следующих компетенций:

– способностью учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ОПК-7);

– способностью строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-1);

– готовностью выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-5).

В результате изучения дисциплины следует:

– знать принцип действия, основные характеристики и параметры магнитных элементов электронных устройств различного функционального назначения; методики проектирования, расчета, конструирования и модернизации магнитных элементов с оптимальными параметрами с использованием систем автоматизированного проектирования и компьютерных систем; технические характеристики и экономические показатели отечественных и зарубежных разработок в области создания магнитных элементов электронной техники.

– уметь рассчитывать электромагнитные, конструктивные и тепловые режимы магнитных элементов электронной техники; выполнять математическое моделирование магнитных элементов с целью оптимизации их параметров; проводить экспериментальные исследования магнитных элементов.

– владеть методами расчета электромагнитных и конструктивных параметров магнитных элементов основных функциональных узлов энергетической электроники; методиками проведения эксперимента по исследованию характеристик магнитных элементов на соответствие техническому заданию.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Общие положения проектирования магнитных элементов электронных устройств

Необходимо знать теоретические положения проектирования магнитных элементов – закон полного тока и закон электромагнитной индукции, изменение магнитной индукции во времени для напряжения прямоугольной формы, изменение магнитного состояния магнитопроводов при намагничивании постоянным и переменным магнитными полями. Следует знать термины и определения, необходимые для глубокого понимания процессов в электромагнитных цепях с магнитным сердечником и формирования языка общения на профессиональном уровне.

Необходимо знать весь спектр современных магнитных материалов, параметры магнитных материалов, конструкции магнитопроводов магнитных элементов из монолитных металлических материалов и оксидных магнитных материалов. Особое внимание следует уделить конфигурациям ферритовых сердечников и сердечникам из порошковых материалов.

Следует знать конструкции обмоток магнитных элементов и марки медных обмоточных проводов с эмалевой изоляцией. Необходимо знать высокочастотные эффекты в обмотках магнитных элементов и методы снижения дополнительных потерь в обмотках высокочастотных магнитных элементов. Важно понимание согласного и встречного расположения обмоток на магнитопроводе. Не менее важно уметь по расположению обмоток определять положительные направления токов обмоток, а также направления электродвижущей силы и электродвижущей силы взаимной индукции.

Необходимо твердо знать основные конструктивные исполнения магнитных элементов, основные геометрические показатели магнитных элементов, уметь определять геометрические показатели.

Дроссели

Следует знать основные виды дросселей и их отличительные особенности, а также параметры высокочастотных дросселей, необходимость введения в магнитопровод дросселя немагнитного зазора и влияние немагнитного зазора на параметры дросселя.

Необходимо знать основные шаги, сопровождающие расчет электромагнитных и конструктивных параметров высокочастотных дросселей. Следует также знать, что если расчет дросселя проводить только исходя из энергоемкости, то это может привести к недопустимо низкой добротности или недопустимо большим потерям мощности.

Особое внимание следует уделить методике определения мощности потерь в сердечнике дросселя. Важно знать зависимость полных потерь в функции частоты и функции магнитной индукции.

Трансформаторы функциональных узлов энергетической электроники

Необходимо знать параметры трансформаторов и их физический смысл, эквивалентные схемы трансформаторов, уметь определять параметры высокочастотных трансформаторов. Следует знать режимы работы трансформаторов функциональных узлов энергетической электроники.

Необходимо знать основные шаги, сопровождающие расчет электромагнитных и конструктивных параметров высокочастотных трансформаторов напряжения, трансформаторов тока и импульсных трансформаторов. Особое внимание следует уделить методике расчета трансформатора для напряжения прямоугольной формы высокой частоты и рекомендациям по конструированию трансформаторов.

Стандартные ряды отечественных и зарубежных магнитных элементов

Следует знать стандартный ряд дросселей серии Д, трансформаторов серий ТПП и ТАН, трансформаторы и дроссели научно-производственного предприятия ГАММАМЕТ, планарные трансформаторы фирм Himag Solutions и Zettler Magnetics, индуктивные компоненты компании Premo.

В качестве дополнительной литературы настоятельно рекомендуется использовать электронные ресурсы Internet: архив журнала “Силовая электроника” (www.power-e.ru/archive.php); архив журнала “Компоненты и технологии” (www.compitech.ru/html.cgi/arhiv).

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

1.1 Теоретические основы проектирования магнитных элементов

Теория и расчет магнитных элементов базируются на двух законах электромагнетизма, один из которых *закон полного тока*, а другой – *закон электромагнитной индукции*. Существенную роль играет также *уравнение непрерывности магнитного потока* в магнитопроводе магнитного элемента ($\operatorname{div} B = 0$).

Математически закон полного тока (*линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, равен алгебраической сумме токов, проходящих сквозь поверхность, ограниченную этим контуром*) записывается в виде

$$\int_{\ell} H d\ell = \sum i = I.$$

Если ток i протекает по обмотке с числом витков w , то

$$\int_{\ell} H d\ell = w i.$$

Величину $w \cdot i$ называют магнитодвижущей силой (м.д.с.) или намагничивающей силой $F = \sum i = w \cdot i$.

Магнитодвижущая сила создает магнитный поток $\Phi = \int_S B \cdot dS$ вектора магнитной индукции B , пронизывающий поверхность S .

Для однородных и неразветвленных магнитопроводов, когда напряженность магнитного поля H вдоль контура является постоянной величиной и совпадает по направлению с касательной к контуру, имеет место соотношение $\int_{\ell} H d\ell = H \ell = F$, откуда получают известную формулу $H = \frac{F}{\ell} = \frac{w \cdot i}{\ell}$,

из которой следует, что *намагничивающая сила на единицу длины силовой ли-*

нии равна напряженности магнитного поля.

При всяком изменении магнитного потока в замкнутом проводящем контуре, пронизываемом этим потоком, индуцируется электродвижущая сила, величина которой определяется законом электромагнитной индукции. Например, в любой обмотке с числом витков w , расположенной на магнитопроводе, индуцируется электродвижущая сила e , равная

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Если за время τ магнитный поток изменился на величину $\Delta\Phi$, то *произведение средней электродвижущей силы, наведенной в контуре, на время перематывания равно изменению потокосцепления этого контура за время перематывания* – $e_{\text{ср}} \cdot \tau = w \cdot \Delta\Phi$.

1.1. В однородном магнитном поле напряженностью $H = 100 \frac{\text{кА}}{\text{м}}$ помещена прямоугольная рамка площадью $S = 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Плоскость рамки составляет с направлением магнитного поля угол $\beta = 60^\circ$. Определите магнитный поток Φ , пронизывающий рамку.

Решение. Условию задачи соответствует рисунок 1.1.

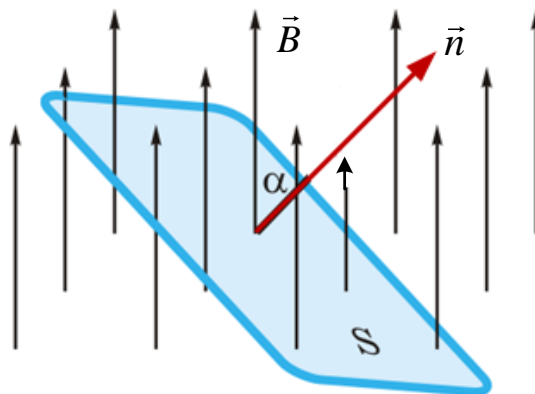


Рисунок 1.1 – Прямоугольная рамка в однородном магнитном поле

Магнитный поток Φ через плоский контур площадью S в случае однородного магнитного поля

$$\Phi = B \cdot S \cos \alpha, \quad (1.1)$$

где α – угол между вектором нормали \vec{n} и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Магнитная индукция B связана с напряженностью магнитного поля H магнитного поля соотношением

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \Big|_{\mu=1} = \mu_0 H, \quad (1.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Тогда магнитный поток Φ , пронизывающий рамку

$$\Phi = \mu_0 H \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (1.3)$$

Подставляя числовые значения в формулу (1.3), находим величину магнитного потока, пронизывающего рамку

$$\Phi = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 60^\circ = 628 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}.$$

1.2. Соленоид длиной $\ell = 0,5\text{ м}$ содержит $w = 1000$ витков. Определите магнитную индукцию B поля внутри соленоида, если сопротивление обмотки $R = 120\text{ Ом}$, а напряжение на концах обмотки соленоида $U = 60\text{ В}$ (рисунок 1.2).

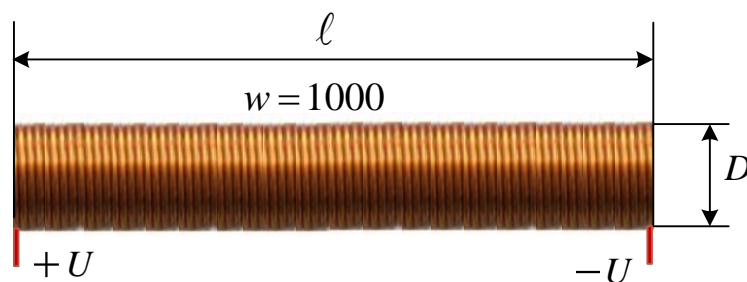


Рисунок 1.2 – Соленоид длиной ℓ

Решение. Соленоид – разновидность катушки индуктивности. Если длина соленоида ℓ много больше его диаметра D , то при протекании тока по обмотке внутри соленоида создается магнитное поле, близкое к однородному магнитному полю (рисунок 1.3).

Вектор магнитной индукции направлен вдоль оси соленоида и связан с направлением тока правилом правого винта.

Если пренебречь краевым эффектом, то магнитная индукция поля внутри соленоида определяется выражением

$$B = \mu_0 \mu \frac{w}{\ell} I \Big|_{\mu=1} = \mu_0 \frac{w}{\ell} I, \quad (1.4)$$

где I – сила тока в обмотке соленоида.

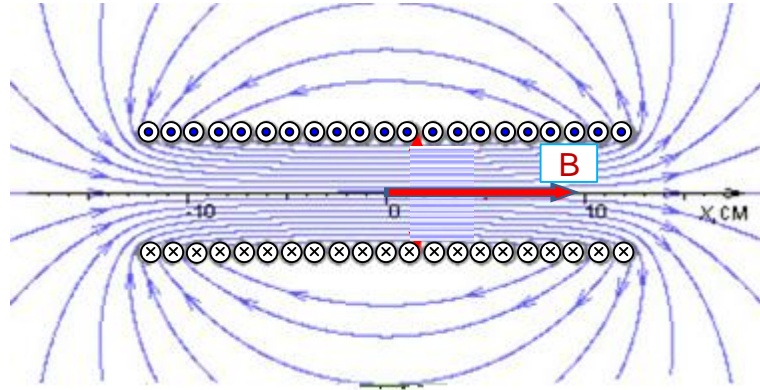


Рисунок 1.3 – Магнитное поле соленоида

Поскольку $I = \frac{U}{R}$, то магнитная индукция внутри соленоида определяется выражением

$$B = \mu_0 \frac{w U}{\ell R}. \quad (1.5)$$

Подставляя числовые значения, находим величину магнитной индукции внутри соленоида

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1000}{0,5} \cdot \frac{60}{120} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

1.3. В соленоиде длиной $\ell = 0,425$ м и диаметром $D = 5 \cdot 10^{-2}$ м создается магнитное поле напряженностью $H = 1,5 \frac{\text{кА}}{\text{м}}$. Определите разность потенциалов U на концах обмотки, если для нее использовать медный эмалированный провод круглого сечения диаметром $d = 1$ мм.

Р е ш е н и е. Разность потенциалов U на концах обмотки соленоида

$$U = R_{\text{об}} \cdot I, \quad (1.6)$$

где $R_{об}$ – сопротивление обмотки соленоида; I – сила тока в обмотке соленоида.

Сопротивление обмотки соленоида

$$R_{об} = \rho \frac{\ell_{пр}}{S_{пр}}, \quad (1.7)$$

где $\ell_{пр}$ – длина провода обмотки соленоида; $S_{пр}$ – площадь сечения жилы медного эмалированного провода круглого сечения; $\rho = 17 \cdot 10^{-9}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление меди.

Длина провода обмотки соленоида определяется произведением длины провода одного витка обмотки на количество витков

$$\ell_{пр} = \ell_{пр1} \cdot w = \pi D \cdot w. \quad (1.8)$$

Площадь сечения жилы медного эмалированного провода круглого сечения определяется выражением

$$S_{пр} = \frac{\pi d_{пр}^2}{4}, \quad (1.9)$$

где $d_{пр}$ – диаметр жилы медного эмалированного провода круглого сечения.

Предположим, что обмотки соленоида однослойная рядовая, витки которой располагаются в ряд вдоль ее оси с шагом, равным наружному диаметру провода. Тогда количество витков обмотки соленоида

$$w = \frac{\ell}{d_{пр.из}}, \quad (1.10)$$

где ℓ – длина соленоида; $d_{пр.из} = 1,062$ мм – максимальный наружный диаметр провода в изоляции (для стандартного отечественного медного эмалированного провода круглого сечения).

В итоге получаем формулу для расчета сопротивления обмотки соленоида в виде

$$R_{об} = 4\rho \frac{D \cdot \ell}{d_{пр}^2 \cdot d_{пр.из}}. \quad (1.11)$$

Среднеквадратичное значение тока в обмотке соленоида определим, используя закон полного тока

$$\oint_{\ell} H dl = \sum i. \quad (1.12)$$

Тогда $H\ell = wI$, откуда с учетом уравнения (1.10)

$$I = \frac{H\ell}{w} = H \cdot \ell \times \frac{d_{\text{пр.из}}}{\ell} = H \cdot d_{\text{пр.из}}. \quad (1.13)$$

Подставляя уравнения (1.11) и (1.13) в уравнение (1.6), получаем формулу для определения разности потенциалов на концах обмотки соленоида

$$U = 4\rho \frac{D \cdot \ell}{d_{\text{пр}}^2} H. \quad (1.14)$$

Числовое значение разности потенциалов на концах обмотки соленоида

$$U = 4 \cdot 17 \cdot 10^{-9} \times \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,425}{1 \cdot 10^{-3}^2} \times 1,5 \cdot 10^3 = 2,16 \text{ В.}$$

1.4. Сколько ампер-витков потребуется для создания магнитного потока $\Phi = 0,5 \cdot 10^{-3}$ Вб в соленоиде с ферритовым сердечником марки 2000НМ1 длиной $\ell = 1$ м и площадью поперечного сечения $S = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (рисунок 1.4).

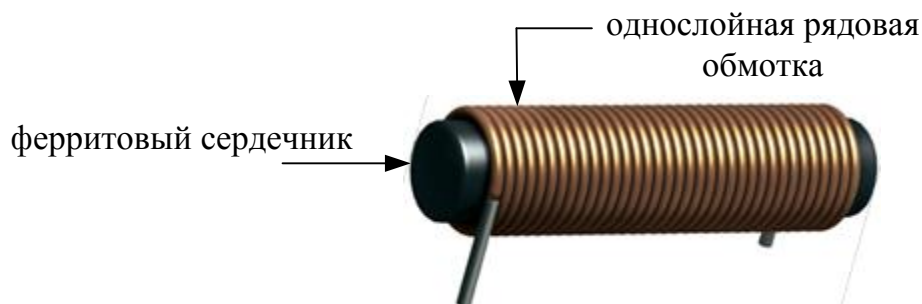


Рисунок 1.4 – Соленоид с ферритовым сердечником

Решение. При протекании тока по обмотке внутри соленоида создается магнитное поле, близкое к однородному магнитному полю (рисунок 1.3). Магнитный поток Φ в случае однородного поля определяется выражением

$$\Phi = B \cdot S \cos \alpha, \quad (1.15)$$

где α – угол между вектором нормали \vec{n} к плоскости витка обмотки соленоида и вектором магнитной индукции \vec{B} ; S – площадь витка соленоида.

Для соленоида $\alpha = 0$ (рисунок 1.5, б) и, следовательно, магнитный поток, создаваемый одним витком соленоида $\Phi = B \cdot S$.

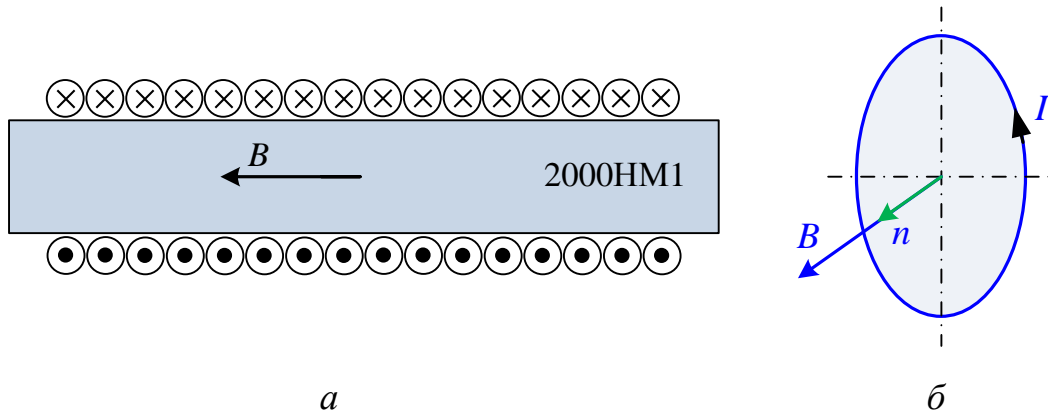


Рисунок 1.5 – Соленоид с ферритовым сердечником марки 2000HM1:
a – сечение обмотки соленоида; *б* – индукция магнитного поля витка обмотки соленоида

Магнитная индукция поля, создаваемая соленоидом в средней его части, определяется выражением

$$B = \mu_0 \mu \cdot w_\ell \cdot I, \quad (1.16)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_{\text{H}}}{\text{M}}$ – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость марганец-цинкового феррита 2000HM1; w_ℓ – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида; I – сила тока в одном витке обмотки соленоида.

Тогда $\Phi = \mu_0 \mu S w_\ell I$, откуда

$$w_\ell I = \frac{\Phi}{\mu_0 \mu S}. \quad (1.17)$$

Подставляя исходные данные, находим число ампер-витков, необходимых для создания в соленоиде магнитного потока заданной величины

$$w_\ell I = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 398 \text{ А} \cdot \text{виток}.$$

1.5. Определите индукцию и напряженность магнитного поля на оси тороидальной катушки без сердечника. Обмотка катушки содержит $w = 200$ витков, сила тока в обмотке $I = 5$ А, внешний диаметр тороидальной катушки $D_1 = 30 \cdot 10^{-2}$ м, внутренний диаметр – $D_2 = 20 \cdot 10^{-2}$ м.

Решение. Из условия симметрии следует, что силовые линии магнитной индукции тороидальной катушки представляют собой окружности (рисунок 1.6,а) и во всех точках этой окружности величина напряженности магнитного поля одинакова (рисунок 1.7). Средняя магнитная силовая линия $\ell_{\text{ср}}$ лежит на оси тороидальной катушки (рисунок 1.6,б).

В соответствии с законом полного тока

$$\int_{\ell} H dl = H \int_0^{\ell_{\text{ср}}} dl = H \int_0^{2\pi r} dl = 2\pi r H, \quad (1.18)$$

где r – радиус средней магнитной силовой линии; H – величина напряженности магнитного поля в точках средней магнитной силовой линии.

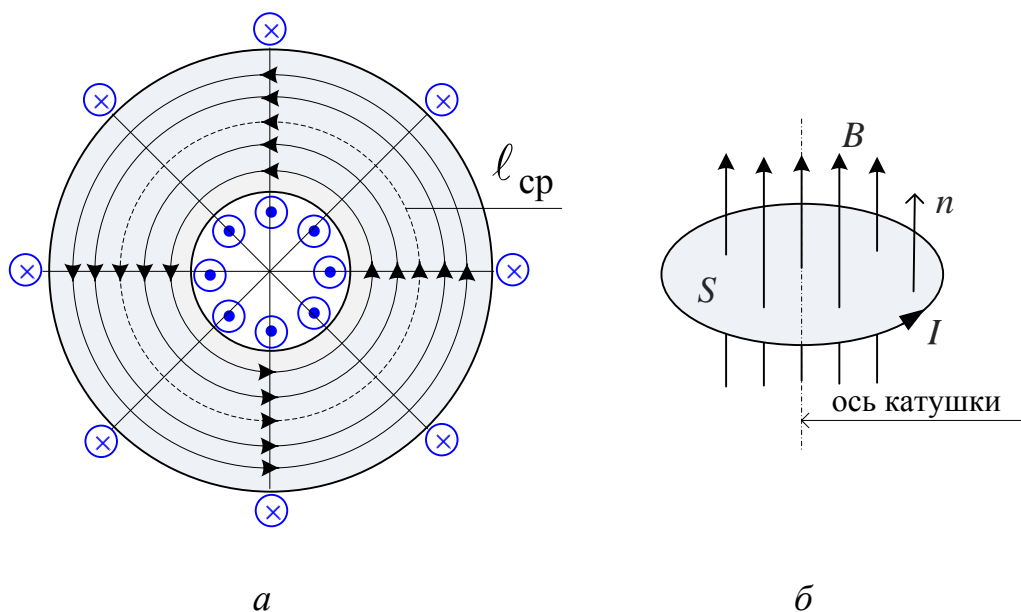


Рисунок 1.6 – Магнитное поле тороидальной катушки: а – силовые линии магнитной индукции; б – поток вектора магнитной индукции витка обмотки

С другой стороны, в соответствии с законом полного тока

$$\int_{\ell} H dl = \sum_{i=1}^w I_i = I \cdot w, \quad (1.19)$$

где I_i – сила тока в i -ом витке тороидальной катушки.

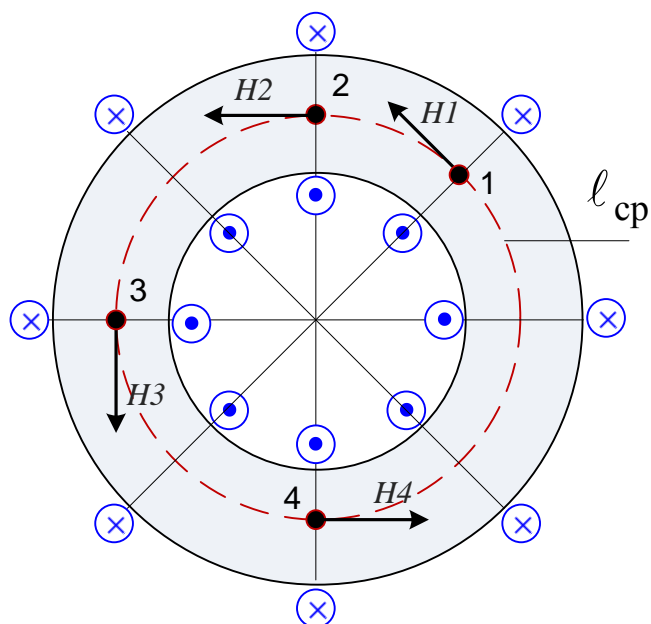


Рисунок 1.7 – Напряженность магнитного поля тороидальной катушки

Приравнивая правые части равенств (1.18) и (1.19), получаем $2\pi rH = I \cdot w$, откуда следует

$$H = \frac{I \cdot w}{2\pi r}. \quad (1.20)$$

Радиус средней магнитной силовой линии определяется внешним и внутренним диаметром тороидальной катушки по формуле

$$r = \frac{D_1 + D_2}{2}, \quad (1.21)$$

где D_1 – внешний диаметр тороидальной катушки; D_2 – внутренний диаметр тороидальной катушки.

Совместное решение (1.20) и (1.21) дает формулу для определения напряженности магнитного поля в точках, принадлежащих средней силовой линии магнитного поля в виде

$$H = \frac{I \cdot w}{\pi D_1 + D_2}. \quad (1.22)$$

Магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \Big|_{\mu=1} = \mu_0 \cdot H, \quad (1.23)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Для рассматриваемого случая соотношение (1.23) приобретает вид

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot w}{\pi D_1 + D_2}. \quad (1.24)$$

Подставляя числовые значения в уравнения (1.22) и (1.23), находим напряженность

$$H = \frac{5 \cdot 200}{\pi 30 \cdot 10^{-2} + 20 \cdot 10^{-2}} = 636 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

и индукцию магнитного поля на оси тороидальной катушки

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 636 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

1.2 Конструкции магнитопроводов магнитных элементов

Магнитопровод представляет собой магнитную систему, выполненную в виде определенной конструктивной единицы, то есть имеющей вполне определенные геометрические формы и размеры, обозначенные на чертеже.

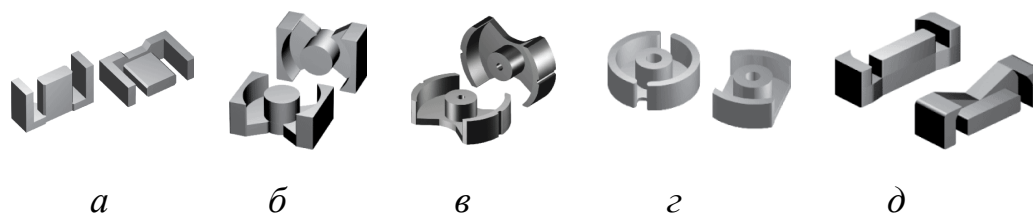
К магнитопроводам магнитных элементов предъявляются различные требования в зависимости от типа и функционального назначения магнитного элемента. Эти требования часто носят противоречивый характер, что и объясняет применение магнитопроводов различных форм и конструкций даже в однотипных магнитных элементах. Одним из важнейших требований, предъявляемых к форме и конструкции магнитопроводов, является сохранение для магнитопроводов магнитных свойств, присущих применяемому ферромагнетику.

Современная элементная база магнитопроводов представлена широким спектром магнитных материалов: *монолитные металлические материалы (электротехнические стали, железоникелевые и железокобальтовые сплавы,*

аморфные и нанокристаллические сплавы), магнитодиэлектрические и оксидные магнитные материалы.

Важнейшим этапом при разработке магнитного элемента является этап, связанный с корректным выбором материала и конфигурации сердечника с учетом технических и экономических факторов и, что не менее важно, с учетом режима работы магнитного элемента.

1.6. Определите сердечник конфигурации EFD, PM, CUT.



О т в е т: EFD – а, PM – в, CUT – г.

1.7. Требуется определить удельные потери мощности в сердечнике из материала MPP 26 μ фирмы Magnetics при магнитной индукции $B = 0,1$ Тл и частоте $f = 50$ кГц.

Р е ш е н и е. Удельные потери мощности в сердечнике определим по формуле аппроксимации удельных магнитных потерь [1, таблица 2.3]

$$p = \xi \cdot B_m^\alpha \cdot f^\beta, \quad (1.25)$$

где p – удельные потери мощности при магнитной индукции B_m [Тл] и частоте f [кГц], $\left[\frac{\text{мВт}}{\text{см}^3} \right]$; ξ, α, β – эмпирические коэффициенты в формуле аппроксимации удельных магнитных потерь в сердечнике.

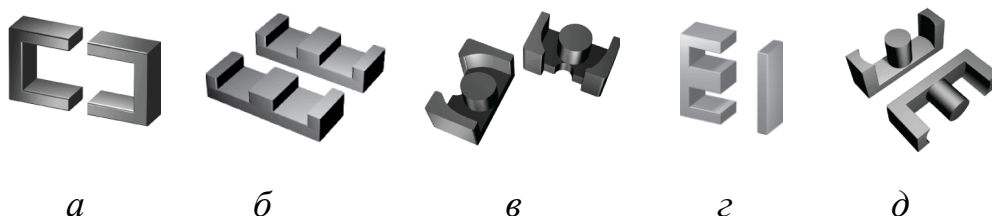
Для материала MPP 26 μ $\xi = 70,83$, $\alpha = 2,34$, $\beta = 1,65$ и формула (1.25) принимает вид

$$p = 70,83 \cdot B^{2,34} \cdot f^{1,65}. \quad (1.26)$$

Тогда удельные потери мощности в сердечнике из материала MPP 26 μ при магнитной индукции $B = 0,1$ Тл и частоте $f = 50$ кГц составят

$$p = 70,83 \cdot 0,1^{2,34} \cdot 50^{1,65} = 206 \left[\frac{\text{мВт}}{\text{см}^3} \right].$$

1.8. Определите сердечник конфигурации РЕЕ.



О т в е т: б

1.9. В магнитопроводе магнитного элемента суммарные удельные магнитные потери на гистерезис и на вихревые токи при частотах $f_1 = 10^3$ Гц и $f_2 = 2 \cdot 10^3$ Гц составляют соответственно $p_1 = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ и $p_2 = 6 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ (при неизменной максимальной магнитной индукции в ферромагнетике). Рассчитать магнитные потери на вихревые токи в образце на частоте $f_2 = 2 \cdot 10^3$ Гц.

Р е ш е н и е. Мощность, то есть энергия, расходуемая в единицу времени, обусловленная потерями на вихревые токи, определяется эмпирической формулой

$$P_{\text{в}} = \xi \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot V, \quad (1.27)$$

где ξ – коэффициент, пропорциональный удельной проводимости магнитного материала и зависящий от геометрической формы и размеров поперечного сечения намагничиваемого образца; B_m – максимальная магнитная индукция, достигаемая в одном цикле перемагничивания; f – частота перемагничивания; V – объем образца.

Мощность, обусловленная потерями на гистерезис

$$P_{\text{г}} = \eta \cdot B_m^n \cdot f \cdot V, \quad (1.28)$$

где η – коэффициент, зависящий от свойств магнитного материала; n – по-

казатель степени, принимающий значения от 1,6 до 2,0 в зависимости от значения B_m .

Суммарные *удельные* магнитные потери за *один* цикл перемагничивания линейно зависят от частоты

$$p = p_{\Gamma} + p_{\text{В}} = \frac{P_{\Gamma}}{V \cdot f} + \frac{P_{\text{В}}}{V \cdot f} = \eta \cdot B_m^n + \xi \cdot B_m^2 \cdot f. \quad (1.29)$$

Используя исходные данные $f_1 = 10^3$ Гц, $p_1 = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ и $f_2 = 2 \cdot 10^3$ Гц, $p_2 = 6 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$, получим уравнения, определяющие суммарные *удельные* магнитные потери за *один* цикл перемагничивания для частот f_1 и f_2 (при неизменной максимальной магнитной индукции в ферромагнетике)

$$\eta \cdot B_m^n + \xi \cdot B_m^2 \cdot f_1 = \frac{p_1}{f_1}, \quad \eta \cdot B_m^n + \xi \cdot B_m^2 \cdot f_2 = \frac{p_2}{f_2}. \quad (1.30)$$

или

$$\eta \cdot B_m^n + \xi \cdot B_m^2 \cdot 10^3 = \frac{2}{10^3}, \quad \eta \cdot B_m^n + \xi \cdot B_m^2 \cdot 2 \cdot 10^3 = \frac{6}{2 \cdot 10^3}. \quad (1.31)$$

Вычитая из одного уравнения другое, получаем

$$\xi \cdot B_m^2 = 10^{-6}.$$

Подставляя числовое значение $\xi \cdot B_m^2 = 10^{-6}$ в эмпирическую формулу (1.28), находим *удельные* магнитные потери на вихревые токи на частоте $f_2 = 2 \cdot 10^3$ Гц

$$p_{\text{В}} = \xi \cdot B_m^2 \cdot f_2^2 = 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3^2 = 4 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}.$$

1.10. В магнитопроводе магнитного элемента на частоте $f_1 = 50$ Гц *удельные* потери на гистерезис при индукции магнитного поля $B_{m_1} = 0,1$ Тл и индукции $B_{m_2} = 0,5$ Тл составляют $p_{\Gamma_1} = 0,15 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ и $p_{\Gamma_2} = 1,97 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ соответ-

ственно. Определить удельные потери $p_{Г3}$ на гистерезис на частоте $f_2 = 400$ Гц при индукции магнитного поля $B_{m3} = 0,6$ Тл.

Р е ш е н и е. Потери на гистерезис в единице объема ферромагнетика определяются выражением

$$p_{Г} = \eta \cdot B_m^n \cdot f, \quad (1.32)$$

где η – коэффициент, зависящий от свойств магнитного материала; B_m – максимальная магнитная индукция, достигаемая в одном цикле перемагничивания; f – частота перемагничивания.

Тогда на частоте f_1

$$\frac{p_{Г2}}{p_{Г1}} = \frac{\eta \cdot B_{m2}^n \cdot f_1}{\eta \cdot B_{m1}^n \cdot f_1} = \left(\frac{B_{m2}}{B_{m1}} \right)^n, \text{ откуда } n = \frac{\lg \left(\frac{p_{Г2}}{p_{Г1}} \right)}{\lg \left(\frac{B_{m2}}{B_{m1}} \right)} = \frac{\lg \left(\frac{1,97}{0,15} \right)}{\lg \left(\frac{0,5}{0,1} \right)} = 1,6.$$

Определим коэффициент η , учитывая, что этот коэффициент *не зависит* от частоты и магнитной индукции

$$\eta = \frac{p_{Г1}}{B_{m1}^n \cdot f_1} = \frac{0,15}{0,1^{1,6} \cdot 50} = 0,12 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Тл}}$$

или

$$\eta = \frac{p_{Г2}}{B_{m2}^n \cdot f_1} = \frac{1,97}{0,5^{1,6} \cdot 50} = 0,12 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Тл}}.$$

Поскольку коэффициент n также не зависит от частоты и магнитной индукции, то удельные потери $p_{Г3}$ на гистерезис на частоте $f_2 = 400$ Гц

$$p_{Г3} = \eta \cdot B_{m3}^n \cdot f_2 = 0,12 \cdot 0,6^{1,6} \cdot 400 = 21,2 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}.$$

1.11. Определить удельные потери мощности в сердечниках магнитных элементов из материала МРР 60 μ производства фирмы Magnetics при ча-

стоте $f = 100$ кГц и магнитной индукции $B = 0,2$ Тл.

Р е ш е н и е. Удельные потери мощности p в сердечниках из материалов производства фирмы Magnetics определяются по эмпирической формуле

$$p = \xi \times B^\alpha \times f^\beta, \quad (1.33)$$

где p – удельные потери мощности при магнитной индукции B_m [Тл] и ча-

стоте f [кГц], $\left[\frac{\text{МВт}}{\text{см}^3} \right]$; α, β – эмпирические коэффициенты в формуле ап-

проксимации удельных магнитных потерь в сердечнике.

Для материала МРР 60μ [1, таблица 2.3]: $\xi = 357,1$; $\alpha = 2,05$; $\beta = 1,12$.

Тогда удельные потери мощности

$$p = 357,1 \times 0,2^{2,05} \times 100^{1,12} = 2,29 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{МВт}}{\text{см}^3} \right].$$

1.12. Определить удельные потери мощности в сердечниках магнитных элементов из материала МРР 60μ производства фирмы Magnetics при частоте $f = 100$ кГц и магнитной индукции $B = 2$ кГс.

Р е ш е н и е. Удельные потери мощности p в сердечниках из материалов производства фирмы Magnetics определяются по эмпирической формуле

$$p = \xi \times B^\alpha \times f^\beta, \quad (1.34)$$

где p – удельные потери мощности при магнитной индукции B_m [кГс] и ча-

стоте f [кГц], $\left[\frac{\text{МВт}}{\text{см}^3} \right]$; α, β – эмпирические коэффициенты в формуле ап-

проксимации удельных магнитных потерь в сердечнике.

Для материала МРР 60μ [1, таблица 2.3]: $\xi = 0,625$; $\alpha = 2,24$; $\beta = 1,41$.

Используя числовые значения эмпирических коэффициентов ξ, α и β , определим удельные потери мощности в сердечниках магнитных элементов из материала МРР 60μ при частоте $f = 100$ кГц и магнитной индукции

$$B = 2 \text{ кГс}$$

$$p = 0,625 \times 2^{2,24} \times 100^{1,41} = 1,951 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{МВт}}{\text{см}^3} \right]$$

Обратите внимание – при одинаковых режимах работы сердечника (магнитная индукция $B = 0,2 \text{ Тл} = 2 \text{ кГс}$ и частота $f = 100 \text{ кГц}$) эмпирические формулы для удельных потерь мощности дают разный результат (см. решение задания 1.11). Погрешность в этом конкретном случае составляет $\frac{2,29 \cdot 10^3 - 1,951 \cdot 10^3}{1,951 \cdot 10^3} \times 100\% = 17,4\%$.

Поэтому особое внимание следует обращать на единицу измерения магнитной индукции, а затем на эмпирическую формулу (формулы разные даже для одного и того же материала). Для получения числового значения рекомендуется использовать Mathcad.

1.13. В магнитопроводе магнитного элемента, собранного из листов электротехнической стали толщиной $h_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, на частоте $f = 50 \text{ Гц}$ при амплитуде индукции магнитного поля $B_{m_1} = 0,8 \text{ Тл}$ потери на вихревые токи составляют $P_{в_1} = 2,4 \text{ Вт}$. Определить потери на вихревые токи, если магнитопровод той же формы и тех же геометрических размеров собрать из листов электротехнической стали той же марки толщиной $h_2 = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Р е ш е н и е. Мощность, расходуемая на вихревые токи в единице массы, связана с толщиной листа h соотношением

$$p_{в} = 1,64 \times \frac{B_m^2 \cdot f^2 \cdot h^2}{\gamma \cdot \rho}, \quad (1.35)$$

где B_m – амплитуда индукции магнитного поля в магнитопроводе магнитного элемента; f – частота перемагничивания магнитопровода магнитного элемента; h – толщина листа электротехнической стали; γ – плотность электротехнической стали; ρ – удельное электрическое сопротивление

электротехнической стали.

При толщине листов h_1 потери на вихревые токи определяются выражением

$$P_{B1} = 1,64 \times \frac{B_{m1}^2 \cdot f^2 \cdot h_1^2 \cdot M}{\gamma \cdot \rho}, \quad (1.36)$$

где M – масса магнитопровода магнитного элемента.

При толщине листов h_2 потери на вихревые токи определяются выражением

$$P_{B2} = 1,64 \times \frac{B_{m1}^2 \cdot f^2 \cdot h_2^2 \cdot M}{\gamma \cdot \rho}. \quad (1.37)$$

Тогда отношение мощностей потерь на вихревые токи

$$\frac{P_{B2}}{P_{B1}} = \frac{1,64 \cdot B_{m1}^2 \cdot f^2 \cdot h_2^2 \cdot M}{\gamma \cdot \rho} \cdot \left(\frac{1,64 \cdot B_{m1}^2 \cdot f^2 \cdot h_1^2 \cdot M}{\gamma \cdot \rho} \right)^{-1} = \frac{h_2^2}{h_1^2}. \quad (1.38)$$

Из уравнения (1.38) следует

$$P_{B2} = P_{B1} \cdot \frac{h_2^2}{h_1^2} = 2,4 \times \frac{0,35 \cdot 10^{-3}^2}{0,5 \cdot 10^{-3}^2} = 1,176 \text{ Вт}.$$

Таким образом, мощность потерь на вихревые токи при уменьшении толщины ленты электротехнической стали с 0,5 мм до 0,35 мм приводит к

уменьшению потерь на вихревые токи в 2,04 раза: $\frac{P_{B2}}{P_{B1}} = \frac{2,4}{1,176} = 2,04$.

1.3 Конструкции обмоток магнитных элементов

Основная часть обмотки – виток, который однократно охватывает магнитопровод и в котором при изменении магнитного потока индуцируется

электродвижущая сила $e = -\frac{d\Phi}{dt}$. Под обмоткой понимают сумму витков, а

электродвижущая сила обмотки с числом витков w увеличивается в w раз.

Тип обмотки магнитного элемента зависит от процесса укладки и закрепления одного или одновременно двух и более проводов на каркасах и сердечниках магнитного элемента.

Для обмоток магнитных элементов в основном применяют медные обмоточные провода с эмалевой изоляцией, медные провода с эмалево-волокнутой изоляцией и высокочастотные обмоточные провода. Обмотки магнитных элементов, за редким исключением, укладывают на намоточных каркасах.

При протекании по проводнику тока высокой частоты наблюдается неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника: плотность тока максимальна на поверхности проводника и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Это явление называется *скин-эффектом* или *поверхностным эффектом*. В обмотках высокочастотных магнитных элементов потери в обмотке начинают заметно увеличиваться, когда толщина проводника обмотки становится соизмерима с глубиной скин-слоя высокочастотного тока.

1.14. Определите глубину скин-слоя в медном проводе магнитного элемента при его работе на частоте $f = 100$ кГц и температуре перегрева $\Delta T = 50^\circ\text{C}$. Температура окружающей среды $T_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$.

Р е ш е н и е. Физический смысл глубины проникновения поля (глубины скин-слоя) – это расстояние, на котором плотность тока j уменьшается в $e = 2,72$ раза по отношению к значению плотности тока j_0 на поверхности проводника (рисунок 1.8).

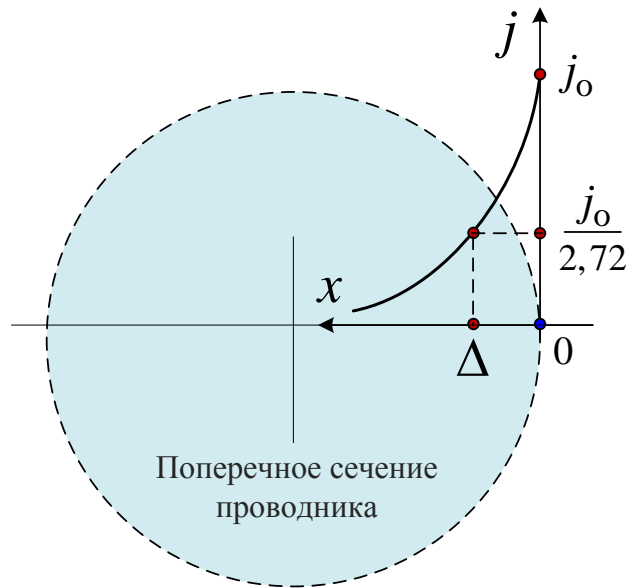


Рисунок 1.8 – Закон изменения плотности тока в проводе круглого сечения

Глубина скин-слоя определяется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}, \quad (1.39)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

$\sigma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость материала провода обмотки.

Величина удельной проводимости определяется выражением

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0 [1 + \alpha_\rho \cdot \Delta T]}, \quad (1.40)$$

где $\rho_0 = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное электрическое сопротивление меди при температуре $T_{\text{окр}} = 20^\circ \text{C}$; $\alpha_\rho = 4,3 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ – температурный коэффициент удельного сопротивления меди.

Тогда глубина скин-слоя в медном проводе при частоте $f = 100 \text{ кГц}$ и температуре перегрева $\Delta T = 50^\circ \text{C}$ составит

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho_0 [1 + \alpha_\rho \cdot \Delta T]}{\pi \cdot f \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{0,017 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 50]}{\pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 0,229 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

1.15. Определите диаметр d одиночной медной жилы (с эмалевой изоляцией) высокочастотного провода для обмотки магнитного элемента при частоте f тока в обмотке 75 кГц.

Р е ш е н и е. Диаметр d одиночной медной жилы (с эмалевой изоляцией) высокочастотного провода можно определить по формуле [1]

$$d \text{ мм} \leq \frac{1}{\sqrt{f} \text{ кГц}} \leq \frac{1}{\sqrt{75}} \leq 0,115 \text{ мм}. \quad (1.41)$$

1.16. Определите, во сколько раз сопротивление медного провода круглого сечения диаметром $d = 1$ мм на частоте $f = 1$ МГц больше сопротивления этого провода постоянному электрическому току.

Р е ш е н и е. Глубина Δ проникновения электромагнитного поля в проводник связана с физическими параметрами материала проводника соотношением

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f}}, \quad (1.42)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная; $\mu = 1$ – магнитная проницаемость меди (медь является диамагнетиком); f – частота переменного тока; $\rho = 17 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди.

Тогда для меди на частоте $f = 1$ МГц глубина проникновения электромагнитного поля

$$\Delta = \sqrt{\frac{17 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^6}} = 6,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (1.43)$$

Поскольку $\Delta \ll d$, имеет место сильно выраженный поверхностный эффект. В случае сильно выраженного поверхностного эффекта коэффициент увеличения сопротивления провода круглого сечения определяется выражением [1]

$$k_R = \frac{d}{4\Delta}, \quad (1.44)$$

где d – диаметр провода; Δ – расстояние, на котором плотность тока уменьшается в 2,72 раза по отношению к значению плотности тока на поверхности провода.

Сопротивление медного провода круглого сечения диаметром $d = 1$ мм на частоте $f = 1$ МГц больше сопротивления этого провода постоянному электрическому току в 3,8 раза – $k_R = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 6,57 \cdot 10^{-5}} = 3,8$.

1.17. Вычислить глубину Δ_{f_1} проникновения электромагнитного поля в медный проводник на частоте $f_1 = 400$ Гц и глубину Δ_{f_2} проникновения электромагнитного поля в медный проводник на частоте $f_2 = 100 \cdot 10^3$ Гц.

О т в е т: $\Delta_{f_1} = 3,283 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta_{f_2} = 0,207 \cdot 10^{-3}$ м.

1.4 Эффективные параметры магнитных элементов

При определении магнитных свойств сердечников на основе магнитных свойств материала можно пользоваться эффективными параметрами. При таком методе расчета в качестве сердечника берется идеальный кольцевой сердечник, причем такой, чтобы катушка на таком кольцевом сердечнике имела электрические характеристики, аналогичные электрическим характеристикам катушки с тем же числом витков на реальном сердечнике.

Магнитные свойства и размерные параметры такого идеального коль-

цевого сердечника называются эффективными параметрами и обозначаются индексом « e », добавляемым к обозначениям, установленным для всех этих свойств.

Согласно ГОСТ 28899 – 91 (МЭК 205 – 66) «Расчет эффективных параметров магнитных деталей» эффективные параметры: H_e – эффективная напряженность магнитного поля; B_e – эффективная магнитная индукция; μ_e – эффективная магнитная проницаемость; ℓ_e – эффективный путь магнитной линии; A_e – эффективная площадь поперечного сечения; V_e – эффективный объем сердечника.

Эффективные параметры можно рассчитать на основании размеров сердечника и свойств материала, допустив при этом: значение магнитного потока одинаково во всех сечениях сердечника (не происходит рассеяния потока); магнитный поток распределяется однородно по всему поперечному сечению сердечника. ГОСТ 28899 – 91 устанавливает единые правила расчета эффективных параметров замкнутых цепей из ферромагнитных материалов – кольцевых сердечников, замкнутых П-образных и Ш-образных сердечников прямоугольного и круглого сечения, а также броневого сердечника и квадратных сердечников – Кв-сердечников.

1.19. Определите эффективные параметры ферритового кольцевого сердечника $K32 \times 16 \times 8$ с прямоугольным поперечным сечением и острыми кромками – эффективную площадь поперечного сечения A_e , эффективный путь магнитной линии ℓ_e и эффективный объем V_e .

Р е ш е н и е. Если обмотка распределена равномерно по кольцевому сердечнику, то можно предположить, что линии магнитного потока в любой точке внутри кольцевого сердечника будут параллельны его поверхности. Рассеяния магнитного потока не происходит. Это оправдывает применение теоретически более правильного определения эффективных параметров кольцевых сердечников по ГОСТ 28899 – 91: кольцевых сердечников с пря-

моугольным поперечным сечением и острыми кромками, с прямоугольным поперечным сечением и скругленными кромками, с трапецидальным поперечным сечением и острыми кромками, а также кольцевых сердечников с трапецидальным поперечным сечением и скругленными кромками.

Согласно ГОСТ 28899 – 91 для кольцевого сердечника с прямоугольным сечением и острыми кромками эффективные параметры следует находить по формулам

$$A_e = \frac{C_1}{C_2}, \quad l_e = \frac{C_1^2}{C_2}, \quad V_e = l_e \cdot A_e = \frac{C_1^3}{C_2^2}, \quad (1.45)$$

где $C_1 = \frac{2\pi}{h \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}$, $C_2 = \frac{2\pi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{h^2 \cdot \ln^3 \frac{r_2}{r_1}}$ – постоянные кольцевого сердечника с

прямоугольным сечением и острыми кромками.

Обозначения, принятые для постоянных кольцевого сердечника с прямоугольным сечением и острыми кромками, представлены на рисунке 1.9.

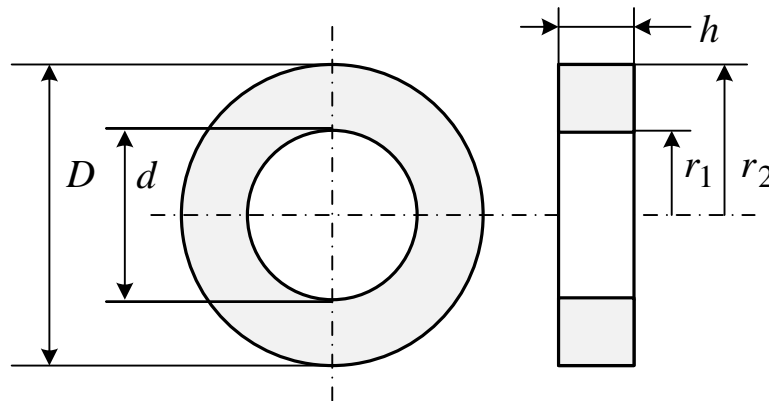


Рисунок 1.9 – Кольцевой сердечник с прямоугольным сечением и острыми кромками

Подставляя числовые значения $r_1 = \frac{d}{2} = \frac{16}{2} = 8$ мм, $r_2 = \frac{D}{2} = \frac{32}{2} = 16$ мм

(по практическим причинам размерные параметры обычно выражаются в миллиметрах), находим постоянные сердечника

$$C_1 = \frac{2\pi}{8 \cdot \ln \frac{16}{8}} = 1,13309 \text{ мм}^{-1}, \quad C_2 = \frac{2\pi \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{16} \right)}{8^2 \cdot \ln^3 \frac{16}{8}} = 0,01842 \text{ мм}^{-3}.$$

Тогда эффективная площадь поперечного сечения

$$A_e = \frac{C_1}{C_2} = \frac{1,13309}{0,01842} = 61,51 \text{ мм}^2, \text{ эффективный путь магнитной линии сердеч-$$

ника $\ell_e = \frac{C_1^2}{C_2} = \frac{1,13309^2}{0,01842} = 69,70 \text{ мм},$ эффективный объем сердечника

$$V_e = \ell_e \cdot A_e = 69,70 \cdot 61,51 = 4287,25 \text{ мм}^3.$$

1.20. Определите эффективные параметры замкнутого Ш-образного сердечника Ш12×20 с прямоугольным поперечным сечением – эффективную площадь поперечного сечения A_e , эффективный путь магнитной линии ℓ_e и эффективный объем V_e .

Р е ш е н и е. Согласно ГОСТ 28899 – 91 для замкнутого Ш-образного сердечника с прямоугольным поперечным сечением эффективные параметры следует находить по формулам

$$A_e = \frac{C_1}{C_2}, \quad \ell_e = \frac{C_1^2}{C_2}, \quad V_e = \ell_e \cdot A_e = \frac{C_1^3}{C_2^2}, \quad (1.46)$$

где $C_1 = \sum_{i=1}^5 \frac{\ell_i}{A_i}, \quad C_2 = \sum_{i=1}^5 \frac{\ell_i}{2A_i^2}$ – постоянные замкнутого Ш-образного сер-

дечника с прямоугольным поперечным сечением.

Для замкнутого Ш-образного сердечника с прямоугольным поперечным сечением числовые значения параметров ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 определяются геометрическими размерами сердечника (рисунок 1.10), а числовые значения параметров $\ell_4, \ell_5, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ связаны с геометрическими размерами сер-

дечника формулами

$$\begin{aligned} \ell_4 &= \frac{\pi}{8} p + h ; \ell_5 = \frac{\pi}{8} s + h ; A_1 = p \cdot q ; A_2 = q \cdot h ; \\ A_3 &= q \cdot s ; A_4 = \frac{A_1 + A_2}{2} ; A_5 = \frac{A_2 + A_3}{2}. \end{aligned} \quad (1.47)$$

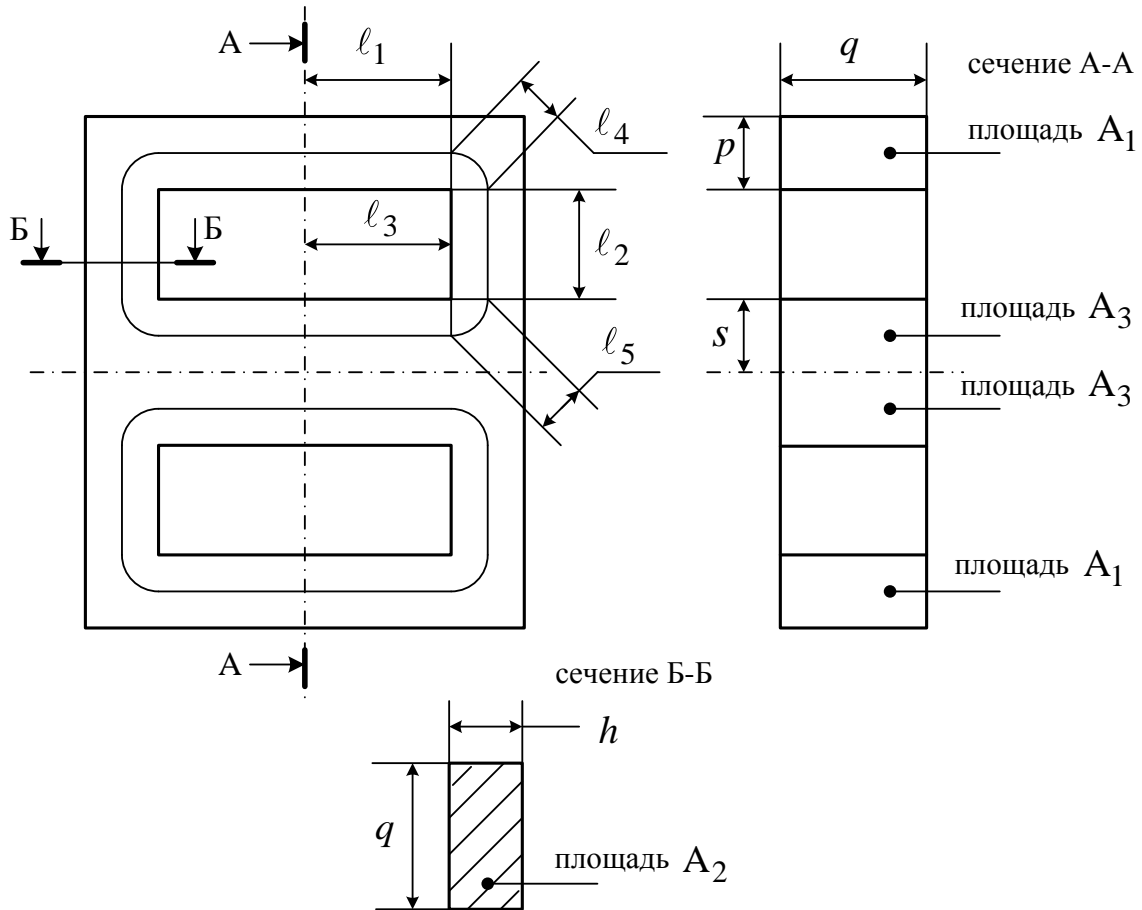


Рисунок 1.10 – Замкнутый Ш-образный сердечник с прямоугольным поперечным сечением

Для замкнутого Ш-образного сердечника Ш12×20 с прямоугольным поперечным сечением $q = 20$ мм, $p = 6$ мм, $s = 6$ мм, $h = 6$ мм, $l_1 = 15$ мм, $l_2 = 9$ мм; $l_3 = 15$ мм.

Тогда средняя длина магнитного потока на одном угловом участке $\ell_4 = \frac{\pi}{8} 6 + 6 = 4,71239$ мм, средняя длина магнитного потока на другом угловом участке $\ell_5 = \frac{\pi}{8} 6 + 6 = 4,71239$ мм, площадь $A_1 = 6 \cdot 20 = 120$ мм²,

площадь $A_2 = 20 \cdot 6 = 120 \text{ мм}^2$, площадь $A_3 = 20 \cdot 6 = 120 \text{ мм}^2$, площадь $A_4 = \frac{120+120}{2} = 120 \text{ мм}^2$, площадь $A_5 = \frac{120+120}{2} = 120 \text{ мм}^2$.

Постоянные замкнутого Ш-образного сердечника с прямоугольным поперечным сечением

$$C_1 = \sum_{i=1}^5 \frac{l_i}{A_i} = \frac{15}{120} + \frac{9}{120} + \frac{15}{120} + \frac{4,71239}{120} + \frac{4,71239}{120} = 0,40354,$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^5 \frac{l_i}{2A_i^2} = \frac{15}{2 \cdot 120^2} + \frac{9}{2 \cdot 120^2} + \frac{15}{2 \cdot 120^2} + \frac{4,71239}{2 \cdot 120^2} + \frac{4,71239}{2 \cdot 120^2} = 0,00168.$$

Тогда эффективная площадь поперечного сечения

$$A_e = \frac{C_1}{C_2} = \frac{0,40354}{0,00168} = 240 \text{ мм}^2, \text{ эффективный путь магнитной линии сердеч-$$

$$\text{ника } l_e = \frac{C_1^2}{C_2} = \frac{0,40354^2}{0,00168} = 96,9 \text{ мм}, \text{ эффективный объем сердечника}$$

$$V_e = l_e \cdot A_e = 96,9 \cdot 240,0 = 23256 \text{ мм}^3.$$

Следует отметить, что задачу определения эффективных параметров замкнутого Ш-образного сердечника с прямоугольным поперечным сечением можно упростить, если использовать формулы

$$l_e = 4l_1 + 2l_2 + 2l_4 + 2l_5, \quad A_e = 2 q \times s. \quad (1.48)$$

Для замкнутого Ш-образного сердечника Ш12×20 с прямоугольным поперечным сечением вычисления по формулам (1.48) дают следующие результаты: $l_e = 4 \cdot 15 + 2 \cdot 9 + 2 \cdot 4,71239 + 2 \cdot 4,71239 = 96,85 \text{ мм}$,

$$A_e = 2 \cdot 20 \times 6 = 240 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, определение эффективных параметров замкнутого Ш-образного сердечника с прямоугольным поперечным сечением по формулам, представленным в ГОСТ 28899 – 91, и формулам (1.48) дает одинаковый результат.

2 ДРОССЕЛИ

2.1. Параметры сглаживающих дросселей

В соответствии с установленной терминологией дросселями называют статические электромагнитные устройства, используемые, как правило, в качестве индуктивных сопротивлений. К числу основных видов дросселей относятся *дроссели переменного тока*, которые часто называют катушками индуктивности, *сглаживающие дроссели* и *дроссели насыщения*.

Если ток обмотки дросселя кроме переменной составляющей имеет постоянную составляющую, то такие дроссели называют сглаживающими.

Сглаживающие дроссели – компоненты преобразователей, предназначенные для уменьшения переменной составляющей напряжения или тока на входе или выходе преобразователя. *Особенностью сглаживающего дросселя является присутствие в токе обмотки дросселя, как переменной, так и постоянной составляющей одновременно.* Во избежание магнитного насыщения под действием постоянной составляющей тока *сердечник сглаживающего дросселя выполняется с немагнитным зазором.*

Для сглаживающих дросселей часто выбираются кольцевые ферритовые сердечники с зазором, а также порошковые сердечники, отличающиеся низкой стоимостью. Находят применение броневого и стержневые типы дросселей с дискретным зазором.

Задачей конструктивного расчета дросселей является определение основных геометрических размеров магнитопровода, числа витков обмотки, сечения проводов обмоток и типа проводов, а также величины воздушного зазора с учетом закона изменения тока дросселя $i(t)$.

Исходными данными для расчета дросселя являются индуктивность дросселя L , закон изменения тока $i(t)$, амплитуда пульсаций тока ΔI , частота пульсаций, перегрев ΔT . Основным требованием для расчета дросселей является получение заданной индуктивности намагничивания при заданном токе.

2.1. Магнитопровод из ферромагнетика с длиной средней линии $\ell_M = 125 \cdot 10^{-3}$ м имеет немагнитный зазор $\delta = 10^{-3}$ м. На магнитопроводе расположена обмотка с числом витков $w = 500$. При протекании в обмотке тока силой $I = 0,2$ А в зазоре создается магнитная индукция $B_\delta = 0,1$ Тл. Определить магнитную проницаемость μ ферромагнетика.

Решение. В соответствии с законом полного тока

$$H_M \cdot \ell_M + H_\delta \cdot \delta = w \cdot I, \quad (2.1)$$

где H_M – напряженность магнитного поля в материале магнитопровода; H_δ – напряженность магнитного поля в зазоре.

Так как силовые линии магнитной индукции непрерывны, то индукция B_M магнитного поля в материале магнитопровода равна индукции B_δ магнитного поля в зазоре

$$B_M = B_\delta. \quad (2.2)$$

Поскольку

$$B_M = \mu_0 \cdot \mu \cdot H_M \text{ и } B_\delta = \mu_0 \cdot H_\delta, \quad (2.3)$$

то, подставляя выражения (1.00) в формулу (1.00), получаем

$$\frac{B_M \cdot \ell_M}{\mu_0 \cdot \mu} + \frac{B_\delta \cdot \delta}{\mu_0} = w \cdot I,$$

откуда находим формулу для определения магнитной проницаемости μ ферромагнетика

$$\mu = \frac{B_M \cdot \ell_M}{\mu_0 \cdot w \cdot I - B_\delta \cdot \delta}. \quad (2.4)$$

Подставляя числовые значения в формулу (2.4), находим значение магнитной проницаемости μ ферромагнетика

$$\mu = \frac{0,1 \cdot 125 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0,2 - 0,1 \cdot 10^{-3}} = 488.$$

2.2. Требуется получить напряженность магнитного поля $H = 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ в соленоиде длиной $\ell = 20 \cdot 10^{-2}$ м и диаметром $D = 5 \cdot 10^{-2}$ м. Найти число ампер-витков $I \cdot w$, необходимое для этого соленоида, и разность потенциалов U , которую надо приложить к концам обмотки из медной проволоки диаметром $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Р е ш е н и е. Напряженность магнитного поля в соленоиде определяется выражением

$$H = \frac{w}{\ell} \cdot I, \quad (2.5)$$

откуда число ампер-витков $w \cdot I = H \cdot \ell = 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-2} = 200 \text{ А} \cdot \text{виток}$.

Разность потенциалов U определяется, согласно закону Ома, выражением $U = R \cdot I$. Учитывая, что $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, $\ell = \pi \cdot D \cdot w$, $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ и $w \cdot I = H \cdot \ell$, выражение для нахождения разности потенциалов U , которую необходимо приложить к концам обмотки соленоида, запишется в виде

$$U = \frac{4 \cdot H \cdot \ell \cdot \rho \cdot D}{d^2}, \quad (2.6)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление меди.

Подставляя числовые значения, находим величину разности потенциалов, которую необходимо приложить к обмотке соленоида

$$U = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-2} \cdot 17 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{0,5 \cdot 10^{-3}^2} = 2,72 \text{ В}.$$

2.3. Определить требуемое число витков дросселя индуктивностью $L = 70 \cdot 10^{-6}$ Гн на кольцевом сердечнике MPP125 R35,8×22,4×10,5 CO55324A2 фирмы Magnetics.

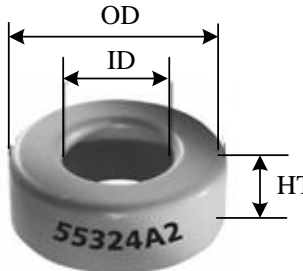
Р е ш е н и е. Требуемое число витков дросселя можно определить по формуле

$$w = \left[\frac{L}{A_L \cdot 10^{-9}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.7)$$

где A_L – величина индуктивности на виток, нГн ; L – индуктивность дросселя, Гн .

Из таблицы 2.1 находим величину индуктивности на виток $A_L = 117 \cdot 10^{-9}$ Гн для дросселя на кольцевом сердечнике MPP125 R35,8×22,4×10,5 CO55324A2 фирмы Magnetics.

Таблица 2.1 – Размерные и эффективные параметры кольцевого сердечника MPP125 R35,8×22,4×10,5 CO55324A2 фирмы Magnetics

Сердечник MPP125 R35,8×22,4×10,5 CO55324A2	OD max (мм)	ID min (мм)	HT max (мм)	W_a (см ²)	A_e (см ²)	ℓ_e см	V_e (см ²)	μ	A_L (нГн)
	36,7	22,4	10,5	3,64	0,678	8,98	6,088	125	117
<p>Примечание. Маркировка означает: CO – код разбраковки по A_L (сердечник с допуском по $A_L \pm 2\%$); 55 – код материала (MPP); 324 – код типоразмера и магнитной проницаемости (OD без покрытия – 35,8 мм; ID без покрытия – 22,4 мм; HT без покрытия – 10,5 мм; $\mu=125$); A2 – тип покрытия (стандартное эпоксидное покрытие).</p>									

Подставляя числовые значения, находим число витков дросселя

$$w = \left[\frac{70 \cdot 10^{-6}}{117 \cdot 10^{-9}} \right]^{\frac{1}{2}} = 24,46.$$

Таким образом, требуемое число витков дросселя $w = 25$ либо $w = 24$

(число витков магнитного элемента не может быть дробным числом).

2.4. Определить энергоемкость сглаживающего дросселя, по обмотке которого протекает ток, имеющий среднее по модулю переменную составляющую $I_{\sim} = 1$ А и постоянную составляющую $I_{=} = 5$ А. Индуктивность дросселя $L = 120 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Р е ш е н и е. Если по обмотке дросселя протекает ток, имеющий переменную I_{\sim} и постоянную $I_{=}$ составляющую, то энергоемкость дросселя определяют по формуле

$$W = L (I_{=}^2 + I_{\sim}^2) . \quad (2.8)$$

Подставляя числовые значения, находим энергоемкость сглаживающего дросселя

$$W = 120 \cdot 10^{-6} (5^2 + 1^2) = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} .$$

2.5. Определить число витков w обмотки сглаживающего дросселя. Дроссель выполнен на кольцевом сердечнике МРР 125 производства фирмы Magnetics. Эффективное сечение сердечника $W_a = 3,64 \text{ см}^2$. Диаметр провода с изоляцией $d_{\text{пр.из}} = 0,491 \text{ мм}$. Коэффициент заполнения обмоткой окна сердечника принять равным 0,2.

Р е ш е н и е. Число витков обмотки сглаживающего дросселя можно определить по формуле

$$w = \frac{4W_a \cdot k_{\text{ок}}}{\pi d_{\text{пр.из}}^2} , \quad (2.9)$$

где $k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения обмоткой окна кольцевого сердечника;

$d_{\text{пр.из}}$ – диаметр провода с изоляцией.

Подставляя числовые значения, находим числа витков обмотки сглаживающего дросселя

$$w = \frac{4 \cdot 3,64 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2}{\pi \cdot 0,491 \cdot 10^{-3}^2} = 384,48.$$

Число витков может быть *только числом целым*. Поэтому правильный ответ $w = 384$.

2.2. Дроссели переменного тока

Дроссели, работающие на переменном токе, широко используются в энергетической электронике, в частности в выходных фильтрах преобразователей переменного тока. В дросселях переменного тока нет подмагничивания постоянным током. При выполнении магнитопровода из электротехнической стали или из феррита вводят немагнитный зазор, предотвращающий насыщение магнитопровода при больших токах.

Исходные данные для расчета дросселя переменного тока являются требуемая индуктивность L , форма напряжения U_L , приложенного к дросселю, частота f напряжения, приложенного к дросселю, перегрев ΔT .

2.6. Определите типоразмер магнитопровода дросселя переменного тока, если индуктивность дросселя $L = 50$ мкГн, амплитуда синусоидального тока в обмотке дросселя $I_m = 6$ А, частота $f = 25$ кГц. Магнитопровод Ш-типа, материал магнитопровода – феррит 2500НМС5. Перегрев дросселя не должен превышать 50 °С.

Р е ш е н и е. Для выбора типоразмера магнитопровода определяется произведение площади окна $S_{ок}$ магнитопровода на площадь S_m поперечного сечения магнитного материала магнитопровода по формуле

$$S_m \times S_{ок} = \left(\frac{U_L \cdot I \cdot 10^4}{4k_{\phi} \cdot B_m \cdot f \cdot k_{ок} \cdot k_j} \right)^{\frac{1}{1+y}} \left[\text{см}^4 \right], \quad (2.10)$$

где I – среднеквадратичное значение тока; U_L – среднеквадратичное значе-

ние напряжения на обмотке дросселя; f – частота тока в обмотке дросселя; $k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода медью; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы тока; k_j – коэффициент, величина которого зависит от перегрева ΔT ; B_m – максимальное значение магнитной индукции; y – показатель степени, значение которого зависит от конфигурации сердечника, материала сердечника и от соотношения потерь в обмотке и в магнитопроводе дросселя.

Физические величины, входящие в уравнение (2.10), имеют размерность физических величин, принятых в системе СИ: $S_m \times S_{\text{ок}} - \text{м}^4$;

$$B_m - \text{Тл}; k_j - \frac{\text{А}}{\text{м}^2}; U_L - \text{В}; I - \text{А}; f - \text{Гц}.$$

При столь высокой частоте формула (2.10) является ориентировочной, но ее применение позволяет свести число итераций при выборе типоразмера магнитопровода к минимуму.

Для Ш-образного сердечника при температуре перегрева $\Delta T = 50^\circ \text{C}$ $y = -0,12$; $k_j = 534 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ [1, таблица 2.1] Для тока синусоидальной формы $k_{\text{ф}} = 1,11$. Принимаем коэффициент заполнения окна $k_{\text{ок}} = 0,25$. Для феррита 2500НМС5 индукция насыщения $B_s = 0,31 \text{ Тл}$. Зададимся величиной $B_m = 0,2 \text{ Тл}$.

Среднеквадратичное значение напряжения на обмотке дросселя определим по формуле

$$U_L = I \cdot \omega L = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot I_m \cdot L. \quad (2.11)$$

$$\text{Тогда } U_L = \sqrt{2} \pi \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 33,32 \text{ В}.$$

$$\text{Среднеквадратичное значение тока дросселя } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{6}{\sqrt{2}} = 4,24 \text{ А}.$$

Подставляя числовые значения в формулу (2.10), находим числовое

значение $S_M \times S_{OK}$, необходимое для выбора типоразмера магнитопровода дросселя

$$S_M \times S_{OK} = \left(\frac{33,32 \cdot 4,24 \cdot 10^4}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,2 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 534} \right)^{\frac{1}{1-0,12}} = 0,49 \text{ см}^4.$$

Типоразмер магнитопровода следует выбирать из условия

$$S_{OK} \times S_M \text{ выбранного магнитопровода} \geq S_{OK} \times S_M \text{ расчетное}. \quad (2.12)$$

Из стандартного ряда выбираем магнитопровод Ш6×6, для которого $S_{OK} \times S_M = 0,51 \text{ см}^4$.

3 ТРАНСФОРМАТОРЫ

3.1 Эквивалентная схема трансформатора

Одним из методических приемов, облегчающих расчет статических и динамических характеристик трансформаторов, является замена реального трансформатора с магнитными связями между обмотками эквивалентной электрической схемой (схемой замещения). Если трансформатор содержит не одну, а несколько вторичных обмоток, его схема замещения содержит несколько звеньев – по числу вторичных обмоток.

Параметры схемы замещения имеют общепринятые в технической литературе обозначения, количественное их значение должно быть предварительно установлено до использования схемы.

3.1. Определите параметры элементов схемы замещения двухобмоточного трансформатора, если известно, что при согласном включении обмоток трансформатора эквивалентная индуктивность равна $L_{\text{согл.}} = 2,46$ Гн, а при встречном включении – $L_{\text{встр.}} = 0,94$ Гн. Собственные индуктивности обмоток соответственно равны $L_1 = 2,5$ Гн, $L_2 = 0,1$ Гн. Активные сопротивления обмоток трансформатора $r_1 = r_2 = 0$.

Р е ш е н и е. Условию задания отвечает эквивалентная схема замещения представленная на рисунке 3.1, где L_{s1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки; L'_{s2} – индуктивность рассеяния вторичной обмотки, приведенная по виткам к первичной обмотке; $k_{\text{тр}} = \frac{w_1}{w_2}$ – отношение числа витков

первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки (коэффициент трансформации трансформатора); M – взаимная индуктивность; L_{μ} – индуктивность первичной обмотки, обусловленная основным магнитным потоком (индуктивность намагничивания); i_1 – ток в первичной обмотке трансформатора.

тора; i'_2 – ток во вторичной обмотке трансформатора, приведенный по виткам к первичной обмотке; i_μ – ток намагничивания; u'_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, приведенное по виткам к первичной обмотке; u_1 – напряжение на первичной обмотке трансформатора.

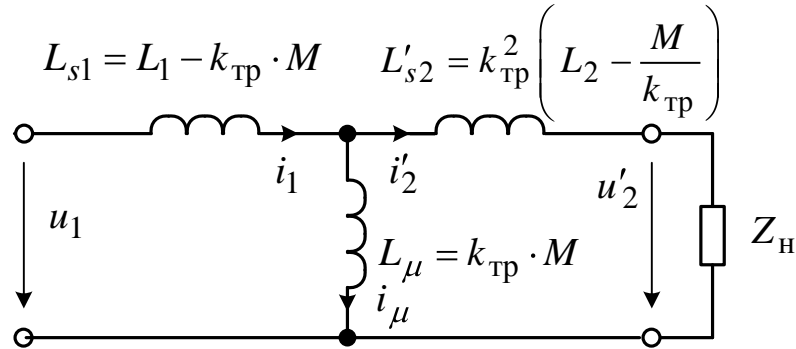


Рисунок 3.1 – Схема замещения трансформатора, приведенная по виткам к первичной обмотке

Известно, что при согласном включении обмоток трансформатора эквивалентная индуктивность определяется по формуле

$$L_{\text{согл.}} = L_1 + L_2 + 2M, \quad (3.1)$$

а при встречном включении обмоток трансформатора – по формуле

$$L_{\text{встр.}} = L_1 + L_2 - 2M. \quad (3.2)$$

Вычитая из уравнения (3.1) уравнение (3.2), получаем $L_{\text{согл.}} - L_{\text{встр.}} = 4M$, откуда следует

$$M = \frac{L_{\text{согл.}} - L_{\text{встр.}}}{4}. \quad (3.3)$$

Тогда $M = \frac{2,46 - 0,94}{4} = 0,38 \text{ Гн.}$

Коэффициент трансформации двухобмоточного трансформатора определяется по формуле

$$k_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}. \quad (3.4)$$

Подставляя числовые значения в формулу (3.4), находим числовое значение коэффициента трансформации $k_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{1,6}{0,1}} = 4$.

Тогда, индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{s1} = L_1 - k_{\text{тр}} \cdot M = 1,6 - 4 \cdot 0,38 = 0,08$ Гн, индуктивность рассеяния вторичной обмотки, приведенная по виткам к первичной обмотке

$$L'_{s2} = k_{\text{тр}}^2 \left(L_2 - \frac{M}{k_{\text{тр}}} \right) = 4^2 \left(0,1 - \frac{0,38}{4} \right) = 0,08 \text{ Гн,}$$
 индуктивность первичной

обмотки, обусловленная основным магнитным потоком $L_{\mu} = k_{\text{тр}} \cdot M = 4 \cdot 0,38 = 1,52$ Гн.

3.2. Необходимо определить статические и динамические параметры трансформатора: ток холостого хода I_{10} , ток короткого замыкания $I_{1\text{кз}}$, напряжение $U_{2\text{ном}}$ на вторичной обмотке трансформатора при номинальном токе $I_{2\text{ном}}$, резонансную частоту $f_{\text{рез.хх}}$ на холостом ходу, резонансную частоту $f_{\text{рез.ном}}$ при номинальной нагрузке, коэффициент полезного действия η , длительность $\tau_{\text{хх}}$ переходных процессов при включении трансформатора на холостом ходу, длительность $\tau_{\text{нагр.}}$ переходных процессов при включении трансформатора при номинальной нагрузке.

Параметры трансформатора определить с использованием схемы замещения, представленной на рисунке 3.2. Параметры схемы замещения: суммарное индуктивное сопротивление рассеяния $x_1 = 12$ Ом; активное сопротивление первичной обмотки $r_1 = 2$ Ом; активное сопротивление вторичной обмотки $r_2 = 0,2$ Ом; индуктивное сопротивление току намагничивания $x_{\mu} = 2500$ Ом; активное сопротивление току намагничивания $r_{\mu} = 400$ Ом; проходная емкость $C_{\Pi} = 160$ пФ; коэффициент трансформации трансформатора $k_{\text{тр}} = 4$; среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмот-

ке трансформатора $U_1 = 220$ В; частота напряжения на первичной обмотке трансформатора $f_1 = 1200$ Гц. Номинальный ток нагрузки $I_{2\text{НОМ}} = 4$ А, коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_H = 0,9$.

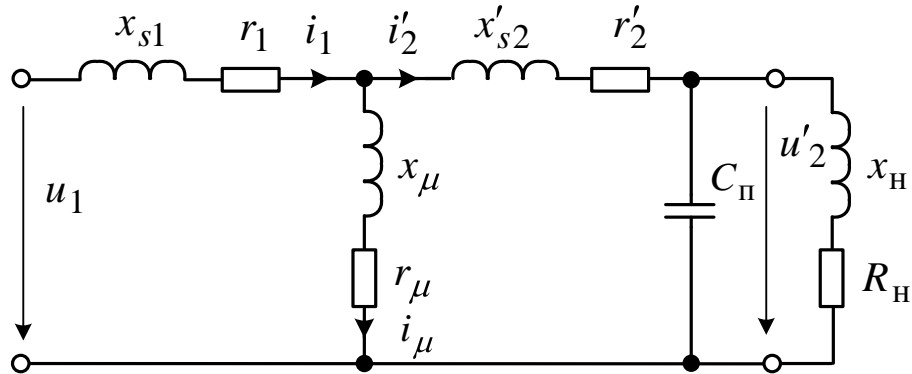


Рисунок 3.2 – Схема замещения трансформатора

Решение. Определение статических и динамических параметров трансформатора ведется с использованием схемы замещения трансформатора, представленной на рисунке 3.2. Расчет выполняется с учетом того, что для трансформаторов выполняются условия: $r_1 + r'_2 \ll r_\mu$ – суммарное активное сопротивление r_1 первичной обмотки и вторичной обмотки r'_2 , приведенное к первичной обмотке, много меньше активного сопротивления r_μ току намагничивания i_μ ; $x_1 + x'_2 \ll x_\mu$ – суммарное реактивное сопротивление x_1 первичной обмотки и вторичной обмотки x'_2 , приведенное к первичной обмотке, много меньше реактивного сопротивления x_μ току намагничивания i_μ ; $I_{10} \ll I_{1\text{НОМ}}$ – ток холостого хода много меньше номинального тока первичной обмотки трансформатора.

При выполнении этих условий статические и динамические параметры трансформатора определяются по формулам:

$$\text{ток холостого хода } I_{10} = \frac{U_1}{z_{\text{xx}}} = \frac{U_1}{\sqrt{x_\mu^2 + r_\mu^2}};$$

ток короткого замыкания $I_{1кз} = \frac{U_1}{z_{кз}} = \frac{U_1}{\sqrt{x_s^2 + r_1 + k_{тр}^2 \cdot r_2}}$;

напряжение на вторичной обмотке трансформатора при номинальном токе нагрузки $U_{2ном.} = \frac{1}{k_{тр}} \left(U_1 - \sqrt{x_s^2 + r_1 + k_{тр}^2 \cdot r_2} \times \frac{I_{2ном.}}{k_{тр}} \right)$;

резонансная частота трансформатора на холостом ходу

$$f_{рез.хх} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{x_\mu}{2\pi f_1} \cdot C_\Pi}};$$

резонансная частота трансформатора при номинальной нагрузке

$$f_{рез.ном} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{x_s}{2\pi f_1} \cdot C_\Pi}};$$

коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной

нагрузке $\eta = \frac{I_{2ном.}^2 \cdot R'_H}{I_{2ном.}^2 R'_H + I_{2ном.}^2 r_1 + r'_2} = \frac{R'_H}{R'_H + r_1 + r'_2}$,

где $R'_H = k_{тр}^2 \cdot R_H = k_{тр}^2 \frac{U_{2ном} \cos \varphi_H}{I_{2ном}}$, $r'_2 = k_{тр}^2 \cdot r_2$

и тогда $\eta = \left(k_{тр}^2 \frac{U_{2ном} \cos \varphi_H}{I_{2ном}} \right) \times \left(k_{тр}^2 \frac{U_{2ном} \cos \varphi_H}{I_{2ном}} \cos \varphi_H + r_1 + k_{тр}^2 \cdot r_2 \right)^{-1}$;

коэффициент мощности при номинальной нагрузке трансформатора

$$\cos \varphi = \cos \left(\arctg \frac{x_s + x'_H}{r_1 + r'_2 + R'_H} \right), \quad \text{где} \quad R'_H = k_{тр}^2 \frac{U_{2ном} \cos \varphi_H}{I_{2ном}}, \quad r'_2 = k_{тр}^2 \cdot r_2,$$

$$x'_H = z'_H \cdot \sin \varphi_H = \frac{U_{2\text{НОМ}} \cdot k_{\text{ТР}}^2}{I_{2\text{НОМ}}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}$$

$$\text{и тогда } \cos \varphi = \cos \left(\arctg \frac{x_s + \frac{U_{2\text{НОМ}} \cdot k_{\text{ТР}}^2}{I_{2\text{НОМ}}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}}{r_1 + k_{\text{ТР}}^2 \cdot r_2 + k_{\text{ТР}}^2 \frac{U_{2\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}} \cos \varphi_H} \right);$$

длительность переходных процессов при включении трансформатора

$$\text{на холостом ходу } \tau_{\text{ХХ}} = \frac{4x_\mu}{2\pi f_1 \cdot r_\mu};$$

длительность переходных процессов при включении трансформатора

$$\text{при номинальной нагрузке } \tau_{\text{нагр.}} = \frac{4 x_s + x'_H}{2\pi f_1 (r_1 + r'_2 + R'_H)}, \quad \text{где } r'_2 = k_{\text{ТР}}^2 \cdot r_2,$$

$$x'_H = \frac{U_{2\text{НОМ}} \cdot k_{\text{ТР}}^2}{I_{2\text{НОМ}}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}, \quad R'_H = k_{\text{ТР}}^2 \frac{U_{2\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}} \cos \varphi_H$$

$$\text{и тогда } \tau_{\text{нагр.}} = \frac{4 \left(x_s + \frac{U_{2\text{НОМ}} \cdot k_{\text{ТР}}^2}{I_{2\text{НОМ}}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} \right)}{2\pi f_1 \left(r_1 + k_{\text{ТР}}^2 \cdot r_2 + k_{\text{ТР}}^2 \frac{U_{2\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}} \cos \varphi_H \right)}.$$

Подставляя числовые значения, находим числовые значения статических и динамических параметров трансформатора:

$$\text{ток холостого хода } I_{10} = \frac{220}{\sqrt{2500^2 + 400^2}} = 0,09 \text{ А};$$

$$\text{ток короткого замыкания } I_{1\text{КЗ}} = \frac{220}{\sqrt{12^2 + 2 + 4^2 \cdot 0,2^2}} = 16,82 \text{ А};$$

напряжение на вторичной обмотке трансформатора при номинальном

$$\text{токе нагрузки } U_{2\text{ном.}} = \frac{1}{4} \left(220 - \sqrt{12^2 + 2 + 4^2 \cdot 0,2^2} \times \frac{4}{4} \right) = 51,7 \text{ В};$$

резонансную частоту трансформатора на холостом ходу

$$f_{\text{рез.хх}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{2500}{2 \cdot 3,14 \cdot 1200} \cdot 160 \cdot 10^{-12}}} = 21,9 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

резонансную частоту трансформатора при номинальной нагрузке

$$f_{\text{рез.ном}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{12}{2 \cdot 3,14 \cdot 1200} \cdot 160 \cdot 10^{-12}}} = 315,5 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной

$$\text{нагрузке } \eta = \left(4^2 \cdot \frac{51,7}{4} \cdot 0,9 \right) \times \left(4^2 \cdot \frac{51,7}{4} \cdot 0,9 + 2 + 4^2 \cdot 0,2 \right)^{-1} = 0,973;$$

коэффициент мощности при номинальной нагрузке трансформатора

$$\cos \varphi = \cos \left(\arctg \frac{12 + \frac{51,7 \cdot 4^2}{4} \sqrt{1 - 0,9^2}}{2 + 4^2 \cdot 0,2 + 4^2 \cdot \frac{51,7}{4} \cdot 0,9} \right) = 0,883;$$

длительность переходных процессов при включении трансформатора

$$\text{на холостом ходу } \tau_{\text{хх}} = \frac{4 \cdot 2500}{2 \cdot 3,14 \cdot 1200 \cdot 400} = 3,32 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

длительность переходных процессов при включении трансформатора

при номинальной нагрузке

$$\tau_{\text{нагр.}} = \frac{4 \left(12 + \frac{51,7 \cdot 4^2}{4} \sqrt{1 - 0,9^2} \right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 1200 \left(2 + 4^2 \cdot 0,2 + 4^2 \cdot \frac{51,7}{4} \cdot 0,9 \right)} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

3.2 Электромагнитные и геометрические соотношения в трансформаторах

Трансформаторы одного класса, например, определенной мощности с естественным охлаждением, обладают общими признаками, определенными соотношениями, устанавливающими связь геометрических параметров с электромагнитными и тепловыми параметрами – мощностью, частотой воздействующего напряжения, перегревом.

Основными параметрами трансформатора являются: $S_M \times S_{OK}$ – геометрический параметр магнитопровода; P_{TV} – мощность трансформатора; f – частота; ΔT – температура перегрева; B_m – амплитуда магнитной индукции; μ – магнитная проницаемость материала магнитопровода; ρ – удельное электрическое сопротивление провода обмотки; α – коэффициент теплоотдачи; η – коэффициент полезного действия и другие.

Любой трансформатор, особенно высокочастотный, представляет собой многочастотную резонансную систему. Наличие индуктивности первичной обмотки, а также индуктивностей рассеяния и паразитных емкостей приводят к колебательным процессам на фронтах и срезах импульсов, то есть к искажению формы импульсов – на фронтах и срезах импульсов присутствуют ВЧ-колебания не только основной частоты (частоты преобразования), но и высшие гармонические составляющие.

Основные параметры эквивалентной схемы, такие как индуктивность первичной обмотки, а также активные сопротивления первичной и вторичной обмоток определяются достаточно точно, а паразитные параметры описываются приближенными формулами.

3.3. Определите параметр $S_M \times S_{OK}$ трансформатора, если мощность трансформатора $P_{TV} = 600$ Вт, частота напряжения на первичной обмотке трансформатора $f = 25$ кГц, среднеквадратичное значение напряжения на

первичной обмотке трансформатора $U_1 = 24 \text{ В}$, длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, среднеквадратичное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора $U_2 = 320 \text{ В}$. Магнитопровод Ш-типа, материал магнитопровода – феррит 2500НМС5. Температура перегрева $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{С}$.

Р е ш е н и е. Условию задания отвечает временная диаграмма напряжения на первичной обмотке трансформатора, представленная на рисунке 3.3.

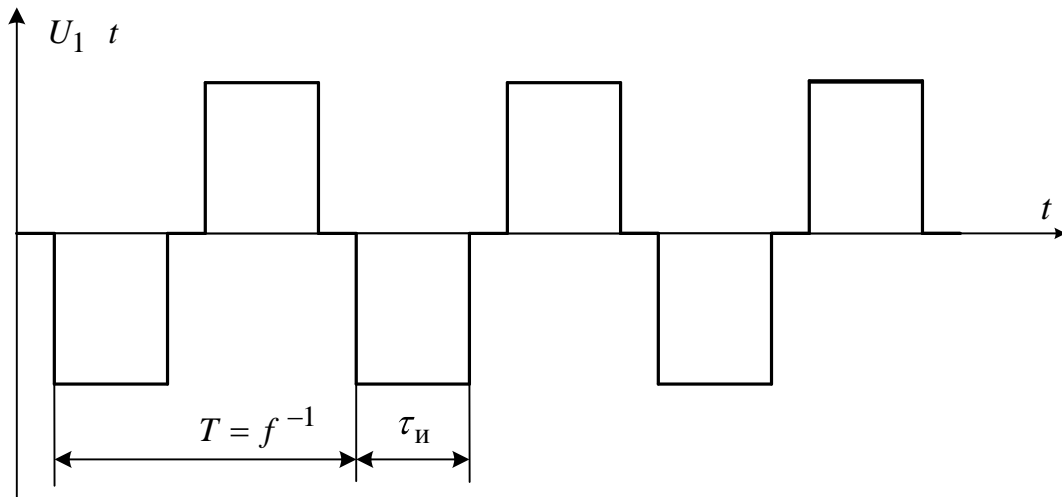


Рисунок 3.3 – Временная диаграмма напряжения на первичной обмотке трансформатора

Произведение $S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}$, связывающее типоразмер сердечника трансформатора с мощностью трансформатора, лежит в основе ряда методик расчета трансформатора и определяется из выражения

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} = \frac{P_{\text{ТВ}}}{4\sqrt{q} \cdot k_{\text{ок1}} \cdot j_1 \cdot f \cdot B_m}, \quad (3.5)$$

где $S_{\text{м}}$ – площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода, м^2 ;

$S_{\text{ок}}$ – площадь окна магнитопровода, м^2 ; $q = \frac{T}{2\tau_{\text{и}}} = \frac{1}{2\tau_{\text{и}} \cdot f}$ –

скважность импульсов; P_{TV} – мощность трансформатора; $k_{ок1}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом первичной обмотки; j_1 – плотность тока в проводе первичной обмотки трансформатора, $\frac{A}{m^2}$; f – частота напряжения на первичной обмотке трансформатора, Гц; B_m – максимальная магнитная индукция по динамической петле гистерезиса, Тл.

$$\text{Определим скважность импульсов } q = \frac{1}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^3} = 1,25.$$

Для первичной оценки типоразмера магнитопровода рекомендуется задать плотность тока в проводе первичной обмотки $j_1 = 2,5 - 3,0 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$ и коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом первичной обмотки $k_{ок1} = 0,1$.

Максимальную магнитную индукцию B_m следует выбирать, используя динамическую кривую намагничивания $B = f H$ при частоте $f = \text{const}$. Для феррита 2500НМС5 индукция насыщения $B_s = 0,31$ Тл. Зададимся величиной $B_m = 0,2$ Тл.

Подставляя числовые значения физических величин в формулу (3.5), находим требуемое значение $S_{ок} \times S_m$ для трансформатора мощностью $P_{TV} = 600$ Вт при частоте напряжения на первичной обмотке $f = 25$ кГц

$$S_{ок} \times S_m \text{ расч.} = \frac{600}{4 \cdot \sqrt{1,25} \cdot 0,1 \cdot 3,0 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,2} = 8,94 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4. \quad (3.6)$$

Типоразмер магнитопровода следует выбирать из условия

$$S_{ок} \times S_m \text{ выбранного магнитопровода} \geq S_{ок} \times S_m \text{ расчетное}. \quad (3.7)$$

Из стандартного ряда выбираем магнитопровод Ш16×20, для которого $S_{ок} \times S_m = 13,38 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$.

В [2] представлена другая формула для определения параметра $S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}$, а именно

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} = \left(\frac{P_{\text{ТВ}}}{4k_{\text{ф}} \cdot B_{\text{м}} \cdot f \cdot k_j \cdot k_{\text{ок}}} \right)^{\frac{1}{1+y}}, \quad (3.8)$$

где k_j – коэффициент, имеющий размерность плотности тока и зависящий от заданного перегрева и геометрических размеров сердечника; y – показатель степени (величина безразмерная); $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы напряжения.

Физические величины, входящие в уравнение (3.8), имеют размерность физических величин, принятых в международной системе единиц СИ:

$S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}} - \text{м}^4$; $P_{\text{ТВ}} - \text{Вт}$; $B_{\text{м}} - \text{Тл}$; $k_j - \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$. Значения коэффициента k_j и показателя степени y для сердечников различной конфигурации и двух значениях перегрева ΔT приведены в таблице 2.1 [1]. Для Ш-образного сердечника и температуре перегрева $\Delta T = 50^\circ\text{С}$ значение коэффициента $k_j = 534 \frac{\text{А}}{\text{см}^2} = 534 \cdot 10^{-4} \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$, а значение показателя $y = -0,12$.

Коэффициент формы – это отношение среднеквадратичного значения напряжения к его среднему по модулю значению

$$k_{\text{ф}} = \frac{U}{U_{\text{ср}}}.$$

Среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора определяется выражением

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\tau_{\text{им}}} U_m^2 \cdot dt} = U_m \sqrt{\frac{2\tau_{\text{им}}}{T}},$$

а среднее по модулю значение напряжения на первичной обмотке трансформатора – выражением

$$U_{\text{ср}} = U_m \frac{2\tau_{\text{им}}}{T}.$$

Тогда для рассматриваемого случая коэффициент формы напряжения на первичной обмотке трансформатора

$$k_{\Phi} = \sqrt{\frac{T}{2\tau_{\text{им}}}} = \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-6}}} = 1,118.$$

Подставляя числовые значения физических величин в формулу (3.8), находим требуемое значение $S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}$ для трансформатора мощностью $P_{\text{ТВ}} = 600$ Вт при частоте напряжения на первичной обмотке $f = 25$ кГц

$$\begin{aligned} S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} &= \left(\frac{600}{4 \cdot 1,118 \cdot 0,2 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 534 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1} \right)^{\frac{1}{1-0,12}} = 6,26 \text{ см}^4 = \\ &= 6,26 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4. \end{aligned}$$

Из стандартного ряда выбираем магнитопровод Ш12×20 ФДГК.757131.005ТУ, для которого параметр

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} \text{ выбранного магнитопровода} = 6,48 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 \quad \text{и} \quad \text{условие}$$

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} \text{ выбранного магнитопровода} \geq S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} \text{ расчетное} \text{ выполняется.}$$

3.4. На ферритовом сердечнике типа ПК первичная 1 и вторичная 2 обмотки трансформатора коаксиально располагаются на одном стержне 3 (рисунок 3.4). Основные данные обмоток: высота $h = 10$ см; толщина обмоток $b_1 = b_2 = b = 1,6$ см; расстояние между обмотками $b_{12} = 0,4$ см; средняя длина одного витка обмоток $\ell_{\text{ср.в}} = 32$ см; число витков первичной обмотки $w_1 = 560$. Определите индуктивность рассеяния L_s трансформатора.

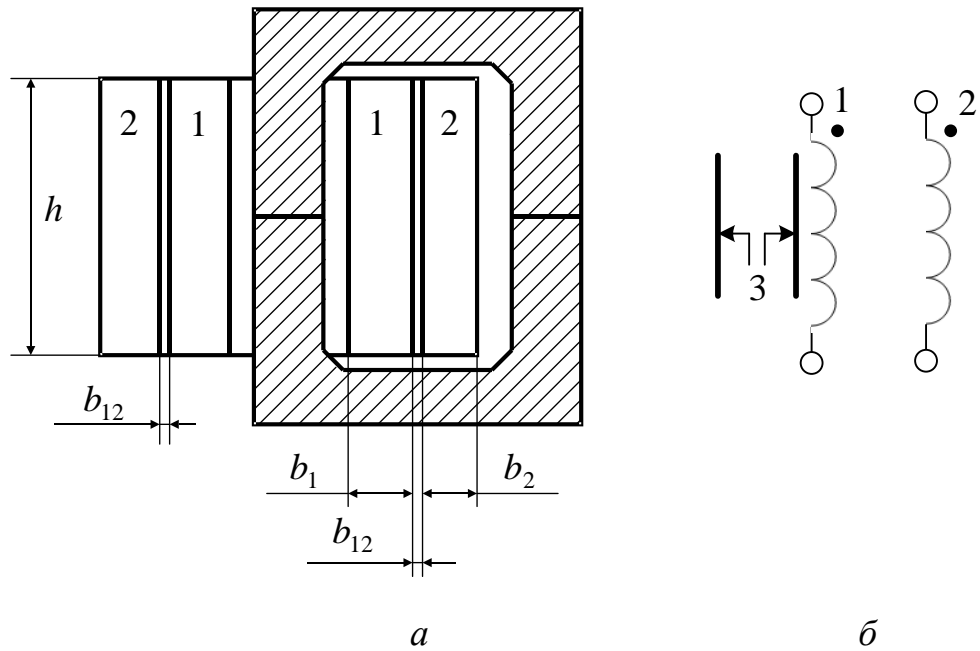


Рисунок 3.4 – Расположение обмоток трансформатора на одном стержне ферритового сердечника типа ПК: *a* – расположение обмоток трансформатора; *б* – схема соединения обмоток

Р е ш е н и е. Поскольку в трансформаторах толщина b_1 первичной обмотки и толщина b_2 вторичной обмотки приблизительно равны ($b_1 \approx b_2 \approx b$), а расстояние b_{12} между обмотками много меньше b ($b_{12} \ll b$), то индуктивность L_s определяется по формуле

$$L_s = \frac{\mu_0}{\pi} \times w_1^2 \times \ell_{\text{ср.в}} \times \ln \left(\frac{1 + 3,5 \frac{b}{h}}{1 + \frac{b}{h}} \right), \quad (3.9)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; w_1 – число витков первичной обмотки; h – высота обмотки; $\ell_{\text{ср.в}}$ – средняя длина одного витка обмоток.

Подставляя числовые значения, находим значение индуктивности рассеяния трансформатора на ферритовом сердечнике типа ПК, первичная и вторичная обмотки которого концентрические и располагаются на одном стержне

$$L_s = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \times 560^2 \times 32 \cdot 10^{-2} \times \ln \left(\frac{1 + 3,5 \frac{1,6}{10,0}}{1 + \frac{1,6}{10,0}} \right) = 0,012 \text{ Гн} = 12 \text{ мГн}.$$

3.5. На ферритовом сердечнике типа ПК первичная и вторичная обмотки трансформатора разделены на половины, причем одна пара половин обмоток расположена на одном стержне, а другая пара – на другом стержне (рисунок 3.5). Основные данные половин обмоток: высота $h = 10$ см; толщина обмоток $b_1 = b_2 = b = 1,2$ см; расстояние между обмотками $b_{12} = 0,2$ см; средняя длина одного витка обмоток $\ell_{\text{ср.в}} = 24$ см; число витков первичной обмотки $w_1 = 280$. Определите индуктивность рассеяния L_s трансформатора.

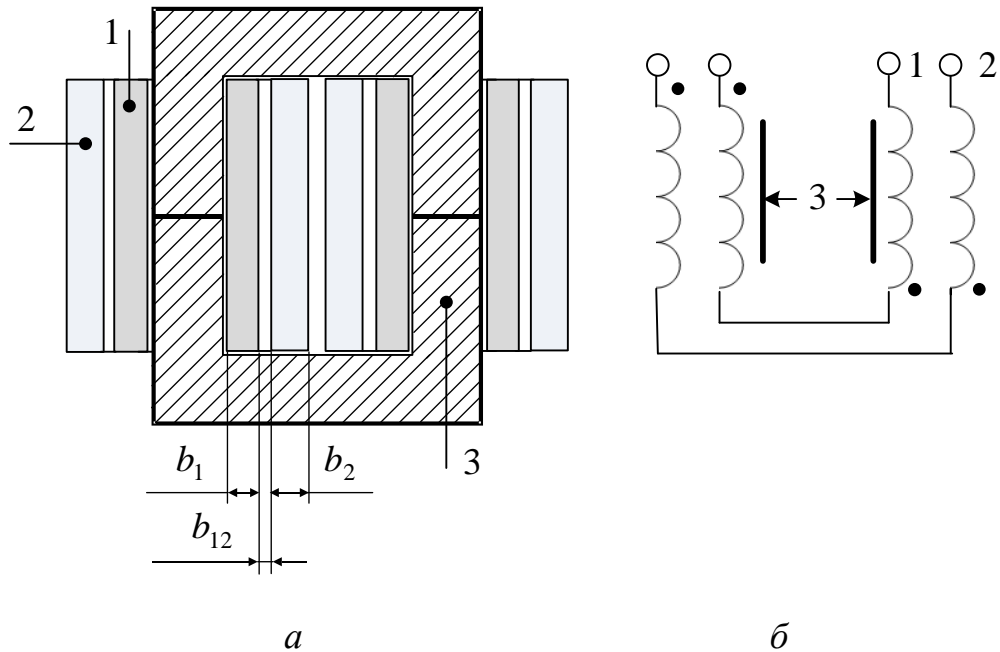


Рисунок 3.5 – Расположение обмоток трансформатора на разных стержнях ферритового сердечника типа ПК: *а* – расположение обмоток трансформатора; *б* – схема соединения обмоток

Р е ш е н и е. Из рисунка 3.5,б следует, что первичная обмотка 1 и вторичная обмотка 2 разделены на половины, каждая пара половин расположена на одном стержне 3 и половины соединены между собой последовательно.

Для определения L_s необходимо провести расчет индуктивности рассеяния обмоток, расположенных на каждом стержне. Следует учесть, что количество витков каждой половины первичной и вторичной обмоток будет равно $\frac{w_1}{2}$ и $\frac{w_2}{2}$ соответственно. Сначала находят индуктивность рассеяния обмоток на одном стержне по формуле

$$L'_s = \frac{\mu_0}{\pi} \times \left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \times l_{\text{ср.в}} \times \ln \left(\frac{1 + 3,5 \frac{b}{h}}{1 + \frac{b}{h}} \right). \quad (3.10)$$

Суммарная индуктивность рассеяния L_s трансформатора определяется выражением

$$L_s = 2L'_s = 2 \frac{\mu_0}{\pi} \times \left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \times l_{\text{ср.в}} \times \ln \left(\frac{1 + 3,5 \frac{b}{h}}{1 + \frac{b}{h}} \right). \quad (3.11)$$

Подставляя числовые значения в формулу (3.11), находим значение индуктивности рассеяния трансформатора на ферритовом сердечнике типа ПК, первичная и вторичная обмотки которого состоят из двух половин, расположенных на разных стержнях

$$\begin{aligned} L_s &= 2 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \times \left(\frac{280}{2}\right)^2 \times 24 \cdot 10^{-2} \times \ln \left(\frac{1 + 3,5 \frac{1,2}{10,0}}{1 + \frac{1,2}{10,0}} \right) = \\ &= 8,031 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \approx 0,9 \text{ мГн}. \end{aligned}$$

4 МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

4.1 Методика расчета конструктивных и электромагнитных параметров сглаживающего дросселя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА. Индуктивность дросселя $L = 70 \text{ мкГн}$. Постоянная составляющая тока дросселя (ток подмагничивания) $I_{\text{н}} = 12 \text{ А}$. Амплитуда переменной составляющей тока дросселя $\Delta I = 1 \text{ А}$. Частота пульсаций $f = 100 \text{ кГц}$. Температура окружающей среды $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Перегрев дросселя не должен превышать $50 \text{ }^\circ\text{С}$. Дроссель должен иметь минимальный магнитный поток рассеяния.

Ток в обмотке сглаживающего дросселя представлен на рисунке 4.1.

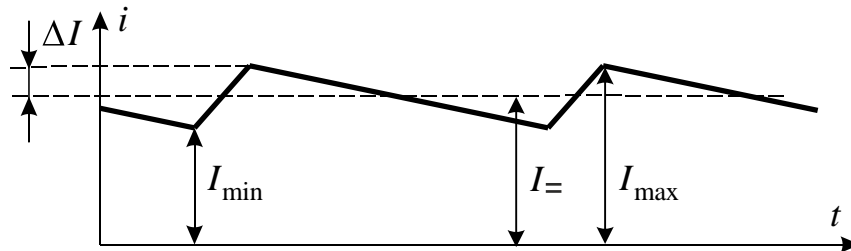


Рисунок 4.1 – Ток в обмотке сглаживающего дросселя

В качестве сердечника дросселя выбираем кольцевой сердечник фирмы Hitachi, материал – аморфное железо с распределенным зазором (сердечники фирмы Hitachi из аморфных металлов Metglas). В целях уменьшения рассеяния магнитного потока и упрощения намотки рекомендуется обмотку дросселя располагать только в один ряд.

Для расчета дросселя с заданными параметрами необходимо выполнить ряд последовательных шагов.

Определим требуемую энергоемкость дросселя

$$W_{\text{м макс}} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{L}{2} \left(I_{\text{=}} + \frac{\Delta I}{2} \right)^2. \quad (4.1)$$

Подставляя числовые значения параметров дросселя, находим числовое значение энергоемкости сглаживающего дросселя

$$W_{\text{м макс}} = \frac{70 \cdot 10^{-6}}{2} \left(12 + \frac{1}{2} \right)^2 = 5,469 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Определим коэффициент формы тока k_{ϕ} сглаживающего дросселя

$$k_{\phi} = \frac{I}{I_{\text{ср}}}, \quad (4.2)$$

где I – среднеквадратичное значение тока; $I_{\text{ср}}$ – среднее по модулю значение тока.

Среднеквадратичное значение тока в обмотке дросселя, необходимое для расчета сечения провода и выбора типоразмера сердечника, определяют

по известной формуле $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 t dt}$ с учетом закона изменения тока

дросселя $i(t)$.

Для тока $i(t)$ сглаживающего дросселя среднеквадратичное значение тока

$$I = \sqrt{I_{\text{=}}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}} = \sqrt{12^2 + \frac{1^2}{12}} = 12,003 \text{ А}. \quad (4.3)$$

Среднее по модулю значение тока равно постоянной составляющей тока: $I_{\text{ср}} = I_{\text{=}} = 12 \text{ А}$.

Тогда коэффициент формы тока $k_{\phi} = \frac{12,003}{12} \approx 1$.

Определим требуемое произведение площади окна сердечника $S_{\text{ок}}$ на площадь поперечного сечения сердечника $S_{\text{м}}$ [1, формула 2.19]

$$S_M \times S_{\text{ок}} = \left(\frac{2W_3}{k_\phi \cdot k_{\text{ок}} \cdot B_m \cdot k_j} \right)^{\frac{1}{1+y}}. \quad (4.4)$$

где k_ϕ – коэффициент формы тока;

$k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода медью;

k_j – коэффициент, величина которого зависит от перегрева ΔT ;

B_m – максимальное значение магнитной индукции;

y – показатель степени, значение которого зависит от конфигурации сердечника, материала сердечника и от соотношения потерь в обмотке и в магнитопроводе дросселя (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента k_j и показателя степени y для сердечников различной конфигурации

Конфигурация сердечника	Соотношение потерь в обмотке и в магнитопроводе	$k_j, \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$	$k_j, \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$	y
		$\Delta T = 25^\circ \text{C}$	$\Delta T = 50^\circ \text{C}$	
Чашечный	$P_{\text{об}} = P_M$	433	632	– 0,17
Порошковый кольцевой	$P_{\text{об}} \gg P_M$	403	590	– 0,12
Ферритовый кольцевой	$P_{\text{об}} \gg P_M$	403	590	– 0,12
Броневого (Ш-образный, E, EI)	$P_{\text{об}} = P_M$	366	534	– 0,12
Стержневой	$P_{\text{об}} = P_M$	323	468	– 0,14
Стержневой	$P_{\text{об}} \gg P_M$	395	569	– 0,14
Ленточный кольцевой	$P_{\text{об}} = P_M$	250	365	– 0,13

Размерности физических величин, входящих в уравнение (4.4):

$$S_M \times S_{\text{ок}} - \text{м}^4; \quad W_3 - \text{Дж}; \quad B_m - \text{Тл}; \quad k_j - \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Принимаем $k_{\text{ок}} = 0,4$. Для ленточного кольцевого сердечника $y = -0,13$; $k_j = 365 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ (при перегреве $\Delta T = 50^\circ \text{C}$) (таблица 4.1).

Индукция насыщения B_s для аморфного железа с распределенным зазором составляет 1,56 Тл. Максимальное значение магнитной индукции B_m примем 0,7 Тл (не следует задавать $B_m > 1,2$ Тл).

Тогда требуемое произведение площади окна сердечника $S_{\text{ок}}$ на площадь поперечного сечения сердечника S_M

$$S_M \times S_{\text{ок}} = \left(\frac{2 \cdot 5,469 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{1 \cdot 0,4 \cdot 0,7 \cdot 365} \right)^{\frac{1}{1-0,13}} = 1,081 \text{ см}^4.$$

Из стандартного ряда выбираем кольцевой сердечник МР3510LDGC (МР – марка сердечника; 35 – наружный диаметр сердечника; 10 – высота сердечника; L – обозначение материала каркаса; DGC (Distributed gap core) – сердечник с распределенным воздушным зазором) (рисунок 4.2).

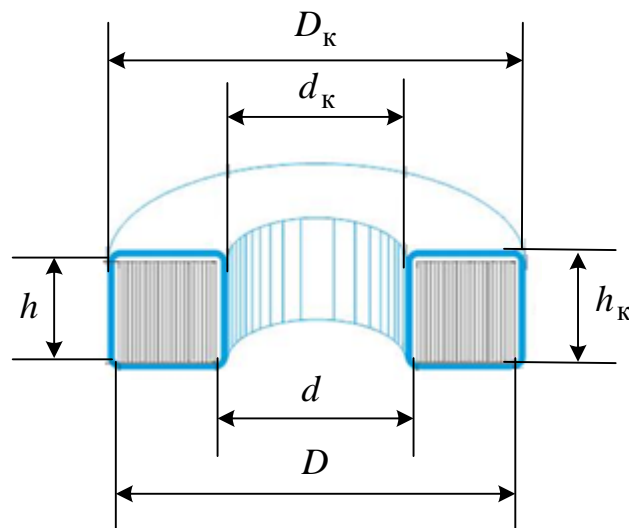


Рисунок 4.2 – Размерные параметры кольцевого сердечника из аморфного железа с распределенным зазором в защитном контейнере

Размерные и эффективные параметры кольцевого сердечника MP3510LDGC представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Размерные и эффективные параметры кольцевого сердечника MP3510LDGC фирмы Hitachi

Размеры контейнера, мм			ℓ_e	S_M ,	V_e ,	μ	A_L ,	S_{OK} ,	$S_M \times S_{OK}$,
D_K	d_K	H_K	см	см ²	см ³		нГн	см ²	см ⁴
38,4	16,4	11,8	8,48	0,66	5,57	245	239	2,19	1,438

Определим площадь сечения медного обмоточного провода

$$S_{\text{пр}} = \frac{I}{j} \left[\text{мм}^2 \right],$$

где I – среднеквадратичное значение тока в обмотке дросселя; j – плотность тока в проводе обмотки дросселя.

Зададим плотность тока в проводе обмотки дросселя $j = 2,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

Тогда для заданной плотности тока получаем расчетное значение площади сечения жилы медного провода $S_{\text{пр. расч.}} = \frac{12,003}{2,5} = 4,8 \text{ мм}^2$.

Провод следует выбирать с соблюдением условия

$$S_{\text{пр. выбранного}} \geq S_{\text{пр. расч.}} \quad (4.5)$$

При выполнении этого условия плотность тока дросселя не будет превышать начальную расчетную, которая задается или определяется из соотношения

$$j = k_j \cdot S_M \times S_{OK}^y \quad (4.6)$$

Для рассматриваемого случая плотность тока

$$j = k_j \cdot S_M \times S_{OK}^y = 365 \cdot 0,66 \cdot 2,19^{-0,13} = 347,9 \frac{A}{cm^2} = 3,48 \frac{A}{mm^2}.$$

Таким образом, заданная плотность тока $j = 2,5 A/mm^2$ меньше величины плотности тока, найденной с использованием формулы (4.6) и это допустимо. Недопустимо, когда заданное значение плотности тока превышает значение плотности тока, найденной с использованием формулы $j = k_j \cdot S_M \times S_{OK}^y$.

Следует отметить, что задавать плотность тока можно тогда, когда отсутствует формула, аналогичная формуле $j = k_j \cdot S_M \times S_{OK}^y$, или у разработчика магнитных элементов есть опыт, который накапливается в процессе разработки и внедрения функциональных узлов энергетической электроники. Можно также использовать рекомендации, найденные в научно-технической литературе.

Выбор провода проведем, исходя из заданной плотности тока $j = 2,5 A/mm^2$. Выберем стандартный отечественный медный эмалированный провод круглого сечения с номинальным диаметром медной проволоки 2,50 мм, площадью сечения жилы $S_{пр. выбранного} = 4,909 mm^2$. Основные размеры выбранного провода и проводов, близких по диаметру к выбранному, представлены в таблице 4.3 (ГОСТ 26615-85).

Следует отметить, что для обмотки дросселя пригодным является и провод с номинальным диаметром проволоки $d_{пр. ном} = 2,36 mm$, так как

$$j = \frac{I}{S_{пр. выбранного}} = \frac{12}{4,374} = 2,74 \frac{A}{mm^2}, \text{ что больше заданной плотности тока}$$

$j = 2,5 A/mm^2$, но меньше плотности тока, найденной с использованием формулы $j = k_j \cdot S_M \times S_{OK}^y$.

Таблица 4.3 – Основные размеры отечественных медных эмалированных проводов круглого сечения с номинальным диаметром (1,8 – 2,5) мм.

Характеристики медного провода				Изоляция по типу 1		Изоляция по типу 2	
Ном. диаметр медной проволоки	Допустимые отклонения от номинала	Площадь сечения жилы	Удельная масса жилы	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции
мм	мм	мм ²	кг/1км	мм	мм	мм	мм
1,80	0,018	2,545	22,62	0,039	1,872	0,073	1,909
1,90	0,019	2,835	25,21	0,040	1,974	0,075	2,012
2,00	0,020	3,142	27,93	0,040	2,074	0,075	2,112
2,12	0,021	3,530	31,38	0,041	2,196	0,077	2,235
2,24	0,022	3,941	35,03	0,041	2,316	0,077	2,355
2,36	0,024	4,374	38,89	0,042	2,438	0,079	2,478
2,50	0,025	4,909	43,64	0,042	2,578	0,079	2,618

Это касается и провода с номинальным диаметром проволоки $d_{\text{пр. ном}} = 2,24$ мм, поскольку

$$j = \frac{I}{S_{\text{пр. выбранного}}} = \frac{12}{3,941} = 3,04 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2},$$

и провода с номинальным диаметром проволоки $d_{\text{пр. ном}} = 2,12$ мм, применение которого приводит к плотности тока

$$j = \frac{I}{S_{\text{пр. выбранного}}} = \frac{12}{3,530} = 3,4 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

А вот провод с номинальным диаметром проволоки $d_{\text{пр. ном}} = 2,00$ мм уже не может использоваться для обмотки дросселя, так как в этом случае

плотность тока $j = \frac{I}{S_{\text{пр. выбранного}}} = \frac{12}{3,142} = 3,82 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$, что больше даже ве-

личины $j = 3,48 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$, найденной с использованием формулы $j = k_j \cdot S_M \times S_{\text{ок}}^y$.

Определим число витков обмотки дросселя по формуле

$$w = \sqrt{\frac{L}{A_L}}, \quad (4.7)$$

где A_L – величина индуктивности на виток.

Из таблицы 4.2 находим $A_L = 239 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Гн}}{\text{виток}^2}$. Тогда число витков

$$\text{обмотки дросселя } w = \sqrt{\frac{70 \cdot 10^{-6}}{239 \cdot 10^{-9}}} = 17 \text{ витков.}$$

По заданию дроссель должен иметь минимальный магнитный поток рассеяния. Для снижения поля рассеяния дросселя тороидальной конструкции его обмотку рекомендуется располагать только в один ряд.

Обмотка дросселя располагается в один ряд, если выполняется условие

$$\pi \cdot d_k > w \cdot d_{\text{пр.из}} \cdot k_{\text{зап}}, \quad (4.8)$$

где $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса (рекомендуется принимать $k_{\text{зап}} = 1,1$).

Тогда $\pi \cdot 16,4 > 17 \cdot 2,578 \cdot 1,1$ или $51,5 \text{ мм} > 48,2 \text{ мм}$, то есть на выбранном сердечнике обмотка дросселя проводом диаметром $d_{\text{пр.из}} = 2,578$ укладывается в один слой.

Определим сопротивление обмотки дросселя. Сопротивление обмотки дросселя находят по формуле

$$R = \rho_0 \frac{w \cdot \ell_{\text{ср.в}}}{S_{\text{пр}}} k_T, \quad (4.9)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление медного провода обмотки при начальной температуре T_0 ; $\ell_{\text{ср.в}}$ – средняя длина одного витка обмотки

дресселя; k_T – коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева; $S_{\text{пр}}$ – площадь сечения жилы провода.

Средняя длина одного витка обмотки дросселя определяется с использованием геометрии сердечника по формуле

$$\ell_{\text{ср.в}} = 2 \left(\frac{D_{\text{к}} - d_{\text{к}}}{2} + H_{\text{к}} \right) k_{\text{зап}}, \quad (4.10)$$

где $D_{\text{к}}$ – внешний диаметр контейнера кольцевого сердечника из аморфного железа с распределенным зазором; $d_{\text{к}}$ – внутренний диаметр контейнера кольцевого сердечника; $H_{\text{к}}$ – высота контейнера кольцевого сердечника; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса (рекомендуется принимать $k_{\text{зап}} = 1,1$).

Подставляя числовые значения, представленные в таблице 4.2, находим среднюю длину одного витка обмотки дросселя

$$\ell_{\text{ср.в}} = 2 \left(\frac{3,84 - 1,64}{2} + 1,18 \right) \cdot 1,1 = 5,02 \text{ см.}$$

Коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева определяется выражением

$$k_T = 1 + \alpha_{\rho} \cdot \Delta T, \quad (4.11)$$

где α_{ρ} – температурный коэффициент удельного сопротивления (чаще используется обозначение ТК_{ρ}).

Для медного провода $\alpha_{\rho} = 4,3 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ и тогда $k_T = 1 + 4,3 \times 10^{-3} \cdot \Delta T \approx 1 + 0,004 \cdot \Delta T$. При заданной температуре перегрева $\Delta T = 50^{\circ}\text{С}$ коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки $k_T = 1 + 4,3 \times 10^{-3} \cdot 50 = 1,215$.

Удельное электрическое сопротивление медного провода при температуре $T_0 = 20^{\circ}\text{С}$ (ρ_0) равно $17 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Тогда сопротивление обмотки дросселя

$$R = 17 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{17 \cdot 5,02 \cdot 10^{-2}}{4,909 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,215 = 3,59 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Определим потери в обмотке дросселя

$$P_{\text{об}} = I_{\text{ср}}^2 \cdot R = 12^2 \cdot 3,59 \cdot 10^{-3} = 0,517 \text{ Вт,} \quad (4.12)$$

где $I_{\text{ср}}$ – среднее по модулю значение тока в обмотке дросселя.

Определим амплитуду переменной составляющей магнитной индукции в материале сердечника по формуле

$$B_{\sim} = \frac{\mu_0 \mu \cdot \Delta I \cdot w}{\ell_e}, \quad (4.13)$$

где ℓ_e – эффективная длина магнитного пути; μ – магнитная проницаемость материала сердечника дросселя; ΔI – амплитуда переменной составляющей тока дросселя.

Для кольцевого сердечника МР3510LDGC $\ell_e = 8,48 \cdot 10^{-2}$ м, $\mu = 245$.

Тогда, согласно формуле (4.13), амплитуда переменной составляющей магнитной индукции в материале кольцевого сердечника МР3510LDGC

$$B_{\sim} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 245 \cdot 1 \cdot 17}{8,48 \cdot 10^{-2}} = 0,062 \text{ Тл.}$$

Определим постоянную составляющую магнитной индукции в материале кольцевого сердечника МР3510LDGC

$$B_{=} = \frac{\mu_0 \mu \cdot I_{=} \cdot w}{\ell_e} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 245 \cdot 12 \cdot 17}{8,48 \cdot 10^{-2}} = 0,74 \text{ Тл,} \quad (4.14)$$

где $I_{=}$ – постоянная составляющая тока дросселя (тока подмагничивания).

Зная амплитуду переменной и постоянной составляющей магнитной индукции в материале сердечника, определим максимальное значение магнитной индукции в материале кольцевого сердечника МР3510LDGC дроссе-

ля в результате намотки 17 витков.

$$B_m = B_{=} + B_{\sim} = 0,74 + 0,062 = 0,80 \text{ Тл.}$$

Потери мощности в сердечнике дросселя определяют, используя либо графики $p = f B_m$ зависимости удельных потерь мощности от величины максимальной магнитной индукции при частоте $f = \text{const}$, либо эмпирические формулы вида $p = \xi \cdot f^\alpha \cdot B_{\sim}^\beta + \xi_1 \cdot f^{\alpha_1} \cdot B_{\sim}^{\beta_1}$.

Для выбранного материала сердечника эмпирическая формула имеет вид

$$p = 275 \cdot f \cdot B_{\sim}^{2,6} + 0,114 \cdot f^2 \cdot B_{\sim}^2, \quad (4.15)$$

где p – удельные потери мощности в материале сердечника, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right]$;

f – частота, [кГц]; B_{\sim} – переменная составляющая магнитной индукции в материале сердечника, [Тл].

Используя формулу (4.15), определим величину удельных потерь мощности в материале кольцевого сердечника МР3510LDGC при частоте 100 кГц и амплитуде переменной составляющей магнитной индукции 0,062 Тл

$$p = 275 \cdot 100 \cdot 0,062^{2,6} + 0,114 \cdot 100^2 \cdot 0,062^2 = 24,3 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right].$$

Потери мощности в сердечнике определяют по формуле

$$P_M = p \cdot M, \quad (4.16)$$

где M – масса сердечника, [кг].

Тогда потери мощности в кольцевом сердечнике МР3510LDGC при частоте 100 кГц и амплитуде переменной составляющей магнитной индукции 0,062 Тл составят

$$P_M = p \cdot M = 24,3 \cdot 40,01 \cdot 10^{-3} = 0,972 \text{ Вт.}$$

Обратите внимание на величину потерь мощности в обмотке дросселя и на величину потерь мощности в материале сердечника дросселя:

$P_{об} = 0,517$ Вт, а $P_M = 0,972$ Вт, то есть $P_{об} \neq P_M$, причем $P_{об} < P_M$. А между тем известно, что при оптимальном расчете магнитных элементов $P_{об} = P_M$ [3]. В рассматриваемом примере добиться выполнения этого равенства можно, увеличив плотность тока. Предлагается это выполнить самостоятельно, увеличив плотность тока до величины, определяемой, например, формулой $j = k_j \cdot S_M \times S_{ок}^y$. При указанном подходе можно, и не без основания, полагать, что равенство $P_{об} = P_M$ выполнится на первом шаге итерации, в крайнем случае – на втором шаге итерации.

Определим суммарные потери мощности в дросселе

$$P_{\Sigma} = P_{об} + P_M = 0,517 + 0,972 = 1,489 \text{ Вт.}$$

Перегрев дросселя не должен превышать 50 °С. Перегрев дросселя определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{P_{об} + P_M}{\alpha_T \cdot \Pi_{др}} \left[^\circ\text{C} \right], \quad (4.17)$$

где $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ – коэффициент теплоотдачи при естественном охлаждении; $\Pi_{др}$ – площадь поверхности охлаждения дросселя.

Поверхность охлаждения дросселя приближенно определяется с использованием геометрии сердечника по формуле

$$\Pi_{др} = 2 \left(\frac{\pi \cdot D_k^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \right) + \pi \cdot D_k \cdot H_k + \pi \cdot d_k \cdot H_k. \quad (4.18)$$

Подставляя числовые значения, представленные в таблице 4.2, находим площадь поверхности охлаждения дросселя

$$\Pi_{др} = 2 \left(\frac{\pi \cdot 3,84^2}{4} - \frac{\pi \cdot 1,64^2}{4} \right) + \pi \cdot 3,84 \cdot 1,18 + \pi \cdot 1,64 \cdot 1,18 = 39,25 \text{ см}^2.$$

Подставляя числовые значения в формулу (4.17), находим перегрев дросселя

$$\Delta T = \frac{0,517 + 0,972}{1,2 \cdot 39,25} = 31,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отметим, что при большом токе подмагничивания магнитная проницаемость материала сердечника, а, следовательно, и индуктивность дросселя уменьшаются. Для того, чтобы этого не допустить необходимо либо выбрать сердечник большего типоразмера, либо увеличить число витков дросселя.

4.2 Методика расчета конструктивных и электромагнитных параметров дросселя переменного тока

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА. Индуктивность дросселя $L = 15 \text{ мкГн}$. Амплитуда синусоидального тока в обмотке дросселя $I_{\text{max}} = 6 \text{ А}$. Частота $f = 300 \text{ кГц}$. Перегрев дросселя не должен превышать $50 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Определение (расчет) конструктивных и электромагнитных параметров дросселя переменного тока предполагает выполнение ряда последовательных шагов.

Первым шагом расчета является выбор типоразмера магнитопровода дросселя. Для выбора типоразмера магнитопровода определяется произведение площади окна $S_{\text{ок}}$ магнитопровода на площадь $S_{\text{м}}$ поперечного сечения магнитного материала магнитопровода по формуле

$$S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}} = \left(\frac{U_L \cdot I \cdot 10^4}{4k_{\phi} \cdot B_m \cdot f \cdot k_{\text{ок}} \cdot k_j} \right)^{\frac{1}{1+y}}, \quad [\text{см}^4], \quad (4.19)$$

где I – среднеквадратичное значение тока; U_L – среднеквадратичное значение напряжения на обмотке дросселя; f – частота тока в обмотке дросселя; $k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода медью; k_{ϕ} – коэффициент формы тока; k_j – коэффициент, величина которого зависит от перегрева ΔT (табл. 2.1); B_m – максимальное значение магнитной индукции; y – пока-

затель степени, значение которого зависит от конфигурации сердечника, материала сердечника и от соотношения потерь в обмотке и в магнитопроводе дросселя (таблица 4.1).

Физические величины, входящие в уравнение (4.19), имеют размерность физических величин, принятых в системе СИ: $S_M \times S_{OK} - \text{м}^4$;

$$B_m - \text{Тл}; k_j - \frac{\text{А}}{\text{м}^2}; U_L - \text{В}; I - \text{А}; f - \text{Гц}.$$

При столь высокой частоте эта формула является ориентировочной, но ее применение позволяет свести число итераций при выборе типоразмера магнитопровода к минимуму.

Наиболее распространенными применениями ферритовых RM-сердечников являются высокостабильные высокоточные индуктивности, характеризующиеся высокой добротностью [1]. Поэтому выбираем сердечник конфигурации RM (чашечный) из ферритового материала N87 фирмы Epcos.

Для чашечного сердечника $y = -0,17$; $k_j = 632 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ (при температуре перегрева $\Delta T = 50^\circ \text{C}$) (таблица 4.1). Для тока синусоидальной формы $k_\phi = 1,11$. Принимаем коэффициент заполнения окна $k_{OK} = 0,4$.

Полную (расчетную) P_p мощность дросселя определим из соотношения

$$P_p = \frac{I_{\max}^2 \cdot \omega L}{2} = \pi \cdot I_{\max}^2 \cdot f \cdot L, \text{ (ВА)}, \quad (4.20)$$

где I_{\max} – амплитудное значение синусоидального тока в обмотке дросселя.

Подставляя числовые значения, находим полную (расчетную) мощность дросселя

$$P_p = \pi \cdot 6^2 \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 509 \text{ ВА}.$$

Максимальную индукцию в сердечнике с учетом частоты тока в обмотке дросселя $f = 300 \text{ кГц}$ примем равной $0,06 \text{ Тл} - B_m = 0,06 \text{ Тл}$.

Определим расчетное значение произведения площади окна $S_{\text{ок}}$ магнитопровода на площадь $S_{\text{м}}$ поперечного сечения магнитного материала магнитопровода

$$S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}}_{\text{расч.}} = \left(\frac{509 \cdot 10^4}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,06 \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \cdot 632} \right)^{\frac{1}{1-0,17}} = 0,19 \text{ см}^4.$$

Полученному расчетному значению $S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}}_{\text{расч.}} = 0,19 \text{ см}^4$ удовлетворяет сердечник типоразмера RM10, у которого $S_{\text{м}} = 90 \text{ мм}^2$
 $A_{\text{min}} = 90 \text{ мм}^2$ и $S_{\text{ок}} = 46 \text{ мм}^2$ Таким образом,

$S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}}_{\text{RM10}} = 90 \times 46 = 4140 \text{ мм}^4 = 0,414 \text{ см}^4$, что больше расчетного

$$S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}}_{\text{расч.}} = 0,19 \text{ см}^4 \text{ в } 2,18 \text{ раза: } \frac{S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}}_{\text{RM10}}}{S_{\text{м}} \times S_{\text{ок}}_{\text{расч.}}} = \frac{0,414}{0,19} = 2,18.$$

Определим число витков обмотки дросселя, полагая, что магнитный поток в сердечнике и ток в обмотке дросселя связаны между собой линейным законом

$$L = w \cdot S_{\text{м}} \frac{B_{\text{м}}}{I_{\text{м}}}, \quad (4.21)$$

откуда

$$w = \frac{L \cdot I_{\text{м}}}{S_{\text{м}} \cdot B_{\text{м}}} = \frac{15 \cdot 10^{-6} \cdot 6}{0,90 \cdot 10^{-4} \cdot 0,06} = 16,67 \text{ витков.}$$

Принимаем $w = 17$ витков (число витков не может быть числом дробным, может быть только числом целым).

Определим длину воздушного зазора в сердечнике по формуле

$$\delta = \frac{\mu_0 \cdot I_{\text{м}} \cdot w}{B_{\text{м}}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 17}{0,06} = 2,136 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2,14 \text{ мм.} \quad (4.22)$$

Это достаточно большое значение воздушного зазора в сердечнике

объясняется тем, что небольшое сечение выбранного сердечника RM10 привело к увеличению числа витков, что, в свою очередь, увеличило длину воздушного зазора.

С целью уменьшения длины воздушного зазора выбираем типоразмер сердечника RM12 (следующий типоразмер сердечника за типоразмером RM10), у которого $\delta = 1,3 \text{ мм}$; $S_M = 125 \text{ мм}^2$ $A_{\min} = 125 \text{ мм}^2$; $S_{\text{ок}} = 81,4 \text{ мм}^2$ (с учетом каркаса для намотки); $V_M = 8320 \text{ мм}^3$. Масса сердечника $M = 45 \text{ грамм}$ Approx. weight 45 g/set (рисунок 4.3).

Определим число витков обмотки дросселя при использовании сердечника RM12

$$w = \frac{L \cdot I_m}{S_M \cdot B_m} = \frac{15 \cdot 10^{-6} \cdot 6}{125 \cdot 10^{-6} \cdot 0,06} = 12 \text{ витков.}$$

Определим длину воздушного зазора в сердечнике при использовании сердечника RM12

$$\delta = \frac{\mu_0 \cdot I_m \cdot w}{B_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 12}{0,06} = 1,508 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,5 \text{ мм.} \quad (4.23)$$

Выбираем сердечник RM12 с зазором $\delta = 1,3 \text{ мм}$ (рисунок 4.3).

Определим число витков обмотки дросселя при использовании сердечника RM12 с зазором $\delta = 1,3 \text{ мм}$ по формуле

$$w = \frac{\delta \cdot B_m}{\mu_0 \cdot I_m} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,06}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6} = 10,345 \text{ витков.} \quad (4.24)$$

Принимаем число витков обмотки дросселя $w = 11 \text{ витков}$.

Определим потери в сердечнике дросселя из феррита марки N87, используя эмпирическую формулу для удельных потерь в материале сердечника вида

$$p = p_0 \cdot \left(\frac{f}{f^*} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_m}{B_m^*} \right)^\beta \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^3} \right], \quad (4.25)$$

где f^* – базовое значение частоты изменения магнитного поля; B_m^* – базовое значение индукции магнитного поля; p_0, α, β – коэффициенты, полученные из обработки экспериментальных зависимостей $p(f, B_m)$ удельных магнитных потерь p от частоты f и максимальной магнитной индукции B_m .

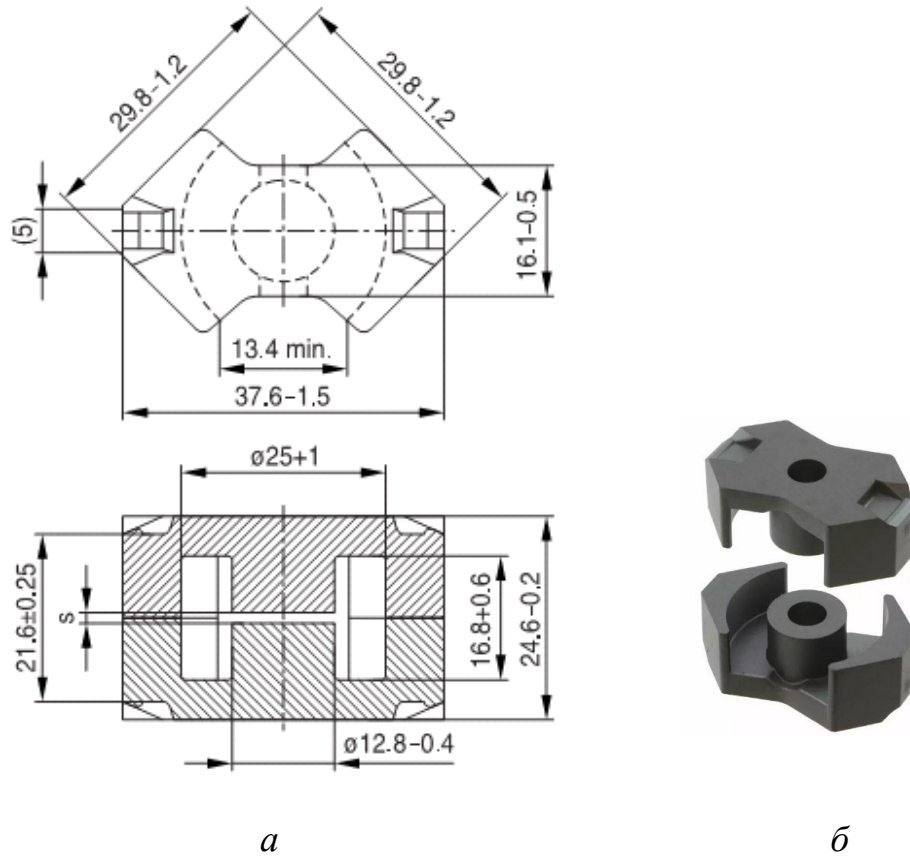


Рисунок 4.3 – Ферритовый сердечник конфигурации RM 12 с зазором: *а* – геометрические размеры; *б* – внешний вид

Для феррита марки N87 $B_m^* = 0,1$ Тл; $f^* = 100$ кГц; $p_0 = 50 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$;

$\alpha = 2,76$; $\beta = 2,09$. Значения B_m^* , f^* , p_0 , α , β – справочные данные.

Потери в сердечнике определяются по формуле

$$\Delta P_M = p \cdot V_M \text{ [Вт]},$$

где V_M – объем сердечника дросселя.

Подставляя числовые значения в формулу (4.25), находим потери в

сердечнике RM12 из феррита марки N87

$$\Delta P_M = 50 \cdot \left(\frac{0,06}{0,1} \right)^{2,76} \cdot \left(\frac{300}{100} \right)^{2,09} \cdot 8320 \cdot 10^{-9} = 1,009 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \approx 1,0 \text{ Вт}.$$

Определим глубину скин-слоя для частоты $f = 300$ кГц и температуры дросселя $T = 70^\circ \text{C}$, используя формулу

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu_0}},$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода обмотки дросселя;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Удельное электрическое сопротивление материала (меди) обмотки при температуре $T = 70^\circ \text{C}$ равно $0,021 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Тогда глубина скин-слоя для частоты $f = 300$ кГц и температуры дросселя $T = 70^\circ \text{C}$

$$\Delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,021 \cdot 10^{-6}}{2\pi \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 1,332 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,133 \text{ мм}.$$

Принимаем решение – обмотку дросселя выполнять из медной фольги толщиной $h = 50$ мкм. При ширине каркаса для RM12 14,8 мм примем ширину фольги $b = 12$ мм. Для числа витков $w = 11$ получим число слоев $n = 11$.

Определим толщину одного слоя обмотки, отнесенную к глубине скин-слоя на частоте $f = 300$ кГц, по формуле

$$x = \frac{h}{\Delta} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0,133 \cdot 10^{-3}} = 0,367.$$

Определим сопротивление провода обмотки дросселя постоянному току при температуре $T = 70^\circ \text{C}$

$$R_{=} = \rho_{70^\circ} \frac{\ell_{\text{ср.в}} \cdot w}{b \cdot h} = 0,021 \cdot 10^{-6} \frac{59,4 \cdot 10^{-3} \cdot 11}{12 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 0,023 \text{ Ом},$$

где $\ell_{\text{ср.в}} = 59,4$ мм – средняя длина витка обмотки дросселя.

Определим коэффициент добавочных потерь $k_{\text{доб.}} = \frac{R_{\sim}}{R_{=}}$, используя

формулу 6.1.14 [2]: $k_{\text{доб.}} = 1,289$.

Определим сопротивление обмотки переменному току

$$R_{\sim} = k_{\text{доб.}} \cdot R_{=} = 1,289 \cdot 0,023 = 0,03 \text{ Ом.}$$

Определим потери мощности в проводе обмотки дросселя

$$\Delta P_{\text{об}} = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot R_{\sim} = \left(\frac{6}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 0,03 = 0,54 \text{ Вт.}$$

Тогда суммарные потери в дросселе

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{об.}} = 1,0 + 0,54 = 1,54 \text{ Вт.}$$

Перегрев дросселя можно определить по формуле

$$\Delta T = \Delta P_{\Sigma} \cdot R_{\text{th}}, \quad (4.26)$$

где $R_{\text{th}} = 25 \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}$ – тепловое сопротивление для сердечника RM с обмоткой.

Тогда $\Delta T = 1,54 \cdot 25 = 38,5 \text{ °C}$.

Необходимо учесть, что дополнительные потери и, следовательно, дополнительный перегрев создадут воздушный зазор в сердечнике.

Изложенная методика позволяет рассмотреть и другие возможные варианты обмоток, например, намотку в несколько проводов или намотку многожильным проводом типа litzendrat [1, 3, 4].

4.3 Методика расчета конструктивных и электромагнитных параметров трансформатора для напряжения прямоугольной формы

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА. Мощность трансформатора $P_{TV} = 1200$ Вт. Частота напряжения на первичной обмотке трансформатора

$f = 50$ кГц. Среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора $U_1 = 300$ В. Длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 8 \cdot 10^{-6}$ с. Среднеквадратичное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора $U_2 = 100$ В. Температура перегрева $\Delta T = 50$ °С.

Форма напряжения на первичной обмотке трансформатора представлена на рисунке 4.4.

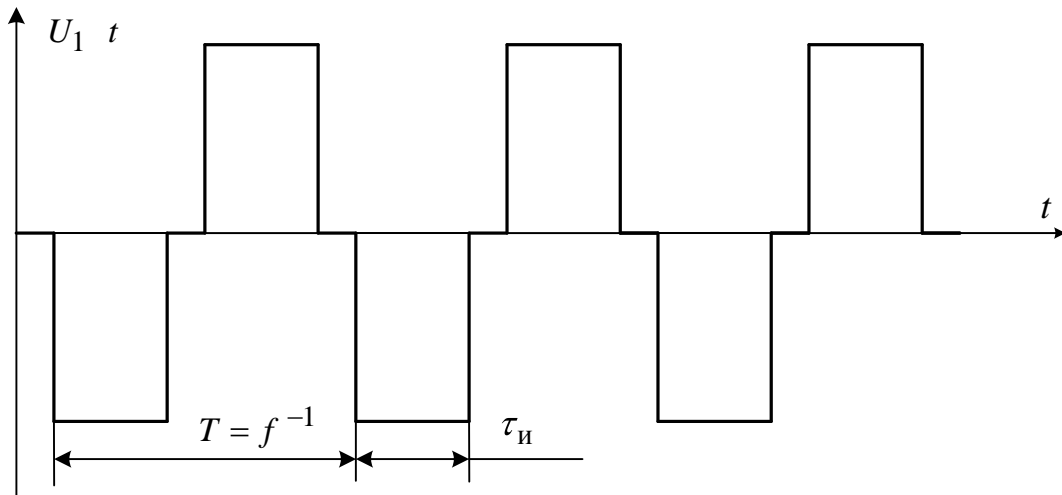


Рисунок 4.4 – Напряжение на первичной обмотке трансформатора

ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ТИПА МАГНИТОПРОВОДА. В качестве магнитопровода выберем магнитопровод ленточный кольцевой, изготовленный из ленты нанокристаллической структуры ГМ412В, 2 класса по магнитным свойствам, в защитном контейнере (ТУ 1261-030-12287107-2007).

Определение требуемого произведения площади окна $S_{\text{ок}}$ магнитопровода на площадь поперечного сечения магнитного материала $S_{\text{м}}$ магнитопровода проводится по формуле

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} = \frac{P_{TV}}{4k_{\phi} \cdot k_{\text{ок1}} \cdot j_1 \cdot f \cdot B_m}, \quad (4.27)$$

где P_{TV} – мощность трансформатора, Вт; k_{ϕ} – коэффициент формы напряжения; $k_{\text{ок1}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом пер-

вичной обмотки; j_1 – плотность тока в проводе первичной обмотки; S_M – площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода, м^2 ; $S_{\text{ок}}$ – площадь окна магнитопровода, м^2 ; f – частота напряжения на первичной обмотке трансформатора, Гц; B_m – максимальная магнитная индукция по динамической петле гистерезиса, Тл.

Для первичной оценки типоразмера магнитопровода рекомендуется задать плотность тока в проводе первичной обмотки $j_1 = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$ и коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом первичной обмотки $k_{\text{ок1}} = 0,1$ [2].

Максимальную магнитную индукцию B_m следует выбирать, используя динамическую кривую намагничивания $B = f H$ при частоте $f = \text{const}$ (рисунок 4.5).

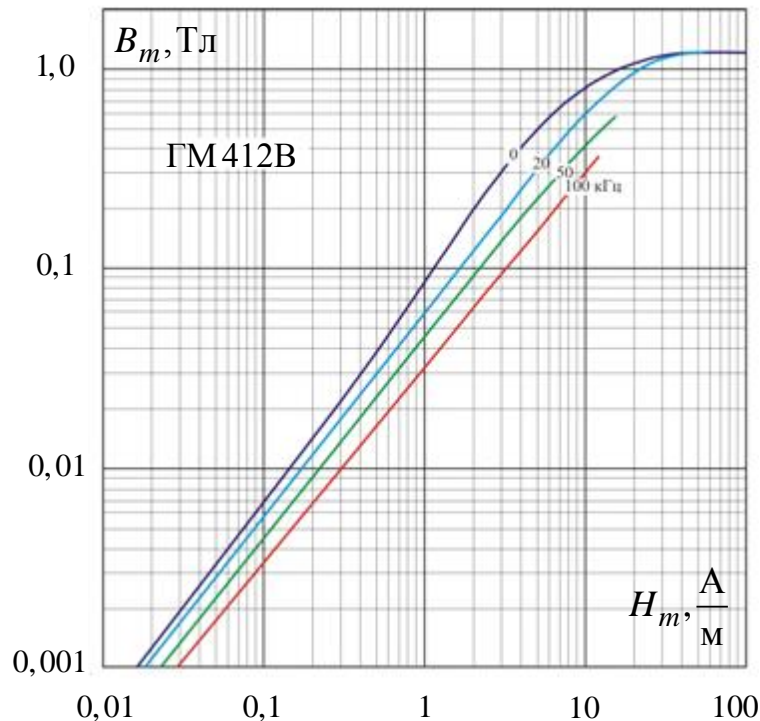


Рисунок 4.5 – Динамические кривые намагничивания магнитного материала ГМ412В

Зададимся величиной $B_m = 0,3$ Тл (динамическая кривая намагничивания $B = f H$ при частоте $f = 50$ кГц).

Подставляя числовые значения физических величин в формулу (4.27), находим требуемое значение $S_{ок} \times S_M$ для трансформатора мощностью $P_{TV} = 1200$ Вт при частоте напряжения на первичной обмотке $f = 50$ кГц

$$S_{ок} \times S_M \text{ расчетное} = \frac{1200}{4 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,3} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4. \quad (4.28)$$

Типоразмер магнитопровода следует выбирать из условия

$$S_{ок} \times S_M \text{ выбранного магнитопровода} \geq S_{ок} \times S_M \text{ расчетное}. \quad (4.29)$$

Из стандартного ряда выбираем магнитопровод ленточный кольцевой ОЛ 40/64-10. Геометрические параметры магнитопровода ГМ 412В в защитном контейнере представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Геометрические параметры магнитопровода ГМ 412В в защитном контейнере

Размеры контейнера, м			$S_{ок} \cdot 10^{-4}, \text{м}^2$	$S_M \cdot 10^{-4}, \text{м}^2$	$S_{ок} \times S_M \cdot 10^{-8}, \text{м}^4$
D_K	d_K	h_K	9,62	0,84	8,08
$69 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$			

Площадь окна магнитопровода определяется геометрическими размерами контейнера по формуле

$$S_{ок} = \frac{\pi \cdot d_K^2}{4}, \quad (4.30)$$

где d_K – внутренний диаметр контейнера.

Площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода определяется геометрическими размерами магнитопровода по формуле

$$S_{\text{м}} = \frac{D - d \cdot h \cdot k_3}{2}, \quad (4.31)$$

где D – наружный диаметр магнитопровода; d – внутренний диаметр магнитопровода; h – высота магнитопровода; k_3 – коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, номинальное значение которого для аморфной ленты равно 0,7 (ТУ 1261-030-12287107-2007).

Подставляя числовые значения в формулы (4.30) – (4.31), находим параметры магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10:

площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода

$$S_{\text{м}} = \frac{64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7}{2} = 0,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

площадь окна магнитопровода

$$S_{\text{ок}} = \frac{\pi \cdot 35 \cdot 10^{-3}^2}{4} = 9,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Тогда $S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}_{\text{ ОЛ 40/64-10}} = 8,08 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ и условие

$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}_{\text{ выбранного магнитопровода}} \geq S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}_{\text{ расчетное}}$ выбора типоразмера магнитопровода выполняется:

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}_{\text{ ОЛ 40/64-10}} = 8,08 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 \geq 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 = S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}_{\text{ расчетное}}.$$

Число витков w_1 первичной обмотки трансформатора для напряжения прямоугольной формы определяется по формуле

$$w_1 = \frac{U_1}{4\sqrt{q} \cdot S_{\text{м}} \cdot f \cdot B_m}, \quad (4.32)$$

где U_1 – среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора; $q = \frac{T}{2 \cdot \tau_{\text{и}}} = \frac{1}{2 \cdot f \cdot \tau_{\text{и}}}$ – скважность импульсов напряжения на первичной обмотке трансформатора.

$$\text{Тогда } w_1 = \frac{300}{4\sqrt{1,25} \cdot 0,84 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,3} = 53,2 \text{ витка.}$$

Принимаем $w_1 = 54$ витка.

Число витков w_2 вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$w_2 = \frac{w_1 \cdot U_2}{U_1}, \quad (4.33)$$

где U_2 – среднеквадратичное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

$$\text{Тогда } w_2 = \frac{54 \cdot 100}{300} = 18 \text{ витков.}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В МАГНИТОПРОВОДЕ ТРАНСФОРМАТОРА. Потери в магнитопроводе определяются выражением

$$P_M = p_M \cdot V_M \cdot \gamma \cdot k_{нс}, \quad (4.34)$$

где p_M – удельные магнитные потери в магнитном материале магнитопровода; V_M – объем магнитного материала магнитопровода; γ – плотность магнитного материала магнитопровода; $k_{нс}$ – коэффициент увеличения потерь в материале магнитопровода вследствие несинусоидальности магнитной индукции.

Для магнитного материала ГАММАМЕТ 412В удельные магнитные потери при частоте $200 \text{ кГц} \leq f \leq 3 \text{ кГц}$ и максимальной магнитной индукции $B_m \leq 1,0 \text{ Тл}$ определяются эмпирическим выражением

$$p = 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} \cdot B_m^{2,05} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right). \quad (4.35)$$

Тогда удельные магнитные потери в материале ГМ 412В

$$p = 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,3^{1,7} \cdot 0,3^{2,05} = 27,22 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}.$$

Объем магнитного материала магнитопровода ленточного кольцевого

определяется по формуле

$$V_M = \frac{\pi D^2 - d^2}{4} \times h \times k_3, \quad (4.36)$$

где k_3 – номинальный коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, равный 0,7.

Тогда объем магнитного материала магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10

$$V_M = \frac{\pi \left[64 \cdot 10^{-3}^2 - 40 \cdot 10^{-3}^2 \right]}{4} \times 10 \cdot 10^{-3} \times 0,7 = 13,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Коэффициент увеличения потерь в материале магнитопровода вследствие несинусоидальности магнитной индукции определим, используя зависимость $k_{нс} = f\left(\frac{\tau_{и}}{T}\right)$ (рисунок 4.6).

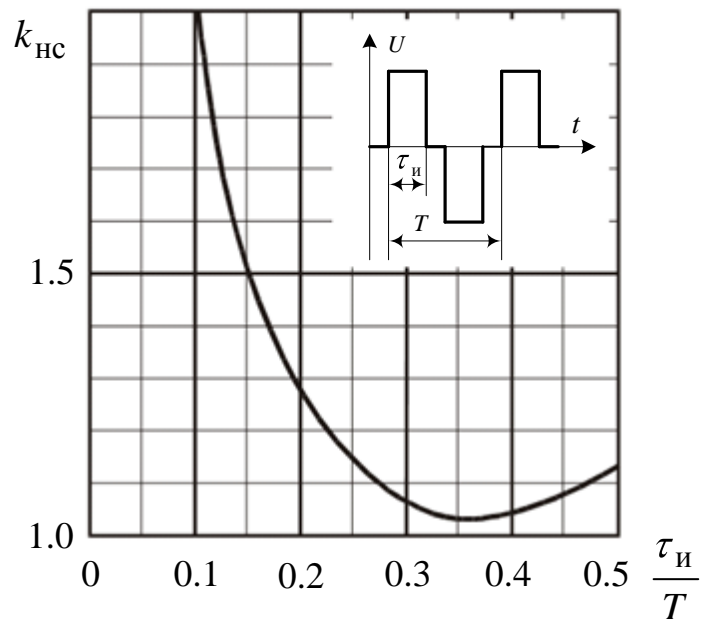


Рисунок 4.6 – Коэффициент $k_{нс}$ увеличения потерь в материале магнитопровода вследствие несинусоидальности магнитной индукции [2]

Для величины $\frac{\tau_{и}}{T} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6}} = 0,4$ коэффициент $k_{нс} = 1,04$. Плотность

магнитного материала ГАММАМЕТ 412В $\gamma = 7400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Подставляя числовые значения в формулу в формулу (4.34), находим мощность потерь в магнитопроводе ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10

$$P_M = 27,22 \cdot 13,72 \cdot 10^{-6} \cdot 7400 \cdot 1,04 = 2,87 \text{ Вт.} \quad (4.37)$$

Мощность потерь в проводе первичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$P_{\text{об.1}} = \frac{P_{TV}}{U_1} \cdot w_1 \cdot j_1 \cdot \rho_o \cdot \ell_{\text{ср.в}} \cdot k_{\text{доб}} \cdot k_T, \quad (4.38)$$

где P_{TV} – номинальная мощность трансформатора; U_1 – среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора; w_1 – число витков первичной обмотки трансформатора; j_1 – плотность тока в проводе первичной обмотке трансформатора; ρ_o – удельное электрическое сопротивление материала провода обмотки при начальной температуре T_o ; $\ell_{\text{ср.в}}$ – средняя длина одного витка первичной обмотки; $k_{\text{доб}}$ – коэффициент добавочных потерь (учитывает добавочные потери, которые возникают при переменном токе высокой частоты); k_T – коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева.

Коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева определяется выражением

$$k_T = 1 + \alpha_\rho \cdot \Delta T, \quad (4.39)$$

где α_ρ – температурный коэффициент удельного сопротивления (чаще используется обозначение ТК_ρ).

Для медного провода $\alpha_\rho = 4,3 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ и тогда $k_T = 1 + 4,3 \times 10^{-3} \cdot \Delta T \approx 1 + 0,004 \cdot \Delta T$. При заданной температуре перегрева $\Delta T = 50^\circ \text{С}$ коэффициент увеличения удельного электрического сопротивле-

ния провода обмотки $k_T = 1 + 4,3 \times 10^{-3} \cdot 50 = 1,215$.

Средняя длина $\ell_{\text{ср.в}}$ одного витка первичной обмотки определяется по формуле

$$\ell_{\text{ср.в}} = \pi \sqrt{\left(\frac{D_K - d_K}{2}\right)^2 + h_K^2}, \quad (4.40)$$

где D_K – наружный диаметр контейнера; d_K – внутренний диаметр контейнера; h_K – высота контейнера.

Тогда

$$\ell_{\text{ср.в}} = \pi \sqrt{\left(\frac{69 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 + 15 \cdot 10^{-3}^2} = 71,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Подставляя числовые значения в формулу (4.38), находим величину потерь в проводе первичной обмотки трансформатора

$$P_{\text{об.1}} = \frac{1200}{300} \cdot 54 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-9} \cdot 71,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 \cdot 1,215 = 0,79 \text{ Вт.}$$

При выполнении условия $i_\mu \ll i_1$ для тока намагничивания потери во вторичной обмотке равны потерям в первичной обмотке: $P_{\text{об.2}} = P_{\text{об.1}}$.

Тогда мощность потерь в обмотках трансформатора

$$P_{\text{об}} = 2P_{\text{об.1}} = 2 \cdot 0,79 = 1,58 \text{ Вт.}$$

Следовательно, можно увеличить потери в обмотках трансформатора до значения 2,87 Вт, например, путем увеличения плотности тока, но при условии, что перегрев трансформатора не превысит заданной величины.

При частоте 50 кГц рекомендуется выбирать провод с диаметром одиночной медной жилы $d_1 = 0,125$ мм (или $d_1 = 0,100$ мм) [1]. При выполнении этого условия $k_{\text{доб}} = 1,0$.

Выбираем для первичной обмотки медный провод марки ПЭВТЛ-2 диаметром одиночной медной жилы без изоляции $d_{\text{пр1}} = 0,125$ мм

(ГОСТ26615-85).

Число жил провода первичной обмотки определяется по формуле

$$n_{w1} = \frac{4P_{TV}}{\pi \cdot d_{\text{пр1}}^2 \cdot U_1 \cdot j_1}, \quad (4.41)$$

де P_{TV} – номинальная мощность трансформатора; $d_{\text{пр1}}$ – диаметр одиночной медной жилы провода марки ПЭВТЛ-2 без изоляции; U_1 – среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора; j_1 – плотность тока в проводе первичной обмотки трансформатора.

Тогда число жил провода первичной обмотки

$$n_{w1} = \frac{4 \cdot 1200}{\pi \cdot 0,125 \cdot 10^{-3}{}^2 \cdot 300 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 130.$$

Число жил провода вторичной обмотки определяется по формуле

$$n_{w2} = \frac{4P_{TV} \cdot w_1}{\pi \cdot d_{\text{пр2}}^2 \cdot U_1 \cdot j_2 \cdot w_2}, \quad (4.42)$$

где P_{TV} – номинальная мощность трансформатора; $d_{\text{пр2}}$ – диаметр одиночной медной жилы провода марки ПЭВТЛ-2 без изоляции; U_1 – среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора; j_2 – плотность тока в проводе вторичной обмотки трансформатора; w_1 – число витков первичной обмотки трансформатора; w_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора.

Выбираем для вторичной обмотки медный провод марки ПЭВТЛ-2 диаметром одиночной медной жилы без изоляции $d_{\text{пр2}} = 0,125$ мм (ГОСТ26615-85).

Тогда число жил провода вторичной обмотки

$$n_{w2} = \frac{4 \cdot 1200 \cdot 54}{\pi \cdot 0,125 \cdot 10^{-3}{}^2 \cdot 300 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 18} = 390.$$

Суммарные потери мощности в трансформаторе определяются по формуле

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{об}} + P_{\text{м}}, \quad (4.43)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность потерь в первичной и вторичной обмотках трансформатора; $P_{\text{м}}$ – мощность потерь в магнитном материале магнитопровода трансформатора.

Тогда суммарные потери мощности в трансформаторе

$$P_{\text{пот}} = 1,58 + 2,87 = 4,45 \text{ Вт}.$$

Перегрев трансформатора определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{P_{\text{об}} + P_{\text{м}}}{\alpha_{\text{т}} \cdot S_{\text{ТВ}}}, \quad (4.44)$$

где $\alpha_{\text{т}}$ – коэффициент теплоотдачи; $S_{\text{ТВ}}$ – площадь поверхности трансформатора (площадь охлаждения трансформатора).

Коэффициент теплоотдачи при естественном охлаждении

$$\alpha_{\text{т}} = 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}. \quad (4.45)$$

Площадь охлаждения трансформатора тороидальной конструкции определяется по формуле

$$П_{\text{ТВ}} = 2 \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{к}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \right) + \pi \cdot D_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}} + \pi \cdot d_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}, \quad (4.46)$$

где $D_{\text{к}}$ – наружный диаметр контейнера магнитопровода ленточного кольцевого; $d_{\text{к}}$ – внутренний диаметр контейнера; $h_{\text{к}}$ – высота контейнера.

Тогда площадь охлаждения трансформатора

$$П_{\text{ТВ}} = 2 \left[\frac{\pi \cdot 69 \cdot 10^{-3}^2}{4} - \frac{\pi \cdot 35 \cdot 10^{-3}^2}{4} \right] + \\ + \pi \cdot 69 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3} + \pi \cdot 35 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 14,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

а расчетная температура перегрева трансформатора

$$\Delta T_{\text{расчетная}} = \frac{1,58 + 2,87}{12 \cdot 14,3 \cdot 10^{-3}} = 25,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, условие $\Delta T_{\text{расчетная}} = 25,9 \text{ } ^\circ\text{C} < 50 \text{ } ^\circ\text{C} = \Delta T_{\text{заданная}}$ выполняется.

На заключительном этапе расчета магнитного элемента рекомендуется проверить выполнение условия

$$k_{\text{ок.расчетное}} \leq k_{\text{ок.рекомендуемое}}, \quad (4.47)$$

где $k_{\text{ок.расчетное}}$ – расчетный коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом первичной и вторичной обмоток; $k_{\text{ок.рекомендуемое}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом первичной и вторичной обмоток, рекомендуемый специалистами по магнитным элементам.

Расчетный коэффициент заполнения окна магнитопровода многожильным проводом обмоток магнитного элемента, выполненном на кольцевом магнитопроводе в защитном контейнере, определяется по формуле

$$k_{\text{ок.расчетное}} = \frac{4}{\pi \cdot d_{\text{к}}^2} \sum_{i=1}^N S_{\text{пр.из.}i} \cdot n_{wi} \cdot w_i, \quad (4.48)$$

где $d_{\text{к}}$ – внутренний диаметр контейнера; $S_{\text{пр.из.}i}$ – площадь сечения жилы с изоляцией i -ой обмотки; n_{wi} – число жил провода i -ой обмотки; w_i – число витков i -ой обмотки.

Для двухобмоточного трансформатора формула (4.48) принимает вид

$$k_{\text{ок.расчетное}} = \frac{4 \cdot S_{\text{пр.из.1}} \cdot n_{w1} \cdot w_1 + S_{\text{пр.из.2}} \cdot n_{w2} \cdot w_2}{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}. \quad (4.49)$$

Площадь сечения эмалированного провода круглого сечения определяется по формуле

$$S_{\text{пр.из.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{из.мак}}^2}{4},$$

где $d_{\text{из.мах}}$ – максимальный наружный диаметр провода в изоляции.

Для медного провода марки ПЭВТЛ-2 диаметром одиночной медной жилы без изоляции $d_{\text{пр}2} = 0,125$ мм максимальный наружный диаметр провода в изоляции $d_{\text{из.мах}} = 0,154$ мм (ГОСТ26615-85).

$$\text{Тогда } S_{\text{пр.из.}} = \frac{\pi \cdot 0,154 \cdot 10^{-3}^2}{4} = 18,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2.$$

Подставляя числовые значения в формулу (4.49), находим расчетное значение коэффициента заполнения окна магнитопровода многожильным проводом обмоток трансформатора

$$k_{\text{ок.расчетное}} = \frac{4 \cdot 18,6 \cdot 10^{-9} \cdot 130 \cdot 54 + 18,6 \cdot 10^{-9} \cdot 390 \cdot 18}{\pi \cdot 35 \cdot 10^{-3}^2} = 0,086.$$

Таким образом, условие $k_{\text{ок.расчетное}} = 0,086 \leq 0,1 = k_{\text{ок.рекомендуемое}}$ выполняется.

4.4 Методика расчета трансформатора двухтактного мостового высокочастотного транзисторного преобразователя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА. На первичной обмотке w_1 трансформатора высокочастотного транзисторного преобразователя (рисунок 4.7) формируется переменное напряжение прямоугольной формы с амплитудой $U_{1m} = 500$ В, периодом $T = 20 \cdot 10^{-6}$ с, длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 8 \cdot 10^{-6}$ с (рисунок 4.8). Напряжение на вторичной обмотке $U_{2m} = 150$ В. Мощность высокочастотного трансформатора $P_{TV} = 1200$ Вт, температура перегрева $\Delta T = 20^\circ \text{C}$.

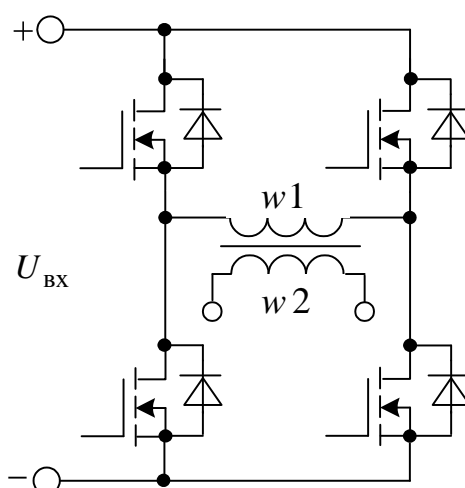


Рисунок 4.7 – Двухтактная мостовая структура высокочастотного транзисторного преобразователя (Full Bridge)

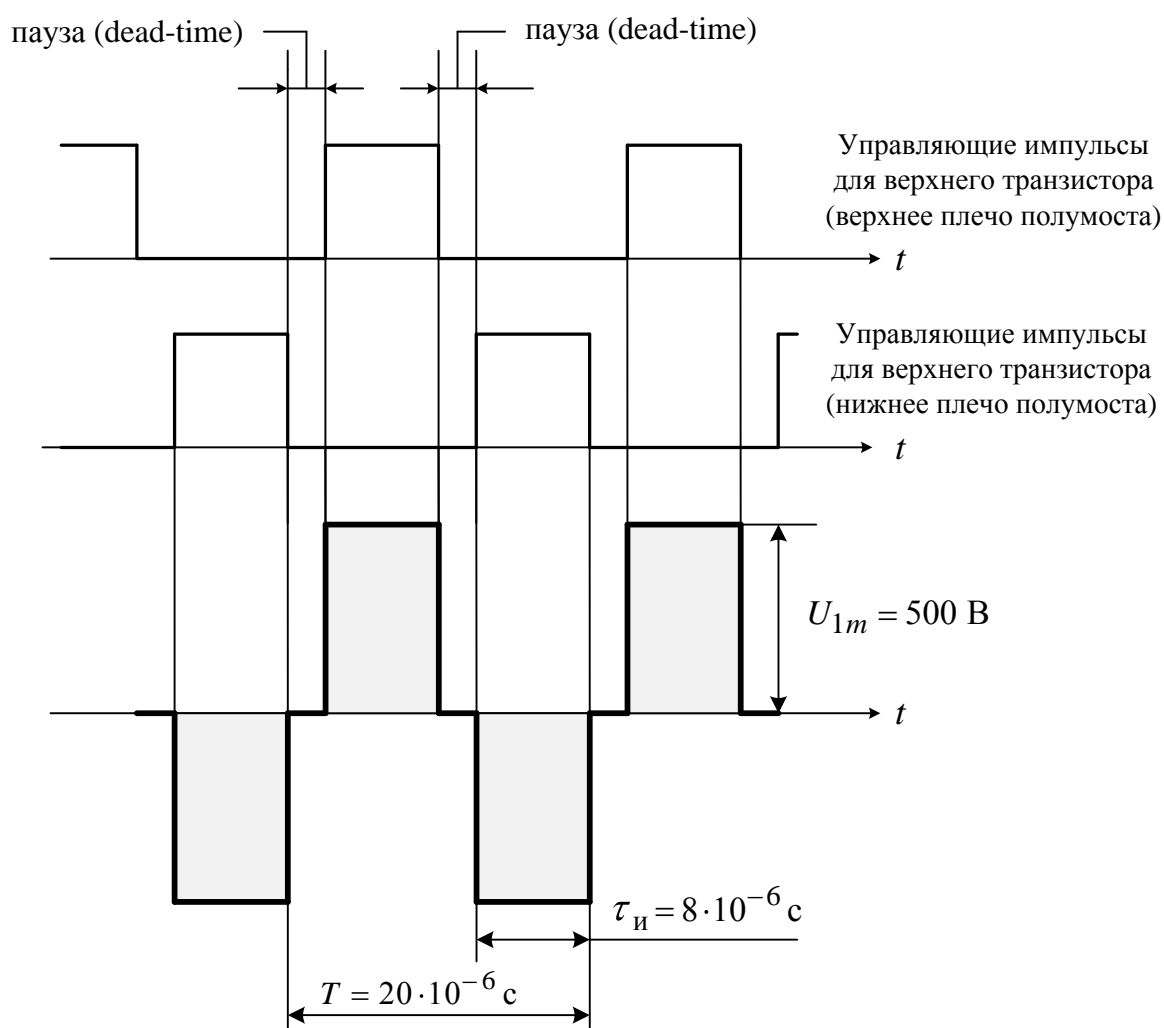


Рисунок 4.8 – Формирование переменного напряжения на первичной обмотке высокочастотного транзисторного преобразователя

Расчет трансформатора сводится к определению конструктивных и электромагнитных параметров трансформатора и предполагает выполнение ряда последовательных шагов.

ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА МАГНИТОПРОВОДА. Для первоначального выбора типоразмера магнитопровода используется габаритный параметр $G_{\text{расч.}}$. Габаритный параметр трансформатора в режиме переменного напряжения прямоугольной формы определяется выражением [3]

$$G_{\text{расч.}} = \frac{8 \cdot \sqrt{q}}{\pi^2} \cdot P_{\text{ТВ}} \cdot j_1 \cdot \frac{\rho_0 \cdot k_{\text{доб}} \cdot k_T \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \tau_{\text{и}}}{T}\right)}{\alpha \cdot \Delta T} \times \left(\frac{2 \cdot \gamma_{\text{н}} \cdot r \cdot \gamma}{\alpha \cdot \Delta T \cdot f^{(s-p)}} \right)^{\frac{1}{s}} \quad (4.50)$$

где $q = \frac{T}{2 \cdot \tau_{\text{и}}}$ – скважность импульсов; T – период переменного напряжения прямоугольной формы; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса; $P_{\text{ТВ}}$ – мощность трансформатора; j_1 – плотность тока в первичной обмотке трансформатора; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала провода обмотки; $k_{\text{доб}}$ – коэффициент увеличения сопротивления провода вследствие скин-эффекта; k_T – коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления материала провода вследствие нагрева; α – коэффициент теплоотдачи; ΔT – температура перегрева трансформатора; $\gamma_{\text{н}}$ – коэффициент увеличения потерь в материале магнитопровода при несинусоидальном напряжении; γ – плотность материала магнитопровода; r, s, p – эмпирические коэффициенты в формуле удельных магнитных потерь $p = r \cdot f^p \cdot B_m^s \left(\frac{\text{ВТ}}{\text{КГ}} \right)$.

При расчете габаритного параметра используются следующие числовые значения. Мощность трансформатора $P_{\text{ТВ}} = 1200 \text{ Вт}$, плотность тока

$j_1 = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$, удельное электрическое сопротивление

$\rho_0 = 17 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, коэффициент теплоотдачи $\alpha = 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ (среднее

значение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции в интервале температуры перегрева $20 \dots 50^\circ \text{C}$); плотность материала магнитопровода

$\gamma = 7400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; коэффициент увеличения удельного электрического сопротив-

ления материала провода вследствие нагрева $k_T = 1,1$ (при температуре пере-

грева $\Delta T = 20^\circ \text{C}$); скважность импульса $q = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 1,25$.

Для определения коэффициента γ_H увеличения потерь в материале магнитопровода при напряжении прямоугольной формы используется выражение

$$\gamma_H = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{T}{\tau_H}. \quad (4.51)$$

Подставляя числовые значения параметров переменного напряжения прямоугольной формы в формулу (4.51), находим коэффициент увеличения потерь в материале магнитопровода при воздействии на первичную обмотку трансформатора напряжения прямоугольной формы

$$\gamma_H = \frac{4}{3,14^2} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-6}} = 1,01. \quad (4.52)$$

Коэффициент γ_H представляет отношение удельных магнитных потерь при несинусоидальной форме напряжения к удельным магнитным потерям для первой гармоники магнитной индукции при заданном максимальном напряжении U_m .

Выбираем магнитопровод ленточный кольцевой ГАММАМЕТ в защитном контейнере, материал магнитопровода ГМ 412В – 2 кл. На рисунке

4.9 представлена структура условного обозначения типа магнитопровода.

Для материала магнитопровода ГАММАМЕТ 412В в защитном контейнере удельные магнитные потери в магнитопроводе при частоте $200\text{кГц} \geq f \geq 3\text{кГц}$ и максимальной магнитной индукции $B_m \leq 1,0\text{ Тл}$ определяются выражением $p = r \cdot f^p \cdot B_m^s = 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} \cdot B_m^2$, откуда $r = 3,3 \cdot 10^{-6}$, $p = 1,7$, $s = 2$.



Рисунок 4.9 – Структура условного обозначения типа магнитопровода

Подставляя числовые значения в формулу (4.50), определяем величину габаритного параметра

$$G_{\text{расч.}} = \frac{8 \cdot \sqrt{1,25}}{\pi^2} \cdot 1200 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot \frac{17 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot \sin \pi \cdot 0,4}{12 \cdot 20} \times$$

$$\times \left(\frac{2 \cdot 1,01 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 7400}{12 \cdot 20 \cdot 50000^{(2-1,7)}} \right)^{\frac{1}{2}} = 5,7 \cdot 10^{-4}. \quad (4.53)$$

Из каталога ГАММАМЕТ для частотного диапазона $200\text{ кГц} \geq f \geq 3\text{ кГц}$ выбираем магнитопровод, для которого габаритный параметр $G_{\text{выбр.}} \geq G_{\text{расч.}}$. Полагаем, что этому условию отвечает магнитопро-

вод ГМ 412В – 2 кл ОЛ 40/64-20 ТУ 1261-030-12287107-2007.

Для выбранного типоразмера магнитопровода габаритный параметр G определяется по формуле [1]

$$G = \frac{S \cdot S_{\text{ТВ}}}{\ell_{\text{ВИТ}}} \cdot \left(\frac{S_{\text{ТВ}}}{V_{\text{М}}} \right)^{\frac{1}{s}}, \quad (4.54)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода; $V_{\text{М}}$ – объем материала магнитопровода, равный произведению геометрического объема магнитопровода V на коэффициент заполнения k_3 магнитопровода магнитным материалом, номинальное значение которого для аморфной ленты равно 0,7; $S_{\text{ТВ}}$ – площадь поверхности трансформатора; $\ell_{\text{ВИТ}}$ – средняя длина одного витка провода; s – эмпирический коэффициент в формуле удельных магнитных потерь $p = r \cdot f^p \cdot B_m^s \left(\frac{\text{ВТ}}{\text{КГ}} \right)$.

На рисунке 4.10 представлена структура условного обозначения типоразмера магнитопровода ГМ ОЛ 40/64-20 (ТУ 1261-030-12287107-2007).

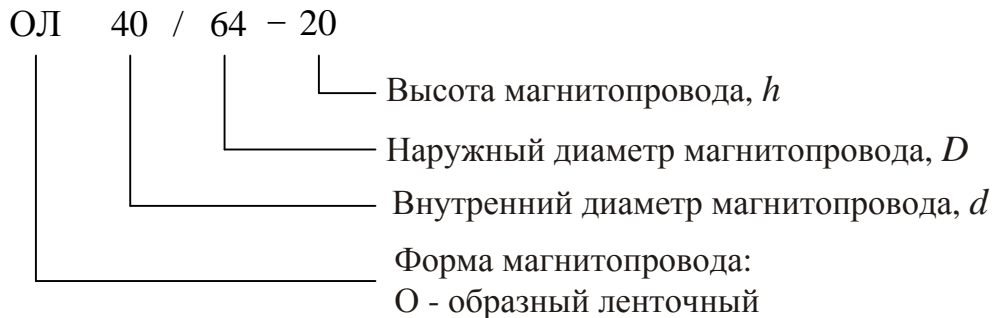


Рисунок 4.10 – Структура условного обозначения типоразмера магнитопровода

Определим параметры для магнитопровода ГАММАМЕТ ОЛ 40/64-20 с уровнем магнитных свойств 2 класса, используя выражения (4.55) – (4.59).

Среднюю длину магнитной силовой линии магнитопровода вычисляют по формуле

$$\ell_{\text{ср}} = \pi \frac{D+d}{2} \text{ при } \frac{D}{d} \leq 1,3 \quad (4.55)$$

или по формуле

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{\pi}{\ln \frac{D}{d}} \frac{D-d}{2} \text{ при } \frac{D}{d} \geq 1,3, \quad (4.56)$$

где D – номинальный наружный диаметр магнитопровода, м; d – номинальный внутренний диаметр магнитопровода, м; d – номинальная высота магнитопровода, м.

Площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода определяется геометрическими размерами магнитопровода по формуле

$$S = \frac{D-d}{2} \cdot h \cdot k_3, \quad (4.57)$$

где k_3 – номинальный коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, равный 0,7.

Площадь поверхности трансформатора определяется по формуле

$$S_{\text{ТВ}} = k \cdot \ell_{\text{ср}} \cdot (D-d + 2h), \quad (4.58)$$

где $\ell_{\text{ср}} = \frac{\pi}{\ln \frac{D}{d}} \frac{D-d}{2}$; k – коэффициент увеличения площади поверхности

трансформатора по сравнению с площадью магнитопровода (для магнитопровода в защитном контейнере $k = 2$).

Средняя длина одного витка провода обмотки трансформатора определяется геометрическими параметрами защитного контейнера магнитопровода по формуле

$$\ell_{\text{ВИТ}} = \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{D_{\text{к}} - d_{\text{к}}}{2}\right)^2 + h_{\text{к}}^2}, \quad (4.59)$$

где $D_{\text{к}}$ – наружный диаметр контейнера; $d_{\text{к}}$ – внутренний диаметр контейнера; $h_{\text{к}}$ – высота контейнера.

Размеры кольцевого защитного контейнера для магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-20 (ТУ 1261-030-12287107-2007) представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Размеры $d_k / D_k - h_k$ кольцевого защитного контейнера магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-20 ТУ 1261-030-12287107-2007

Наружный диаметр магнитопровода D , мм	Наружный диаметр защитного контейнера D_k , мм	Внутренний диаметр защитного контейнера d_k , мм	Высота защитного контейнера h_k , мм
64	69	35	25

Объем материала магнитопровода определяется произведением геометрического объема магнитопровода на коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом

$$V_M = V \times k_3 = \pi \cdot S \cdot \left(\frac{D+d}{2} \right) \times k_3, \quad (4.60)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода; k_3 – коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, номинальное значение которого для аморфной ленты равно 0,7.

Подставляя числовые значения в формулы (4.55) – (4.59), находим параметры магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-20:

площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода

$$S = \frac{64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7}{2} = 16,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

среднюю длину магнитной силовой линии магнитопровода

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot 64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{64 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-3}}} = 0,160 \text{ м};$$

площадь поверхности трансформатора

$$S_{\text{ТВ}} = 2 \cdot 0,160 \cdot 64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 20,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

среднюю длину одного витка провода обмотки трансформатора

$$l_{\text{ВИТ}} = \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{69 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 + 25 \cdot 10^{-3}^2} = 0,095 \text{ м};$$

объем материала магнитопровода

$$V_{\text{М}} = \pi \cdot 16,8 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{64 \cdot 10^{-3} + 40 \cdot 10^{-3}}{2}\right) \times 0,7 = 19,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Тогда для магнитопровода ГМ ОЛ 40/64-20 с уровнем магнитных свойств 2 класса габаритный параметр

$$G_{\text{выбр.}} = \frac{16,8 \cdot 10^{-5} \cdot 20,48 \cdot 10^{-3}}{0,095} \cdot \left(\frac{20,48 \cdot 10^{-3}}{19,2 \cdot 10^{-6}}\right)^{\frac{1}{2}} = 11,83 \cdot 10^{-4}. \quad (4.61)$$

Для типоразмера магнитопровода ГМ ОЛ 40/64-20 условие $G_{\text{выбр.}} = 11,83 \cdot 10^{-4} \geq 5,7 \cdot 10^{-4} = G_{\text{расч.}}$ выполняется. Однако габаритная мощность магнитопровода ГМ ОЛ 40/64-20 больше расчетной габаритной мощности в 2,075 раза:

$$\frac{G_{\text{выбр.}}}{G_{\text{расч.}}} = \frac{11,83 \cdot 10^{-4}}{5,7 \cdot 10^{-4}} = 2,075. \text{ В этом случае целесообразно}$$

выбрать магнитопровод меньшего типоразмера, а затем убедиться, что для этого магнитопровода условие $G_{\text{выбр.}} \geq G_{\text{расч.}}$ выполняется. Полагаем, что этому условию отвечает магнитопровод ГМ 412В – 2 кл ОЛ 40/64-10 (ТУ 1261-030-12287107-2007).

Размеры кольцевого защитного контейнера для магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10 ТУ 1261-030-12287107-2007 представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Размеры $d_k / D_k - h_k$ кольцевого защитного контейнера магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10 ТУ 1261-030-12287107-2007

Наружный диаметр магнитопровода D , мм	Наружный диаметр защитного контейнера D_k , мм	Внутренний диаметр защитного контейнера d_k , мм	Высота защитного контейнера h_k , мм
64	69	35	15

Используя выражения (4.55) – (4.59), определим параметры магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10:

площадь поперечного сечения магнитного материала магнитопровода

$$S = \frac{64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7}{2} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

среднюю длину магнитной силовой линии магнитопровода

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot 64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{64 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-3}}} = 0,160 \text{ м};$$

площадь поверхности трансформатора

$$S_{\text{ТВ}} = 2 \cdot 0,160 \cdot 64 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 14,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

среднюю длину одного витка провода обмотки трансформатора

$$\ell_{\text{ВИТ}} = \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{69 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 + 15 \cdot 10^{-3}^2} = 0,071 \text{ м};$$

объем материала магнитопровода

$$V_{\text{М}} = \pi \cdot 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{64 \cdot 10^{-3} + 40 \cdot 10^{-3}}{2} \right) \times 0,7 = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Тогда для магнитопровода ГМ 412В ОЛ40/64-10 с уровнем магнитных свойств 2 класса габаритный параметр

$$G_{\text{выбр.}} = \frac{8,4 \cdot 10^{-5} \cdot 14,08 \cdot 10^{-3}}{0,071} \cdot \left(\frac{14,08 \cdot 10^{-3}}{9,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}} = 6,38 \cdot 10^{-4}.$$

Для типоразмера магнитопровода ГМ ОЛ 40/64-10 условие $G_{\text{выбр.}} = 6,38 \cdot 10^{-4} \geq 5,7 \cdot 10^{-4} = G_{\text{расч.}}$ также выполняется, при этом

$$\frac{G_{\text{выбр.}}}{G_{\text{расч.}}} = \frac{6,38 \cdot 10^{-4}}{5,7 \cdot 10^{-4}} = 1,12.$$

Таким образом, исходным данным в большей степени отвечает магнитопровод ГМ 412В – 2кл ОЛ40/64-10 ТУ 1261-030-12287107-2007.

Определим величину максимальной магнитной индукции B_m . Максимальная магнитная индукция в материале магнитопровода при заданной частоте и температуре перегрева трансформатора определяется выражением

$$B_m = \left(\frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot S_{\text{ТВ}}}{2 \cdot \gamma_{\text{Н}} \cdot r \cdot f^p \cdot V_{\text{М}} \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{s}}, \quad (4.62)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; ΔT – температура перегрева трансформатора; $S_{\text{ТВ}}$ – площадь поверхности трансформатора; $\gamma_{\text{Н}}$ – коэффициент увеличения потерь в материале магнитопровода при несинусоидальном напряжении; γ – плотность материала магнитопровода; $V_{\text{М}}$ – объем материала магнитопровода; f – частота напряжения на первичной обмотке трансформатора; r, p, s – эмпирические коэффициенты в формуле удельных магнитных потерь $p = r \cdot f^p \cdot B_m^s \left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right)$.

Подставляя числовые значения $\alpha = 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$; $\Delta T = 20^\circ \text{С}$;

$S_{\text{ТВ}} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $r = 3,3 \cdot 10^{-6}$; $p = 1,7$; $s = 2$; $f = 50 \cdot 10^3 \text{ Гц}$; $\gamma_{\text{Н}} = 1,01$;

$\gamma = 7400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $V_{\text{М}} = 5,919 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, определяем числовое значение магнитной

индукции в материале магнитопровода ГМ 412В – 2кл ОЛ 40/64-10

$$B_m = \left(\frac{12 \cdot 20 \cdot 14,08 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,01 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 50000^{1,7} \cdot 9,6 \cdot 10^{-6} \cdot 7400} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,271 \text{ Тл.}$$

На рисунке 4.5 представлены динамические кривые намагничивания магнитопровода ГМ 412В. Примем $B_m = 0,3$ Тл, при этом следует ожидать, что перегрев трансформатора будет больше $\Delta T = 20^\circ \text{C}$.

Число витков w_1 первичной обмотки трансформатора определим по формуле

$$w_1 = \frac{U_{1m}}{4q \cdot f \cdot S \cdot B_m}, \quad (4.63)$$

где U_{1m} – амплитудное значение напряжения на первичной обмотке транс-

форматора; $q = \frac{T}{2 \cdot \tau_{и}}$ – скважность импульса; S – площадь поперечного се-

чения магнитного материала магнитопровода; B_m – максимальная магнитная индукция в материале магнитопровода.

Тогда

$$w_1 = \frac{U_{1m}}{4q \cdot f \cdot S \cdot B_m} = \frac{500}{4 \cdot 1,25 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3} = 79,4,$$

где $q = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 1,25$ – скважность импульса.

Примем число витков первичной обмотки трансформатора $w_1 = 80$.

Определим число витков w_2 вторичной обмотки трансформатора по формуле

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = 80 \cdot \frac{150}{500} = 24.$$

Определение мощности потерь, рассеиваемой поверхностью трансформатора. Наибольший коэффициент полезного действия трансформатор имеет при условии равенства мощности потерь в магнитопроводе P_M и в обмотках $P_{об}$.

Потери в магнитопроводе определяются выражением

$$P_M = p_M \cdot V_M \cdot \gamma, \quad (4.64)$$

где $p_M = r \cdot f^p \cdot B_m^s$ – удельные магнитные потери, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right]$; V_M – объем магнитного материала магнитопровода, кг; γ – плотность материала магнитопровода.

Для магнитного материала ГАММАМЕТ 412В удельные магнитные потери $p_M = 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 1,7 \cdot 0,3^2 = 28,9 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ при частоте $f = 50 \cdot 10^3$ Гц и магнитной индукции, равной 0,3 Тл.

Тогда, потери в магнитном материале магнитопровода трансформатора составляют

$$P_M = 28,9 \cdot 9,6 \cdot 10^{-6} \cdot 7,4 \cdot 10^3 = 2,05 \text{ Вт}.$$

Потери в проводе первичной обмотки трансформатора определим по формуле

$$P_{об.1} = \frac{P_{ТВ}}{U_1} w_1 \cdot j_1 \cdot \rho_0 \cdot \ell_{ср.вит.1} \cdot k_{доб.} \cdot k_T, \quad (4.65)$$

где $P_{ТВ}$ – мощность трансформатора; U_1 – среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора; w_1 – число витков первичной обмотки трансформатора; j_1 – плотность тока в проводе первичной обмотки трансформатора; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала провода первичной обмотки трансформатора при начальной температуре T_0 ; $\ell_{ср.вит.1}$ – средняя длина одного витка первичной обмотки; $k_{доб.}$ –

коэффициент добавочных потерь; k_T – коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева.

Среднеквадратичное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора определяется выражением

$$U_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\tau_{\text{им}}} U_{1m}^2 \cdot dt} = U_{1m} \sqrt{\frac{2\tau_{\text{им}}}{T}}. \quad (4.66)$$

Тогда

$$U_1 = 500 \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6}}} = 447,2 \text{ В}.$$

Плотность тока в проводе первичной обмотки трансформатора рекомендуется выбирать равной $2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева определяется выражением

$$k_T = 1 + \alpha_\rho \cdot \Delta T, \quad (4.67)$$

где α_ρ – температурный коэффициент удельного сопротивления (чаще используется обозначение ТК_ρ).

Для медного провода $\alpha_\rho = 4,3 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ и тогда $k_T = 1 + 4,3 \times 10^{-3} \cdot \Delta T \approx 1 + 0,004 \cdot \Delta T$. При заданной температуре перегрева $\Delta T = 20^\circ \text{С}$ коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки $k_T = 1 + 4,3 \times 10^{-3} \cdot 20 = 1,086$.

Коэффициент добавочных потерь $k_{\text{доб}}$ определим, используя зависимость коэффициента добавочных потерь от параметра $d_1 \sqrt{f}$, где d_1 – диаметр провода первичной обмотки трансформатора (рисунок 4.11).

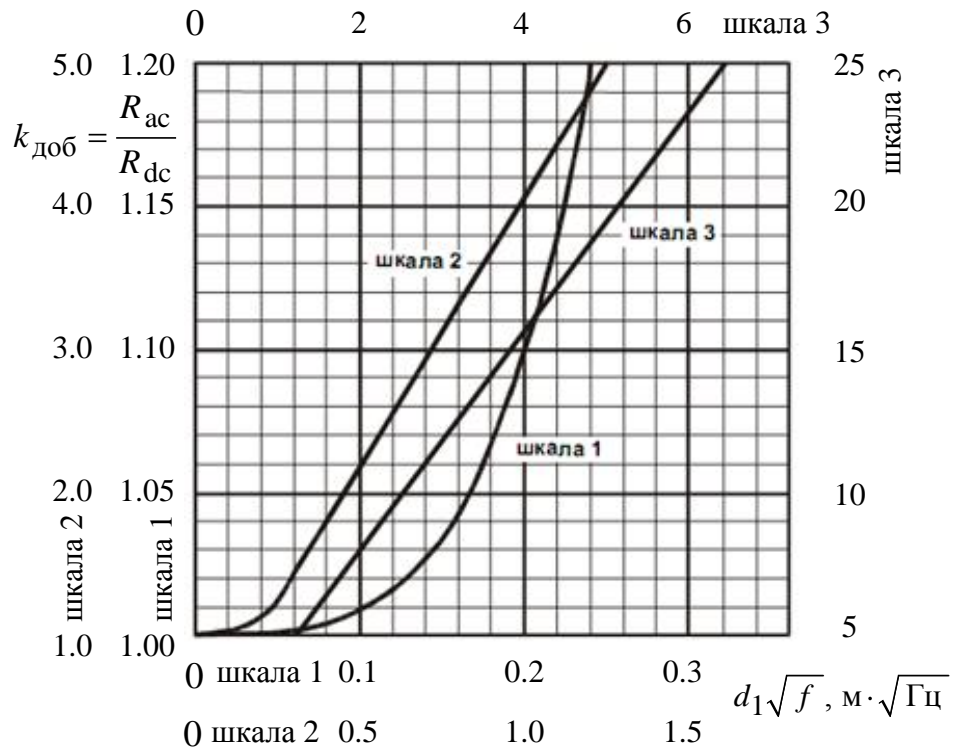


Рисунок 4.11 – Зависимость коэффициента добавочных потерь $k_{доб}$

от параметра $d_1\sqrt{f}$

При частоте 50 кГц рекомендуется выбирать провод с диаметром одиночной медной жилы $d_1 = 0,125$ мм (или $d_1 = 0,100$ мм) (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Диаметр одиночной медной жилы многожильного провода

Рабочая частота	Диаметр одиночной медной жилы без изоляции, мм	Рабочая частота	Диаметр одиночной медной жилы без изоляции, мм
$60 \text{ Гц} \leq f \leq 1 \text{ кГц}$	0,375	$50 \text{ кГц} \leq f \leq 100 \text{ кГц}$	0,100
$1 \text{ кГц} \leq f \leq 10 \text{ кГц}$	0,250	$100 \text{ кГц} \leq f \leq 200 \text{ кГц}$	0,080
$10 \text{ кГц} \leq f \leq 20 \text{ кГц}$	0,180	$200 \text{ кГц} \leq f \leq 300 \text{ кГц}$	0,063
$20 \text{ кГц} \leq f \leq 50 \text{ Гц}$	0,125	$350 \text{ кГц} \leq f \leq 850 \text{ кГц}$	0,050

Выбираем для первичной обмотки медный провод марки ПЭТВ диа-

метром одиночной медной жилы многожильного провода $d_{\text{пр1}} = 0,125 \text{ мм}$ и сечением жилы $S_{\text{пр1}} = 0,01227 \text{ мм}^2$ (ГОСТ 26615-85 – Провода обмоточные с эмалевой изоляцией).

Тогда параметр $d_1 \sqrt{f} = 0,125 \cdot 10^{-3} \sqrt{50000} = 0,028$, а $k_{\text{доб.}} = 1,0$.

Подставляя числовые значения в формулу (4.65), находим потери в проводе первичной обмотки трансформатора

$$P_{\text{об.1}} = \frac{1200}{447,2} \cdot 80 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-9} \cdot 0,071 \cdot 1,0 \cdot 1,086 = 0,70 \text{ Вт.}$$

При выполнении условия $i_o \ll i_1$ для тока намагничивания потери $P_{\text{об.1}}$ в первичной обмотке равны потерям $P_{\text{об.2}}$ во вторичной обмотке. Тогда потери в обмотках трансформатора $P_{\text{об}} = 2P_{\text{об.1}} = 1,4 \text{ Вт}$. Следовательно, можно увеличить потери $P_{\text{об}}$ в обмотках трансформатора до значения 2,05 Вт, например, увеличив плотность тока.

Сечение многожильного провода первичной обмотки трансформатора определим по формуле

$$S_{\text{пр.об.1}} = \frac{P_{TV}}{U_1 \cdot j_1} = \frac{1200}{447,2 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 1,073 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 1,073 \text{ мм}^2.$$

Определим число жил многожильного провода первичной обмотки по формуле

$$n_{w1} = \frac{S_{\text{пр.об.1}}}{S_{\text{пр1}}} = \frac{1,073}{0,01227} = 87,4 \text{ жилы.}$$

Принимаем число одиночных медных жил в многожильном проводе первичной обмотки $n_{w1} = 85$.

Для вторичной обмотки трансформатора также выбираем медный провод марки ПЭТВ диаметром одиночной медной жилы многожильного провода $d_{\text{пр1}} = 0,125 \text{ мм}$ и сечением жилы $S_{\text{пр1}} = 0,01227 \text{ мм}^2$. Плотность тока в

проводе вторичной обмотки трансформатора примем $j = 2,75 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

Тогда сечение многожильного провода вторичной обмотки трансформатора

$$S_{\text{пр.об.2}} = \frac{P_{TV} \cdot w_1}{U_1 \cdot j_2 \cdot w_2} = \frac{1200 \cdot 80}{447,2 \cdot 2,75 \cdot 10^6 \cdot 24} = 3,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 3,25 \text{ мм}^2,$$

а число жил многожильного провода вторичной обмотки

$$n_{w2} = \frac{S_{\text{пр.об.2}}}{S_{\text{пр.2}}} = \frac{3,25}{0,01227} = 264,9 \text{ жилы.}$$

Принимаем число одиночных медных жил в многожильном проводе вторичной обмотки $n_{w2} = 250$.

4.5 Методика расчета трансформатора однотактного обратноходового преобразователя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА. Минимальное входное напряжение $U_{\text{вх.мин}} = 280 \text{ В}$. Максимальное входное напряжение $U_{\text{вх.мах}} = 342 \text{ В}$. Максимальная мощность нагрузки $P_{\text{н.мах}} = 51 \text{ Вт}$. Номинальный ток нагрузки 1 $I_{\text{н1}} = 1,5 \text{ А}$. Номинальный ток нагрузки 2 $I_{\text{н2}} = 1,0 \text{ А}$. Номинальное напряжение нагрузки 1 $U_{\text{н1}} = 25,0 \text{ В}$. Номинальное напряжение нагрузки 2 $U_{\text{н2}} = 5,0 \text{ В}$. Минимальная частота преобразования $f_{\text{мин}} = 95 \text{ кГц}$. Коэффициент полезного действия преобразователя $\eta = 0,85$. Длительность прямого хода $t_{\text{пр}} = 4,48 \text{ мкс}$. Длительность обратного хода $t_{\text{обр}} = 5,57 \text{ мкс}$. Максимальный коэффициент заполнения $D_{\text{мах}} = 0,47$. Падение напряжения на интегральном стабилизаторе напряжения $\Delta U_{\text{исн}} = 3,0 \text{ В}$. Максимальное допустимое напряжение сток-исток транзистора VT1 (транзистор микроконтроллера TOP224Y) $U_{\text{СИ макс. доп.}} = 700 \text{ В}$.

Расчет электромагнитных параметров трансформатора проводится с использованием методик и рекомендаций, изложенных в [1].

Схема силовой части однотактного обратного преобразователя и временные диаграммы токов в обмотках трансформатора представлены на рисунке 4.12.

В однотактном обратном преобразователе с гальванической развязкой трансформатор всегда работает с подмагничиванием. Трансформатор с подмагничиванием может быть выполнен либо на разъемном сердечнике из феррита «силовых» марок с немагнитным зазором, либо на кольцевом сердечнике магнитоэлектрическом, либо на сердечнике магнитоэлектрическом E-типа или сердечнике магнитоэлектрическом U-типа. Конфигурация ферритовых сердечников может быть любой, но наличие зазора обязательно [1].

Однотактный режим работы трансформатора с однополярным намагничиванием близок к режиму дросселя и тогда типоразмер такого трансформатора следует определять исходя из требуемой энергии, запасенной в индуктивности первичной обмотки трансформатора.

Полагаем, что трансформатор работает в режиме прерывистых токов при перегрузке в 20%.

Расчет индуктивности первичной обмотки трансформатора следует проводить при минимальном входном напряжении $U_{\text{вх.мин}}$, максимальной нагрузке $P_{\text{н.мах}} = 1,2 \cdot P_{\text{вых}}$ и минимальной частоте преобразования $f_{\text{мин}}$ [2]:

$$L_1 = \frac{U_{\text{вх.мин}}^2 \cdot t_{\text{пр}}^2 \cdot \eta \cdot f_{\text{мин}}}{2 \cdot P_{\text{н.мах}}} . \quad (4.68)$$

Подставляя числовые значения, находим максимальное значение индуктивности первичной обмотки

$$L_1 \leq \frac{280^2 \cdot (4,48 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,85 \cdot 95 \cdot 10^3}{2 \cdot 51} = 1,246 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,246 \text{ мГн}. \quad (4.69)$$

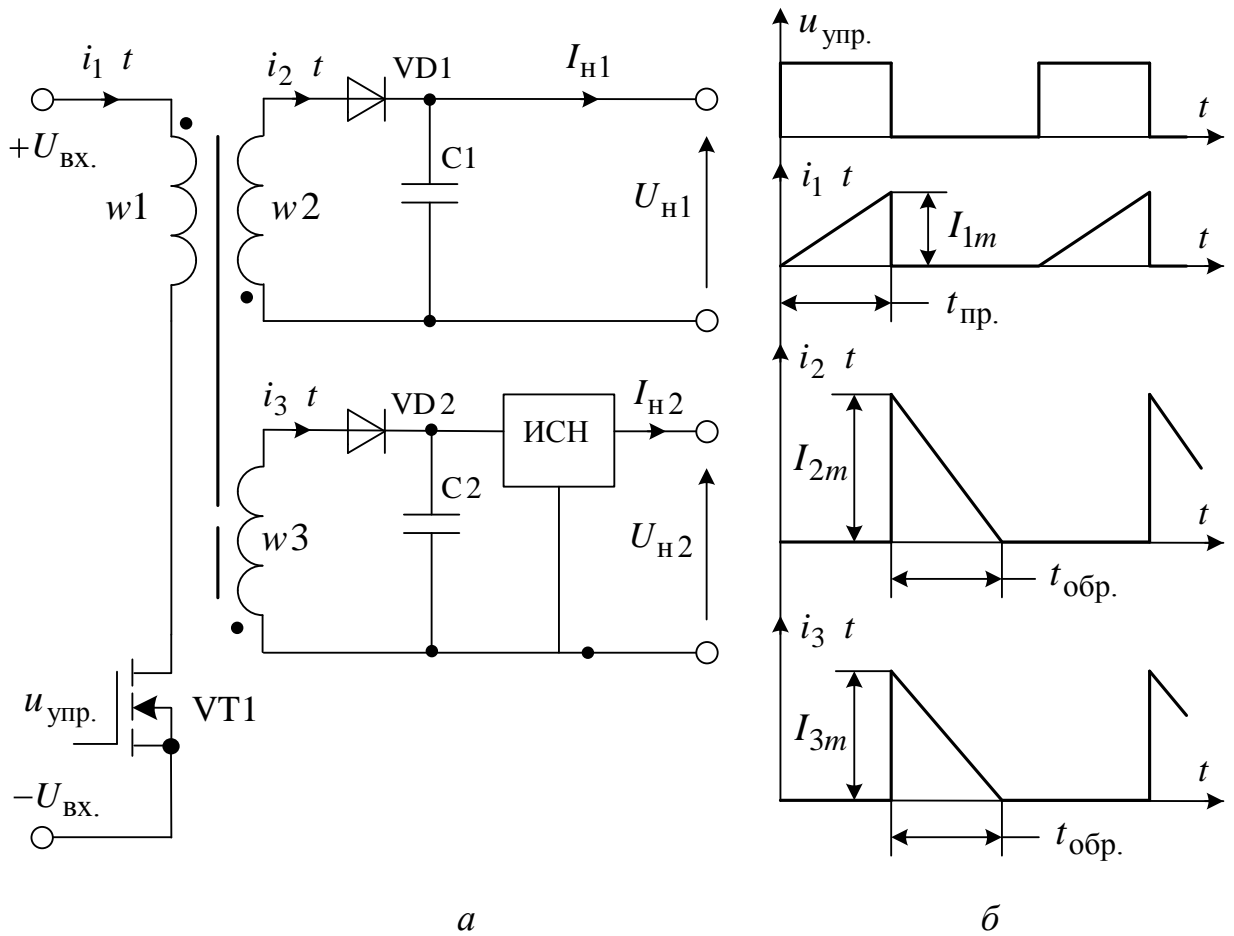


Рисунок 4.12 – Однотактный обратногоходовой преобразователь:
a – схема силовой части однотактного обратногоходового преобразователя;
б – временные диаграммы токов в обмотках.

Тогда максимальное значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1m} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{H,\max}}{\eta \cdot f_{\min} \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 51}{0,85 \cdot 95 \cdot 10^{-3} \cdot 1,246 \cdot 10^{-3}}} = 1,007 \text{ А} . \quad (4.70)$$

Среднеквадратичное значение тока в первичной обмотке трансформатора определяется выражением

$$I_1 = I_{1m} \cdot \sqrt{\frac{D_{\max}}{3}} = 1,007 \cdot \sqrt{\frac{0,47}{3}} = 0,399 \text{ А} . \quad (4.71)$$

За время обратного хода к одной выходной обмотке приложено напряжение $(U_{H,1} + \Delta U_{VD})$, а к другой – напряжение $(U_{H,2} + \Delta U_{VD} + \Delta U_{ИСН})$, где

ΔU_{VD} – падение напряжения на диоде VD1 (VD2); $\Delta U_{исч}$ – падение напряжения на интегральном стабилизаторе напряжения; $U_{н.1}$, $U_{н.2}$ – номинальное напряжение на нагрузках 1 и 2 соответственно.

Индуктивности вторичных обмоток трансформатора рассчитываются по формуле

$$L_i = \frac{U_{\text{вых.обм.}} \cdot t_{\text{обр}}^2 \cdot f_{\text{min}}}{2I_{\text{н.мах}}}, \quad (4.72)$$

где L_i – индуктивность i -ой вторичной обмотки; $U_{\text{вых.обм.}}$ – напряжение, приложенное к выходной обмотке; $t_{\text{обр}}$ – длительность обратного хода; f_{min} – минимальная частота преобразования; $I_{\text{н.мах}}$ – максимальный ток нагрузки (для нагрузки, подключенной к одной вторичной обмотке $I_{\text{н.мах}} = 1,2 \cdot I_{\text{н.1}} = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ А}$; для нагрузки, подключенной к другой вторичной обмотке $I_{\text{н.мах}} = 1,2 \cdot I_{\text{н.2}} = 1,2 \cdot 1,0 = 1,2 \text{ А}$).

Согласно формуле (4.72) индуктивности вторичных обмоток

$$L_2 = \frac{(25 + 0,5) \cdot (5,573 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 95 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,8} = 20,9 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; \quad (4.73)$$

$$L_3 = \frac{(5 + 0,5 + 3,0) \cdot (5,573 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 95 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,2} = 10,45 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \quad (4.74)$$

Максимальное значение токов во вторичных обмотках рассчитываются по формуле

$$I_{im} = \frac{U_{\text{вых.обм.}} \cdot t_{\text{обр}}}{L_i}, \quad (4.75)$$

где L_i – индуктивность i – й вторичной обмотки.

Подставляя числовые значения, находим максимальное значение тока во вторичной обмотке, подключенной к нагрузке с номинальным напряжением 25В,

$$I_{2m} = \frac{(25 + 0,5) \cdot 5,573 \cdot 10^{-6}}{20,9 \cdot 10^{-6}} = 6,8 \text{ А} \quad (4.76)$$

и максимальное значение тока во вторичной обмотке, подключенной к нагрузке с номинальным напряжением 5В,

$$I_{3m} = \frac{(5 + 0,5 + 3,0) \cdot 5,573 \cdot 10^{-6}}{10,45 \cdot 10^{-6}} = 4,53 \text{ А} . \quad (4.77)$$

Для нахождения коэффициентов трансформации используется формула

$$k_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_i}} , \quad (4.78)$$

где L_1 – индуктивность первичной обмотки; L_i – индуктивность i – й вторичной обмотки.

Согласно формуле (4.78) имеем

$$k_{\text{тр}1} = \sqrt{\frac{1,246 \cdot 10^{-3}}{20,9 \cdot 10^{-6}}} = 7,72; \quad k_{\text{тр}2} = \sqrt{\frac{1,246 \cdot 10^{-3}}{10,45 \cdot 10^{-6}}} = 10,918. \quad (4.79)$$

При этом напряжение на силовом ключе интегрального контроллера TOP224Y без учета выброса напряжения на выключенном силовом транзисторе TOP224Y, вызванного индуктивностью рассеяния, определяется выражением

$$U_{\text{TOP}} = U_{\text{вх.мах}} + (U_{\text{н.1}} + \Delta U_{\text{VD}}) \cdot k_{\text{тр}1} + (U_{\text{н.2}} + \Delta U_{\text{VD}} + \Delta U_{\text{исч}}) \cdot k_{\text{тр}2}. \quad (4.80)$$

Согласно формуле (4.80) напряжение на силовом ключе TOP224Y

$$U_{\text{TOP}} = 342 + (25 + 0,5) \cdot 7,72 + (5 + 0,5 + 3,0) \cdot 10,918 = 632 \text{ В} . \quad (4.81)$$

Максимально допустимое напряжение сток-исток TOP224Y составляет 700В. Таким образом, запас по напряжению составляет 9,7%, что можно считать достаточным.

Приведенные значения физических величин носят расчетный характер и при выборе конкретного сердечника трансформатора будут учтены.

Важнейшим этапом при разработке трансформатора является этап, связанный с корректным выбором материала и конфигурации сердечника с учетом технических и экономических факторов и, что не менее важно, с учетом режима работы трансформатора.

Для диапазона частот 100...400 кГц наилучшим выбором является никель-цинковый или марганец-цинковый феррит, близкий по параметрам к ферриту марки N87 фирмы Epcos [1]. Этот магнитомягкий феррит имеет низкие потери мощности при размахе магнитной индукции ΔB от 0,25Тл до 0,3Тл. Могут использоваться сердечники из порошковых магнитомягких материалов: сердечники из молибденового пермаллоя (Мо – пермаллой, пре-сперм, MPP – Molibdenum Permally Powder); сердечники на основе железоникелевого сплава High Flux; сердечники из железоалюминиевого сплава Sendust (альсифер, Kool M μ); сердечники из распыленного железа (Iron Powder) [1]. Сердечники из молибденового пермаллоя по сравнению с другими перечисленными материалами обладают наименьшей индукцией насыщения (0,7 – 0,8 Тл), но и наименьшими суммарными потерями, что позволяет применять сердечники в трансформаторах обратных преобразователей, работающих с накоплением энергии [1]. Препятствием широкому использованию порошковых сердечников является их сравнительно высокая стоимость.

В качестве сердечника трансформатора целесообразно использовать сердечник EFD 30/15/9 из феррита N87. Сердечник EFD 30/15/9 выпускается фирмой Epcos в трех вариантах с различными зазорами (0,71 мм; 0,38 мм; 0,27 мм), соответствующими величине индуктивности на виток A_L : 160 нГн/виток²; 250 нГн/виток²; 315 нГн/виток². Индукция насыщения феррита N87: $B_s = 0,49$ Тл (при $T = 25^\circ\text{C}$) и $B_s = 0,39$ Тл (при $T = 100^\circ\text{C}$).

Внешний вид ферритового сердечника конфигурации EFD с зазором представлен на рисунке 4.13. Геометрические размеры сердечника EFD 30/15/9 представлены в таблице 4.8.



Рисунок 4.13 – Внешний вид ферритового сердечника конфигурации EFD с зазором

Эффективные параметры сердечника EFD 30/15/9:

$V_e = 4690 \text{ мм}^2$ (эффективный объем сердечника); $L_e = 68 \text{ мм}$ (эффективная длина магнитного пути); $A_e = 69 \text{ мм}^2$ (эффективное сечение сердечника, эффективная площадь поперечного сечения); $W_a = 71 \text{ мм}^2$ (площадь окна сердечника).

Таблица 4.8 – Геометрические размеры сердечника EFD 30/15/9

Типоразмер	A , мм	B , мм	C , мм	D , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	E , мм
EFD30/15/9	$30,0^{\pm 0,8}$	$9,1^{\pm 0,2}$	$22,4^{\pm 0,75}$	$14,6^{\pm 0,25}$	$15,0^{\pm 0,15}$	$11,2^{\pm 0,3}$	$4,9^{\pm 0,15}$

Выбираем сердечник В66423 – U250 – К187:

В66423 – код типоразмера сердечника EFD 30/15/9; U250 – исполнение с зазором 0,71 мм; К1 – величина разброса по коэффициенту одновитковой индуктивности A_L ($\pm 10\%$); 87 – марка материала (феррит марки N87).

Для получения индуктивности первичной обмотки $L_1 = 1,246 \cdot 10^{-3}$ Гн необходимо иметь число витков первичной обмотки

$$w_1 = \sqrt{\frac{L_1}{A_L}} = \sqrt{\frac{1,246 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-9}}} = 70 \text{ витков.} \quad (4.82)$$

За время прямого хода длительностью 4,48 мкс к первичной обмотке трансформатора будет приложено минимальное входное напряжение $U_{\text{вх. min}} = 280$ В.

Эффективная площадь поперечного сечения сердечника EFD 30/15/9 $A_e = 69$ мм². Тогда размах магнитной индукции в сердечнике

$$\Delta B = \frac{U_{\text{вх. min}} \cdot t_{\text{пр}}}{A_e \cdot w_1} = \frac{280 \cdot 4,48 \cdot 10^{-6}}{69 \cdot 10^{-6} \cdot 70} = 0,26 \text{ Тл.} \quad (4.83)$$

Таким образом, условие $\Delta B < B_s$ выполняется.

Максимально возможная индуктивность вторичной обмотки, подключенной к нагрузке с номинальным напряжением 25В, составляет 20,9 мкГн, что дает

$$w_2 = \sqrt{\frac{L_2}{A_L}} = \sqrt{\frac{20,9 \cdot 10^{-6}}{250 \cdot 10^{-9}}} = 9,1 \text{ витка.} \quad (4.84)$$

Индуктивность L_2 вторичной обмотки не может быть больше 20,9 мкГн, поэтому принимаем $w_2 = 9$ витков, что будет соответствовать индуктивности

$$L_2 = A_L \cdot w_2^2 = 250 \cdot 10^{-9} \cdot 9^2 = 20,25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (4.85)$$

При числе витков первичной обмотки $w_1 = 70$ витков и числе витков вторичной обмотки $w_2 = 9$ витков коэффициент трансформации

$$k_{\text{тр1}} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{70}{9} = 7,78. \quad (4.86)$$

Максимально возможная индуктивность вторичной обмотки, подключенной к нагрузке с напряжением 5В, составляет 10,45 мкГн, что дает значение витков этой обмотки

$$w_3 = \sqrt{\frac{L_3}{A_L}} = \sqrt{\frac{10,45 \cdot 10^{-6}}{250 \cdot 10^{-9}}} = 6,46 \text{ витка}. \quad (4.87)$$

Индуктивность L_3 не может быть больше 10,45 мкГн, поэтому принимаем $w_3 = 6$ витков, что будет соответствовать индуктивности

$$L_3 = A_L \cdot w_3^2 = 250 \cdot 10^{-9} \cdot 6^2 = 9 \text{ мкГн}. \quad (4.88)$$

При числе витков $w_1 = 70$ и числе витков $w_3 = 6$ коэффициент трансформации

$$k_{\text{тр2}} = \frac{w_1}{w_3} = \frac{70}{6} = 11,67. \quad (4.89)$$

Индуктивность первичной обмотки

$$L_1 = A_L \cdot w_1^2 = 250 \cdot 10^{-9} \cdot 70^2 = 1,225 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (4.90)$$

Коэффициенты трансформации $k_{\text{тр1}}$ и $k_{\text{тр2}}$, полученные при выборе реального сердечника трансформатора, увеличились по сравнению с расчетными значениями, что приведет к росту максимального напряжения на силовом транзисторе микросхемы TOP224Y до значения

$$\begin{aligned} U_{\text{TOP}} &= U_{\text{вх.мах}} + (U_{\text{н1}} + \Delta U_{\text{VD}}) \cdot k_{\text{тр1}} + (U_{\text{н2}} + \Delta U_{\text{VD}} + \Delta U_{\text{исч}}) \cdot k_{\text{тр2}} = \\ &= 342 + (25 + 0,5) \cdot 7,78 + (5 + 0,5 + 3,0) \cdot 11,67 = 639,6 \text{ В}. \end{aligned} \quad (4.91)$$

Таким образом, реально запас по напряжению составит 8,6%, что допустимо.

Определим максимальные значения токов, временные интервалов в номинальном режиме и среднеквадратичные значения токов в условиях, когда $L_1 = 1,225 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_2 = 20,25 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_3 = 9$ мкГн; $k_{\text{тр}1} = 7,78$; $k_{\text{тр}2} = 11,67$.

Максимальное значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1m} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{н.макс}}}{\eta \cdot f_{\text{мин}} \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 51}{0,85 \cdot 95 \cdot 10^3 \cdot 1,225 \cdot 10^{-3}}} = 1,015 \text{ А.} \quad (4.92)$$

Номинальный ток в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{н.макс}}}{\eta \cdot f_{\text{НОМ}} \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 51}{0,85 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,225 \cdot 10^{-3}}} = 0,99 \text{ А.} \quad (4.93)$$

Время открытого состояния силового транзистора в номинальном режиме

$$t_{\text{пр}} = \frac{I_{1\text{НОМ}} \cdot L_1}{U_{\text{вх.НОМ}}} = \frac{0,99 \cdot 1,225 \cdot 10^{-3}}{311} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ с.} \quad (4.94)$$

Коэффициент заполнения в номинальном режиме

$$D_{\text{НОМ}} = \frac{t_{\text{пр}}}{T} = \frac{3,9 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} = 0,39. \quad (4.95)$$

Среднеквадратичное значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = I_{1\text{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{НОМ}}}{3}} = 0,99 \cdot \sqrt{\frac{0,39}{3}} = 0,36 \text{ А.} \quad (4.96)$$

Расчет времени обратного хода проводится по формуле

$$t_{\text{обр.}(i)} = \frac{I_{im} \cdot L_i}{U_{\text{вых.обм}(i)}}, \quad (4.97)$$

где I_{im} – максимальное значение тока в i -ой вторичной обмотке;

L_i – индуктивность i -ой вторичной обмотки;

$U_{\text{вых.обм}(i)}$ – напряжение i -ой вторичной обмотки.

Согласно формуле (4.97) имеем

$$t_{\text{обр}(2)} = \frac{6,8 \cdot 20,25 \cdot 10^{-6}}{25 + 0,5} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \quad (4.98)$$

$$t_{\text{обр}(3)} = \frac{4,53 \cdot 9,0 \cdot 10^{-6}}{5 + 0,5 + 3} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}. \quad (4.99)$$

Среднеквадратичное значение токов во вторичных обмотках рассчитываются по формуле

$$I_i = I_{im} \cdot \sqrt{\frac{D_i}{3}}, \quad (4.100)$$

где I_{im} – максимальное значение тока в i -й обмотке;

D_i – коэффициент для i -й вторичной обмотки.

Согласно формуле (4.100) имеем

$$I_2 = 6,8 \cdot \sqrt{\frac{0,54}{3}} = 2,88 \text{ А}, \quad I_3 = 4,53 \cdot \sqrt{\frac{0,42}{3}} = 1,69 \text{ А}, \quad (4.101)$$

Таким образом, имеем следующие данные уточненного расчета.

Уточненные данные для первичной обмотки: $w_1 = 70$ витков;

$$t_{\text{пр}} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \quad L_1 = 1,225 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad I_{1m} = 1 \text{ А}; \quad I_{1\text{НОМ}} = 0,99 \text{ А};$$

$$I_1 = 0,36 \text{ А},$$

где w_1 – число витков первичной обмотки;

$t_{\text{пр}}$ – время открытого состояния силового транзистора в номинальном режиме;

L_1 – индуктивность первичной обмотки трансформатора;

I_{1m} – максимальное значение тока в первичной обмотке трансформатора, в номинальном режиме;

I_1 – среднеквадратичное значение тока в первичной обмотке трансформатора.

Уточненные данные для вторичной обмотки трансформатора, к которой подключена нагрузка с номинальным напряжением 25В: $w_2 = 9$ витков;

$$t_{\text{обр}(2)} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \quad L_2 = 20,25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; \quad I_{2m} = 6,8 \text{ А}; \quad I_2 = 2,88 \text{ А},$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки;

$t_{\text{обр}(2)}$ – время обратного хода;

L_2 – индуктивность вторичной обмотки с числом витков w_2 ;

I_{2m} – максимальное значение тока во вторичной обмотке с числом витков w_2 ;

I_2 – среднеквадратичное значение тока во вторичной обмотке с числом витков w_2 .

Уточненные данные для вторичной обмотки трансформатора, к которой подключена нагрузка с номинальным напряжением 5В: $w_3 = 6$ витков;

$$t_{\text{обр}(3)} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \quad L_3 = 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; \quad I_{3m} = 4,53 \text{ А}; \quad I_3 = 1,69 \text{ А}.$$

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ трансформатора сводится к определению геометрических параметров трансформатора с электромагнитными и тепловыми параметрами – мощностью, частотой действующего напряжения, перегревом. Трансформатор представляет собой магнитопровод (сердечник) с размещенными на нем обмотками, которые, в свою очередь, укладываются и закрепляют на намоточном каркасе. Каркас является конструктивной основой для обмоток трансформатора и выполняет функцию корпусной изоляции.

Обоснование выбора ферритового сердечника EFD фирмы EPCOS. К преимуществу использования конфигурации EFD можно отнести удобство намотки толстым проводом и медной лентой, большое число выводов намоточных каркасов, обеспечивающих модульность конструкции многообмоточного трансформатора, а также низкую трудоемкость изготовления на них намоточных изделий [11]. Стандартные ряды вертикальных и горизонталь-

ных намоточных каркасов помогают оптимизировать расположение трансформатора на сердечнике EFD на печатной плате. Широкий ряд стандартно выпускаемых ферритовых сердечников EFD с немагнитным зазором обеспечивает дополнительную возможность.

Проверка выбора сердечника EFD 30/15/9 исходя из условия

$$(S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}})_{\text{расч.}} \leq (S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}})_{\text{EFD}}$$

Произведение $(S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}})$, связывающее типоразмер сердечника трансформатора, лежит в основе ряда методик расчета трансформатора и определяется по формуле

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}} = \frac{P_{TV}}{4k_{\phi} \cdot k_{\text{ок}} \cdot j_1 \cdot f \cdot B_m}, \quad (4.102)$$

где P_{TV} – мощность трансформатора; k_{ϕ} – коэффициент формы; $k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода сечениями проводов обмотки без изоляции (коэффициент заполнения окна магнитопровода медью); j_1 – плотность тока в первичной обмотке трансформатора; f – частота напряжения на первичной обмотке трансформатора; B_m – максимальная магнитная индукция по динамической петле гистерезиса; $S_{\text{ок}}$ – площадь окна магнитопровода; $S_{\text{м}}$ – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Для первой оценки типоразмера магнитопровода рекомендуется принять $j_1 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$; $k_{\text{ок}} = 0,1$.

Подставляя числовое значение в формулу (4.102), находим расчетное значение произведения $(S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}})$

$$\begin{aligned} (S_{\text{ок}} \times S_{\text{м}}) &= \frac{51}{4 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,26} = \\ &= 1,96 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4 = 1960 \text{ мм}^4. \end{aligned} \quad (4.103)$$

Для сердечника EFD 30/15/9: $S_{\text{ок}} = 71 \text{ мм}^2$, $S_{\text{м}} = 69 \text{ мм}^2$,

$S_{ок} \times S_M = 4899 \text{ мм}^4$. Таким образом, условие

$(S_{ок} \times S_M)_{расч.} = 1960 \text{ мм}^4 \leq 4899 \text{ мм}^4 = (S_{ок} \times S_M)_{EFD}$ выполняется.

Расчет сечения медного обмоточного провода проводят по формуле

$$S_{пр} = \frac{I}{j}, \quad (4.104)$$

где I – среднеквадратичное значение тока в обмотке трансформатора;

j – плотность тока в проводе обмотки трансформатора.

Согласно формуле (4.104)

$$S_{пр1} = \frac{I_1}{j_1}, \quad (4.105)$$

где I_1 – среднеквадратичное значение тока в первичной обмотке;

$j_1 = 2,5 \text{ А/мм}^2$ – плотность тока в проводе первичной обмотки.

$$S_{пр2} = \frac{I_2}{j_2}, \quad (4.106)$$

где I_2 – среднеквадратичное значение тока во вторичной обмотке с числом витков w_2 ;

$j_2 = 3,0 \text{ А/мм}^2$ – плотность тока в проводе вторичной обмотки с числом витков w_2 .

$$S_{пр3} = \frac{I_3}{j_3}, \quad (4.107)$$

где I_3 – среднеквадратичное значение тока во вторичной обмотке с числом витков w_3 ;

$j_3 = 3,0 \text{ А/мм}^2$ – плотность тока в проводе вторичной обмотки с числом витков w_3 .

Используя формулы (4.105) – (4.107), а также значения токов, получен-

ные по формулам (4.96) и (4.101), находим сечения медных проводов обмоток трансформатора

$$S_{\text{пр1}} = \frac{0,36}{2,5} = 0,144 \text{ мм}^2, S_{\text{пр2}} = \frac{2,88}{3,0} = 0,96 \text{ мм}^2, S_{\text{пр3}} = \frac{1,69}{3,0} = 0,56 \text{ мм}^2.$$

Известно, что при протекании по проводнику тока высокой частоты наблюдается неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника: плотность тока максимальна на поверхности проводника и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Это явление называется скин-эффектом, или поверхностным эффектом. Одним из способов борьбы со скин-эффектом заключается в применении провода типа литцендрат (высокочастотного обмоточного провода). Диаметр d одиночной медной жилы (с эмалевой изоляцией) многоканального провода типа литцендрат можно определить по формуле [1]

$$d [\text{мм}] = \frac{1}{\sqrt{f} [\text{кГц}]}, \quad (4.108)$$

где f – рабочая частота тока.

Согласно формуле (4.108) диаметр одиночной медной жилы многожильного провода

$$d \leq \frac{1}{\sqrt{100}} \leq 0,1 \text{ мм}.$$

Следует отметить, что в многожильном проводе, сформированном скручиванием изолированных проводов, эффекты, вызывающие скин-эффект, меньше, чем в сплошном проводе эквивалентного сечения, но в центральных жилах плотность тока достаточно мала.

Учитывая вышесказанное, выбираем высокочастотный обмоточный провод марки ЛЭПКО (провод круглого сечения с жилой, скрученной из медных проволок, изолированных лаком на полиуретановой основе, с однослойной обмоткой из капроновых нитей): ЛЭПКО 21x0,1 – для первичной обмотки; ЛЭПКО 250x0,071 – для вторичной обмотки с числом витков w_2 ;

ЛЭПКО 70x0,1 – для вторичной обмотки с числом витков w_3 .

Основные характеристики и параметры выбранных проводов представлены в таблице 4.9.

Т а б л и ц а 4.9 – Основные характеристики и параметры высокочастотного провода марки ЛЭПКО [1]

Расчетное сечение жилы, мм ²	Внутренний проводник (эмалированный провод марки ПЭВТЛ-1)		Наружный диаметр, мм	Расчетная масса, кг/км	Максимальное электрическое сопротивление 1 м жилы при 20°C, Ом
	Число проволок	Номинальный диаметр проволоки, мм			
0,1650	21	0,100	0,72	1,6600	0,1130
0,5500	70	0,100	1,34	5,4800	0,0353
0,9890	250	0,071	1,87	9,8200	0,0200

Выбираем намоточный каркас фирмы Ersos для горизонтального расположения трансформатора, количество секций 1, количество выводов 12 (рисунок 4.14).

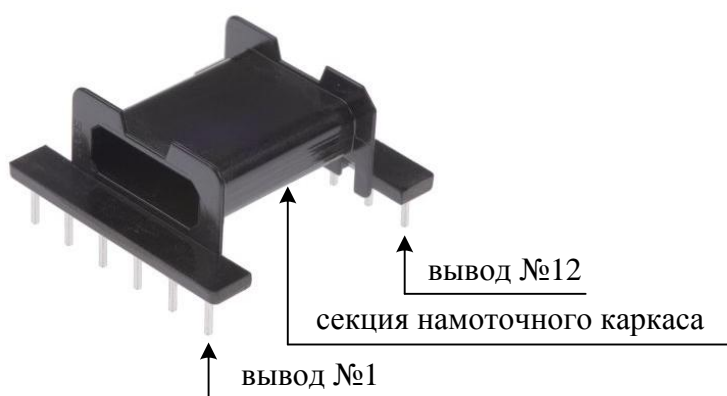


Рисунок 4.14 – Внешний вид намоточного каркаса фирмы Ersos для горизонтального расположения трансформатора

Геометрические размеры каркаса представлены на рисунке 4.15.

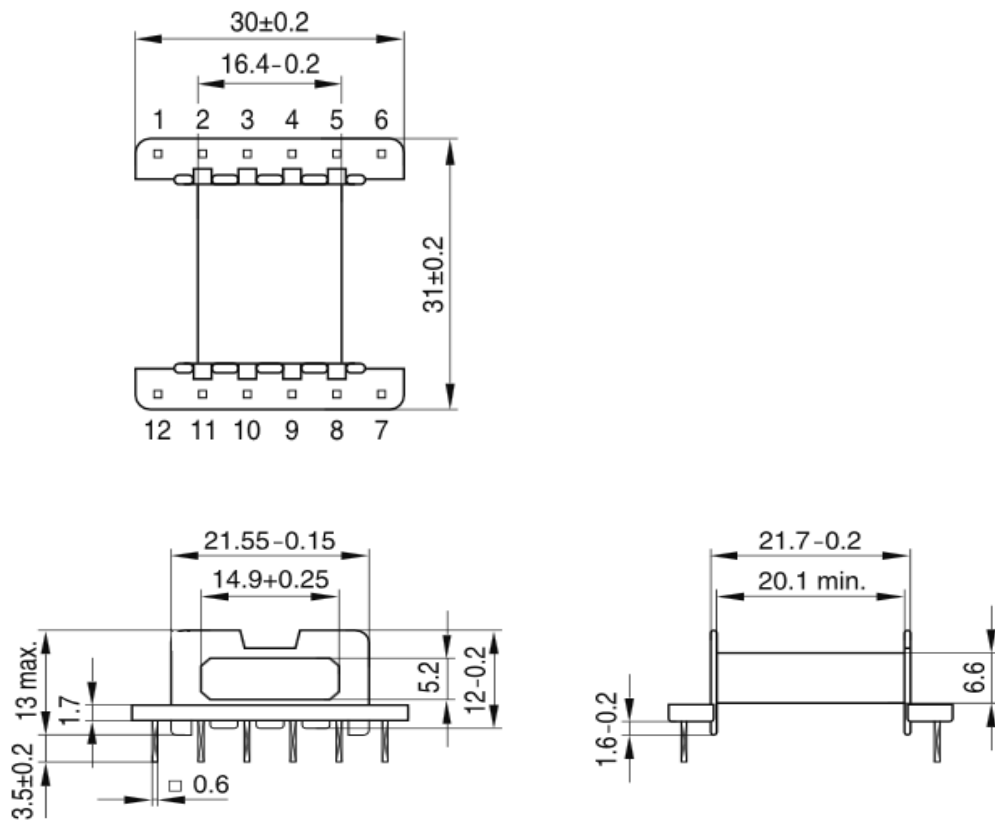


Рисунок 4.15 – Геометрические размеры намоточного каркаса для сердечника EFD 30/15/9

Определение мощности потерь, рассеиваемой поверхностью трансформатора, является еще одним важным этапом расчета трансформатора. Мощность потерь превращается в тепловую энергию и рассеивается в окружающее пространство за счет теплоотдачи и излучения.

Температура трансформатора повышается вплоть до наступления термодинамического равновесия, при котором соблюдается условие

$$P_{\text{рас}} = P_{\text{м}} + P_{\text{об}},$$

где $P_{\text{рас}}$ – для вторичной мощность тепловой энергии, рассеиваемой поверхностью трансформатора в окружающую среду; $P_{\text{м}}$ – мощность потерь в магнитопроводе; $P_{\text{об}}$ – мощность потерь в обмотках.

Потери в магнитопроводе трансформатора обусловлены необратимыми процессами перемагничивания (потери на гистерезис) и возникающих внутри магнитопровода э.д.с. индукции и вихревых токов (потери на вихревые токи).

Причина потерь в обмотках – это сопротивление проводов, обычно медных.

Потери мощности в магнитопроводе трансформатора определяют, используя либо графики зависимости удельных потерь мощности от частоты при магнитной индукции $B = \text{const}$, либо эмпирические формулы вида

$$p = \zeta \cdot f^\alpha \cdot B^\beta.$$

Потери в магнитопроводе трансформатора

$$P_M = p \cdot V_M, \quad (4.109)$$

где $p \left[\text{Вт/м}^3 \right]$ – удельные магнитные потери; V_M – объем магнитного материала магнитопровода.

Удельные потери в феррите N87 при частоте $f = 100$ кГц и магнитной индукции $B = \frac{\Delta B}{2} = \frac{0,26}{2} = 0,13$ Тл составляют $145 \text{ кВт/м}^3 = 145 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^3$.

Тогда потери мощности в магнитопроводе EFD 30/15/9 составят

$$P_M = 145 \cdot 10^{-3} \cdot 4,69 = 680 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Потери в проводе обмоток трансформатора определим по формуле

$$P_{\text{об}} = I^2 \cdot R_{\text{обм}} = I^2 \cdot \frac{\rho_0 \cdot l_{\text{ср.в}} \cdot w}{S_{\text{пр}}} \cdot k_{\text{доб}} \cdot k_T, \quad (4.110)$$

где I – среднеквадратичное значение тока в проводе обмотки; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала провода обмотки при начальной температуре T_0 ; $l_{\text{ср.в}}$ – средняя длина одного витка обмотки; w – число витков обмотки; $S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения провода обмотки без изоляции; $k_{\text{доб}}$ – коэффициент добавочных потерь; k_T – коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева.

Коэффициент добавочных потерь $k_{\text{доб}}$ учитывает добавочные потери, которые возникают при переменном синусоидальном, несинусоидальном периодическом токе высокой частоты, а также при кратковременном импульс-

ном токе в проводах обмоток.

Величину коэффициента добавочных потерь $k_{\text{доб}}$ можно определить, используя зависимость $k_{\text{доб}}$ от параметра $d \cdot \sqrt{f}$ [м·Гц^{0,5}], где d – диаметр провода; f – частота [1]. Это дает: $k_{\text{доб1}} = k_{\text{доб2}} = k_{\text{доб3}} = 1,0$.

Коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева определяется выражением

$$k_T = 1 + \alpha_\rho \cdot \Delta T, \quad (4.111)$$

где α_ρ – температурный коэффициент удельного сопротивления;

ΔT – температура перегрева.

Для медного провода $\alpha_\rho = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, и тогда

$$k_T = 1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T \approx 1 + 0,004 \cdot \Delta T. \quad (4.112)$$

При естественной конвекции температуру нагрева принято задавать в диапазоне (20-50) °С. Принимая температуру перегрева $\Delta T = 20^\circ \text{С}$, получим $k_T = 1,08$.

Средняя длина одного витка обмотки трансформатора определяется с использованием геометрии намоточного каркаса и расположения обмоток на каркасе:

для первичной обмотки

$$l_{\text{ср.в(1)}} = 2 \cdot (B + H + 4 \cdot d_1) \cdot k_{\text{зап}}; \quad (4.113)$$

для вторичной обмотки с числом витков w_2

$$l_{\text{ср.в(2)}} = 2 \cdot (B + H + 12 \cdot d_1) \cdot k_{\text{зап}}. \quad (4.114)$$

для вторичной обмотки с числом витков w_3

$$l_{\text{ср.в(3)}} = 2 \cdot (B + H + 12 \cdot d_1 + 4 \cdot d_2) \cdot k_{\text{зап}}, \quad (4.115)$$

где B – ширина намоточного каркаса; H – высота намоточного каркаса; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса (рекомендуется принимать $k_{\text{зап}} = 1,1$); d_1 – диа-

метр провода первичной обмотки; d_2 – диаметр провода вторичной обмотки с числом витков w_2 .

Подставляя числовые значения в формулы (4.113) – (4.115), находим: среднюю длину одного витка первичной обмотки

$$l_{\text{ср.в(1)}} = 2 \cdot (16,4 + 6,6 + 4 \cdot 0,72) \cdot 1,1 = 57 \text{ мм};$$

среднюю длину одного витка вторичной обмотки с числом витков w_2

$$l_{\text{ср.в(2)}} = 2 \cdot (16,4 + 6,6 + 12 \cdot 0,72) \cdot 1,1 = 69,6 \text{ мм};$$

среднюю длину одного витка вторичной обмотки с числом витков w_3

$$l_{\text{ср.в(3)}} = 2 \cdot (16,4 + 6,6 + 12 \cdot 0,72 + 4 \cdot 1,87) \cdot 1,1 = 86 \text{ мм}.$$

Согласно формуле (4.110) потери в проводах обмоток трансформатора: потери в проводе первичной обмотки

$$P_{\text{об(1)}} = 0,36^2 \cdot \frac{17 \cdot 10^{-9} \cdot 57 \cdot 10^{-3} \cdot 70}{0,165 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 \cdot 1,08 = 0,06 \text{ Вт};$$

потери в проводе вторичной обмотки с числом витков w_2

$$P_{\text{об(2)}} = 2,88^2 \cdot \frac{17 \cdot 10^{-9} \cdot 69,6 \cdot 10^{-3} \cdot 9}{0,989 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 \cdot 1,08 = 0,096 \text{ Вт};$$

потери в проводе вторичной обмотки с числом витков w_3

$$P_{\text{об(3)}} = 1,69^2 \cdot \frac{17 \cdot 10^{-9} \cdot 86 \cdot 10^{-3} \cdot 6}{0,55 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 \cdot 1,08 = 0,05 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери мощности в трансформаторе составляют

$$P_{\Sigma} = P_{\text{м}} + P_{\text{об(1)}} + P_{\text{об(2)}} + P_{\text{об(3)}} = 0,68 + 0,06 + 0,096 + 0,05 = 0,89 \text{ Вт}. \quad (4.116)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря простоте конструкции проектирование магнитных элементов на заданные электрические параметры не составляет особого труда, но чтобы спроектировать их оптимальными, необходимо рассматривать всю совокупность вопросов, связанных друг с другом и обусловленных электромагнитными явлениями в магнитных элементах, процессами нагрева и охлаждения, геометрией конструкции.

При переходе к повышенным и высоким частотам преобразования (десятки и сотни килогерц) с учетом применения быстродействующих транзисторов, особенно MOSFET-транзисторов, обострился интерес к минимизации паразитных параметров магнитных элементов. Это связано со стремлением снизить динамические потери мощности в силовых ключах, а также с желанием уменьшить уровень создаваемых электромагнитных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легостаев Н.С. Магнитные элементы электронных устройств: учебное пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 211с. – ISBN 978-5-86889-711-5
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 629 с.: ил. ISBN 5-94836-051-2
3. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.: ил. ISBN 5-93037-138-5
4. Горский А.Н. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А.Н. Горский, Ю.С. Русин, Н.Р. Иванов, Л.А. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.: ил. ISBN 5-256-00025-х
5. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учебное пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 239 с. – ISBN 978-5-86889-679-8
6. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учеб.-метод. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 74 с. – ISBN 978-5-86889-678-1

Конструктивные компоненты магнитных элементов

Таблица А.1 – Стандартные отечественные медные эмалированные провода круглого сечения. Основные размеры проводов.

Характеристики медного провода				Изоляция по типу 1		Изоляция по типу 2	
Ном. диаметр медной проволоки	Допустимые отклонения от номинала	Площадь сечения жилы	Удельная масса жилы	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции
мм	мм	мм ²	кг/1км	мм	мм	мм	мм
0,063	–	0,00311	0,0277	0,006	0,076	0,012	0,083
0,071	0,003	0,00395	0,0352	0,007	0,084	0,012	0,091
0,080	0,003	0,00502	0,0447	0,007	0,094	0,014	0,101
0,090	0,003	0,00636	0,0566	0,008	0,105	0,015	0,113
0,100	0,003	0,00785	0,0698	0,008	0,117	0,016	0,125
0,106	0,003	0,00882	0,0785	0,009	0,123	0,017	0,132
0,112	0,003	0,00985	0,0876	0,009	0,130	0,017	0,139
0,118	0,003	0,01094	0,0972	0,010	0,136	0,019	0,145
0,125	0,003	0,01227	0,1091	0,010	0,144	0,019	0,154
0,132	0,003	0,01368	0,1217	0,011	0,152	0,021	0,162
0,140	0,003	0,01539	0,1369	0,011	0,1369	0,021	0,171
0,150	0,003	0,01767	0,1571	0,012	0,1571	0,023	0,182
0,160	0,003	0,02011	0,1787	0,012	0,1787	0,023	0,194
0,170	0,003	0,02370	0,2018	0,013	0,2018	0,025	0,205
0,180	0,003	0,02545	0,2262	0,013	0,2262	0,025	0,207
0,190	0,003	0,02835	0,2521	0,014	0,2521	0,027	0,228
0,200	0,003	0,03142	0,2793	0,014	0,2793	0,027	0,239
0,212	0,003	0,03530	0,3138	0,015	0,3138	0,029	0,254
0,224	0,003	0,03941	0,3503	0,015	0,3503	0,029	0,266
0,236	0,004	0,04374	0,3889	0,017	0,3889	0,032	0,283
0,250	0,004	0,04909	0,4364	0,017	0,281	0,032	0,297
0,265	0,004	0,05515	0,4903	0,018	0,297	0,033	0,314
0,280	0,004	0,06158	0,5474	0,018	0,312	0,033	0,329
0,300	0,004	0,07069	0,6284	0,019	0,334	0,035	0,352
0,315	0,004	0,07793	0,6929	0,019	0,349	0,035	0,367

Продолжение таблицы А.1

Характеристики медного провода				Изоляция по типу 1		Изоляция по типу 2	
Ном. диаметр медной проволоки	Допустимые отклонения от номинала	Площадь сечения жилы	Удельная масса жилы	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции
мм	мм	мм ²	кг/1км	мм	мм	мм	мм
0,335	0,004	0,08814	0,7836	0,020	0,372	0,038	0,391
0,355	0,004	0,09898	0,8799	0,020	0,392	0,038	0,411
0,375	0,005	0,11040	0,9819	0,021	0,414	0,040	0,434
0,400	0,005	0,12570	1,117	0,021	0,439	0,040	0,459
0,425	0,005	0,14190	1,261	0,022	0,466	0,042	0,488
0,450	0,005	0,1590	1,414	0,022	0,491	0,042	0,513
0,475	0,005	0,1772	1,575	0,024	0,519	0,045	0,541
0,50	0,005	0,1963	1,767	0,024	0,544	0,045	0,566
0,53	0,006	0,2203	1,961	0,025	0,576	0,047	0,600
0,56	0,006	0,2464	2,190	0,025	0,606	0,047	0,630
0,60	0,006	0,2827	2,514	0,027	0,649	0,050	0,674
0,63	0,006	0,3117	2,771	0,027	0,679	0,050	0,704
0,67	0,007	0,3526	3,134	0,028	0,722	0,053	0,749
0,71	0,007	0,3959	3,520	0,028	0,762	0,053	0,789
0,75	0,008	0,4418	3,927	0,030	0,805	0,056	0,834
0,80	0,008	0,5027	4,469	0,030	0,855	0,056	0,884
0,85	0,009	0,5675	5,045	0,032	0,909	0,060	0,939
0,90	0,009	0,6362	5,656	0,032	0,959	0,060	0,989
0,95	0,010	0,7080	6,301	0,034	1,012	0,063	1,044
1,00	0,010	0,7854	6,982	0,034	1,062	0,063	1,094
1,06	0,011	0,8825	7,845	0,034	1,124	0,065	1,157
1,12	0,011	0,9852	8,758	0,034	1,184	0,065	1,217
1,18	0,012	1,0940	9,722	0,035	1,246	0,067	1,279
1,25	0,013	1,227	10,91	0,035	1,316	0,067	1,349
1,32	0,013	1,360	12,17	0,036	1,388	0,069	1,422
1,40	0,014	1,539	13,69	0,036	1,468	0,069	1,502
1,50	0,015	1,767	15,71	0,038	1,570	0,071	1,606
1,60	0,016	2,011	17,87	0,038	1,670	0,071	1,706
1,70	0,017	2,270	20,18	0,039	1,772	0,073	1,809

Окончание таблицы А.1

Характеристики медного провода				Изоляция по типу 1		Изоляция по типу 2	
Ном. диаметр медной проволоки	Допустимые отклонения от номинала	Площадь сечения жилы	Удельная масса жилы	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции	Мин. удвоенная толщина изоляционного слоя	Макс. наружный диаметр провода в изоляции
мм	мм	мм ²	кг/1км	мм	мм	мм	мм
1,80	0,018	2,545	22,62	0,039	1,872	0,073	1,909
1,90	0,019	2,835	25,21	0,040	1,974	0,075	2,012
2,00	0,020	3,142	27,93	0,040	2,074	0,075	2,112
2,12	0,021	3,530	31,38	0,041	2,196	0,077	2,235
2,24	0,022	3,941	35,03	0,041	2,316	0,077	2,355
2,36	0,024	4,374	38,89	0,042	2,438	0,079	2,478
2,50	0,025	4,909	43,64	0,042	2,578	0,079	2,618

CO	55	206	A2																								
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Код покрытия сердечника</th> <th>Возможные материалы</th> <th>Возможные внешние диаметры, мм</th> <th>Возможные значения проницаемости</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A2</td> <td>MPP, High Flux</td> <td>All</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>A5</td> <td>All</td> <td>6,35 – 23,6</td> <td>60μ – 200μ</td> </tr> <tr> <td>A7</td> <td>Kool Mμ, XFlux</td> <td>All</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>A9</td> <td>All</td> <td>> 4,65</td> <td>60μ – 200μ</td> </tr> <tr> <td>AУ</td> <td>All</td> <td>3,56 – 16,5</td> <td>14μ – 300μ</td> </tr> </tbody> </table>	Код покрытия сердечника	Возможные материалы	Возможные внешние диаметры, мм	Возможные значения проницаемости	A2	MPP, High Flux	All	All	A5	All	6,35 – 23,6	60μ – 200μ	A7	Kool Mμ, XFlux	All	All	A9	All	> 4,65	60μ – 200μ	AУ	All	3,56 – 16,5	14μ – 300μ
Код покрытия сердечника	Возможные материалы	Возможные внешние диаметры, мм	Возможные значения проницаемости																								
A2	MPP, High Flux	All	All																								
A5	All	6,35 – 23,6	60μ – 200μ																								
A7	Kool Mμ, XFlux	All	All																								
A9	All	> 4,65	60μ – 200μ																								
AУ	All	3,56 – 16,5	14μ – 300μ																								
код типоразмера и магнитной проницаемости																											
код материала 55 – MPP, 58 – High Flux, 77 – Kool Mμ, 78 – XFluux																											
код сортировки по A_L CO – $A_L = \pm 2\%$, OO – не сортирован																											

Рисунок А.1 – Маркировка кольцевых сердечников фирмы Magnetics

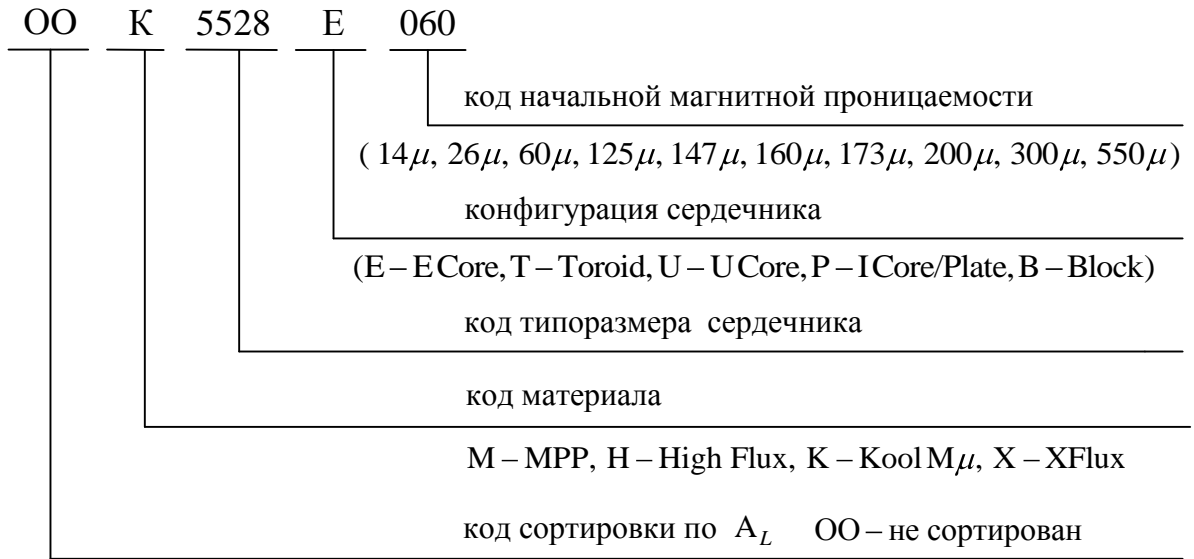


Рисунок А.2 – Маркировка сердечников фирмы Magnetics

Таблица А.2 – Параметры порошковых магнитно-мягких материалов фирмы Magnetics

Параметр	Материал			
	MPP	High Flux	Kool Mμ	XFlux
Сплав	FeNiMo	FeNi	FeSiAl	FeSi
Температура Кюри, °C	460	500	500	700
Индукция насыщения B_s , Тл	0,8	1,5	1,05	1,6
Удельный вес, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	8,0	7,6	5,5	7,5

Таблица А.3 – Соответствие обозначений ферритовых сердечников отечественных и зарубежных производителей



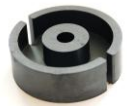
Конфигурация сердечника	Производитель ферритовых сердечников			
	Россия	Epcos	Magnetics	Cosmo Ferrites
	К	R	TC	T
	Кв	RM, PQ	RM	RM, PQ, EP
	Б	PM, P, EP, P Halves	POT, DS, RS, EP, P, Q	EP, PTC, POT
	Ш	E, ELP, EFD, EV, ETD, ER, EQ	E, EEM, EFD, EC, ETD, EER, ER, Planar	EE, EC, ETD, EER, EFF, UII I, EVD, EFC, EED, EI, Planar E
	ПК	UR	UR	UR

Таблица А.4 – Цветовая маркировка сердечников фирмы Magnetics

Материал	Цвет покрытия	Последние цифры кода сердечника
MPP	серый	A2, A5, A9, D4, M4, W4, L6
High Flux	хаки	A2, A5, A9
Kool M μ	черный	A7

Таблица А.5 – Обозначения физических величин магнитных элементов зарубежных фирм

SYMBOL	UNITS	ОПИСАНИЕ	DESCRIPTION
A_e	mm^2	Эффективная площадь поперечного сечения	Effective Cross-Sectional Area of a Core
A_{\min}	mm^2	Минимальная площадь поперечного сечения	Minimum Area of Cross-Section
A_L	nH	Величина индуктивности на виток	Inductance Per Turn
B_r	mT	Остаточная индукция	Residual Flux Density
B_s	mT	Индукция насыщения	Saturation Flux Density
\hat{B}	mT	Пиковая индукция	Peak Induction
d	kg/m^3	Плотность	Density
f	kHz	Частота	Frequency
g	mm	Величина зазора	Air gap (Cut)
H_C	F/m	Коэрцитивная сила	Coercive Field Strength
L_e	mm	Эффективная длина магнитной линии	Effective Magnetic Path Length
I	A	Ток	Current
L	H	Индуктивность	Inductance
N	–	Количество витков	Number of Turns
P_c	kW/m^3	Мощность потерь в сердечнике	Core Loss Density
T_C	$^{\circ}\text{C}$	Температура Кюри	Curie Temperature
V_e	mm^3	Эффективный объем сердечника	Effective Volume of a Core
μ_{iac}	–	Начальная магнитная проницаемость	Initial Permeability
r	Ω	Сопротивление материала	Resistivity

Таблица А.6 – Эффективные параметры сердечников конфигурации E
фирмы Magnetics из материалов MPP, HighFlux, KoolM μ , XFlux

Маркировка сердечника	$A_L \text{ нН/Т}^2 \pm 8\%$				l_e, mm	A_e, mm^2	V_e, mm^3
	26 μ	40 μ	60 μ	90 μ			
00_1808E***	26	35	48	69	40.1	22.8	914
00_2510E***	39	52	70	100	48.5	38.5	1870
00_3007E***	33	46	71	92	65.6	60.1	3940
00_3515E***	56	75	102	146	69.4	84.0	5830
00_4017E***	56	76	105	151	98.4	128	12600
00_4020E***	80	108	150	217	98.4	183	18000
00_4022E***	104	140	194	281	98.4	237	23300
00_4317E***	88	119	163	234	77.5	152	11800
00_5528E***	116	157	219	322	123	350	43100
00_5530E***	138	187	261	338	123	417	51300
00_6527E***	162	230	300	-	147	540	79400
00_7228E***	130	173	235	-	137	368	50400
00_8020E***	103	145	190	-	185	389	72000
00_8024E***	200	275	370	-	131.4	600	78840
00_8044E***	91	113	170	-	208	389	80900

Т а б л и ц а А.7 – Размерные и эффективные параметры кольцевых сердечников фирмы Magnetics

Размеры до покрытия	Размеры после покрытия			Эффективные параметры				
	OD_{max} (mm)	ID_{min} (mm)	HT_{max} (mm)	W_a (mm ²)	A_e (mm ²)	l_e (mm)	V_e (mm ³)	$W_a \times A_e$ (mm ⁴)
3,56x1,78x1,52	4,20	1,27	2,16	1,27	1,30	8,06	10,5	1,65
3,94x2,24x2,54	4,58	1,72	3,18	2,32	2,11	9,42	19,9	4,9
4,65x2,36x2,54	5,29	1,85	3,18	2,69	2,85	10,6	30,3	7,66
6,35x2,79x2,79	6,99	2,28	3,43	4,08	4,70	13,6	64,0	19,2
6,60x2,67x2,54	7,24	2,15	3,18	3,63	4,76	13,6	64,9	17,3
6,60x2,67x4,78	7,24	2,15	5,42	3,63	9,20	13,6	125	33,4
6,86x3,96x5,08	7,50	3,45	5,72	9,35	7,25	16,5	120	67,8
7,87x3,96x3,18	8,51	3,45	3,81	9,35	5,99	17,9	107	56,0
9,65x4,78x3,18	10,3	4,26	3,81	14,3	7,52	21,8	164	107
9,65x4,78x3,96	10,3	4,26	4,60	14,3	9,45	21,8	206	135
10,2x5,08x3,96	10,8	4,57	4,60	16,4	9,57	23,0	220	156
11,2x6,35x3,96	11,9	5,84	4,60	26,8	9,06	26,9	244	243
12,7x7,62x4,75	13,5	6,98	5,52	38,3	10,9	31,2	340	417
16,6x10,2x6,35	17,3	9,52	7,12	71,2	19,2	41,2	791	1370
17,3x9,65x6,35	18,1	9,01	7,12	63,8	23,2	41,4	960	1480
20,3x12,7x6,35	21,1	12,0	7,12	114	22,1	50,9	1120	2520
22,9x14,0x7,62	23,7	13,3	8,39	139	31,7	56,7	1800	4430
23,6x14,4x8,89	24,4	13,7	9,66	149	38,8	58,8	2280	5770
26,9x14,7x11,2	27,69	14,1	12,0	156	65,4	63,5	4150	10200
32,8x20,1x10,7	33,66	19,4	11,5	297	65,6	81,4	5340	19500
34,3x23,4x8,89	35,18	22,5	9,78	399	46,4	89,5	4150	18500
35,8x22,4x10,5	36,71	21,5	11,4	364	67,8	89,8	6090	24700

Окончание таблицы А.7

Размеры до покрытия	Размеры после покрытия			Эффективные параметры				
	OD_{max} (mm)	ID_{min} (mm)	HT_{max} (mm)	W_a (mm ²)	A_e (mm ²)	l_e (mm)	V_e (mm ³)	$W_a \times A_e$ (mm ⁴)
Сердечник $OD \times ID_{min} \times HT_{max}$								
39,9x24,1x14,5	40,77	23,3	15,4	427	107	98,4	10600	45800
46,7x28,7x15,2	47,63	27,88	16,2	610	134	116	15600	81800
46,7x24,1x18,0	47,63	23,3	19,0	427	199	107	21300	85900
50,55x24,89x21,08	51,31	23,88	21,59	452	262	1135	29700	118000
50,8x31,8x13,5	51,69	30,93	14,4	751	125	127	15900	94000
57,2x35,6x14,0	58,04	34,74	14,9	948	144	143	20700	137000
57,2x26,4x15,2	58,04	25,57	16,2	514	229	125	28600	118000
62,0x32,6x25,0	62,91	31,69	25,91	789	360	144	51800	284000
68,0x35,99x19,99	69,42	34,67	21,41	945	314	158	49700	297000
74,1x45,30x35,0	75,01	44,39	35,92	1550	497	184	91400	769000
77,8x49,20x12,7	78,95	48,20	13,9	1820	176	196	34500	321000
77,8x49,2x15,9	78,95	48,2	17,1	1820	221	196	43400	403000
77,8x39,34x25,85	78,95	38,34	26,85	1150	478	170	81500	550000
101,6x57,2x16,5	103,0	55,75	17,9	2470	358	243	86900	885000
132,6x78,6x25,4	134,0	77,19	26,8	4710	678	324	220000	3190000
165,1x102,4x31,8	166,5	101,0	33,15	8030	987	412	407000	7920000

Т а б л и ц а А.8 – Удельные потери мощности в сердечниках из материалов MPP, High Flux, Kool Mμ, XFlux производства фирмы Magnetics

Материал	Удельные потери мощности $P \left[\frac{\text{МВт}}{\text{см}^3} \right] = \xi \cdot B^\alpha \cdot f^\beta$ при магнитной индукции B [Тл] и частоте f [кГц]			
	Частота	ξ	α	β
MPP14μ	> 10 кГц	21,06	1,074	1,38
MPP14μ	< 10 кГц	64,02	1,074	1,11
MPP26μ	> 10 кГц	109,17	2,000	1,37
MPP26μ	< 10 кГц	361,62	2,000	1,08
MPP60μ	> 10 кГц	31,32	1,585	1,37
MPP60μ	< 10 кГц	80,12	1,585	1,04
MPP125μ-173μ	> 10 кГц	87,07	2,222	1,56
MPP125μ-173μ	< 10 кГц	254,26	2,222	1,17
MPP200μ,300μ	> 10 кГц	115,52	2,322	1,59
MPP200μ,300μ	< 10 кГц	320,32	2,322	1,19
MPP500μ	> 10 кГц	96,89	1,999	1,54
MPP500μ	< 10 кГц	303,43	1,999	1,09
High Flux 14μ	все	181,14	1,386	1,21
High Flux 26μ	> 25 кГц	532,55	2,170	1,35
High Flux 26μ	< 25 кГц	1550,54	2,170	1,05
High Flux 40μ	> 25 кГц	1707,09	2,280	1,14
High Flux 40μ	< 25 кГц	2021,58	2,280	1,05
High Flux 60μ,125μ	> 25 кГц	47,51	1,585	1,43
High Flux 60μ,125μ	< 25 кГц	151,44	1,585	1,09
High Flux 147μ-160μ	> 25 кГц	203,61	2,163	1,52
High Flux 147μ-160μ	< 25 кГц	883,51	2,163	1,09
Kool Mμ 14μ	> 10 кГц	21,49	1,000	1,33

Окончание таблицы А.8

Материал	Удельные потери мощности			
	$P \left[\frac{\text{мВт}}{\text{см}^3} \right] = \xi \cdot B^\alpha \cdot f^\beta$ при магнитной индукции В [Тл] и частоте f [кГц]			
	Частота	ξ	α	β
Кool M μ 14 μ	< 10 кГц	40,18	1,000	1,22
Кool M μ 26 μ ,40 μ	> 10 кГц	45,48	1,774	1,46
Кool M μ 26 μ ,40 μ	< 10 кГц	170,17	1,774	1,03
Кool M μ 60 μ	> 9 кГц	62,65	1,781	1,36
Кool M μ 60 μ	< 9 кГц	136,93	1,781	1,12
Кool M μ 75 μ ,90 μ	> 10 кГц	146,81	2,022	1,33
Кool M μ 75 μ ,90 μ	< 10 кГц	338,51	2,022	1,05
Кool M μ 125 μ	> 10 кГц	71,93	1,928	1,47
Кool M μ 125 μ	< 10 кГц	228,46	1,928	1,05
XFlux 26 μ	> 25 кГц	761,36	1,977	1,21
XFlux 26 μ	< 25 кГц	1187,96	1,977	1,05
XFlux 40 μ	> 9 кГц	804,88	1,934	1,14
XFlux 40 μ	< 9 кГц	1274,93	1,934	1,06
XFlux 60 μ	> 10 кГц	454,56	1,909	1,19
XFlux 60 μ	< 10 кГц	670,26	1,909	1,06
XFlux 75 μ ,90 μ	> 9 кГц	566,54	2,018	1,17
XFlux 75 μ ,90 μ	< 9 кГц	862,34	2,018	1,02
Кool M μ MAX 26 μ ,60 μ	> 10 кГц	86,00	1,998	1,40
Кool M μ MAX 26 μ ,60 μ	< 10 кГц	94,67	1,998	1,40

Т а б л и ц а А.9 – Характеристики материала N87 фирмы Epcos

Предпочтительное применение			Силовые трансформаторы
Основной материал			MnZn (марганец-цинковый сплав)
Параметр	Символ	Единица измерения	Значение
Начальная проницаемость $T = 25^{\circ}\text{C}$	μ_i		$2500 \pm 25\%$
Магнитная индукция $H = 1200 \text{ А/м}, f = 10 \text{ кГц}$	$B_s (25^{\circ}\text{C})$	мТл	490
	$B_s (100^{\circ}\text{C})$	мТл	390
Напряженность коэрцитивного поля $f = 10 \text{ кГц}$	$H_c (25^{\circ}\text{C})$	А/м	21
	$H_c (100^{\circ}\text{C})$	А/м	13
Оптимальный частотный диапазон	f_{\min}	кГц	25
	f_{\max}	кГц	500
Температура Кюри	T_c	$^{\circ}\text{C}$	>200
Плотность (стандартное значение)		кг / м ³	4850
Относительные потери (стандартное значение) 25 кГц, 200 мТл, 100 $^{\circ}\text{C}$ 100 кГц, 200 мТл, 100 $^{\circ}\text{C}$ 300 кГц, 100 мТл, 100 $^{\circ}\text{C}$ 500 кГц, 50 мТл, 100 $^{\circ}\text{C}$	p_v	кВт / м ³	57
			375
			390
			215
Конфигурации сердечников			RM, P, PM, ETD, EFD, E, ER, EP, EQ, ELP, U, Ring Cores

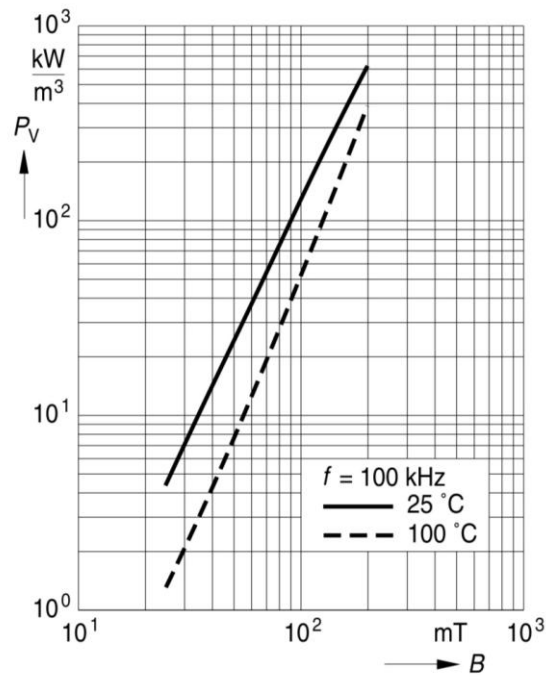


Рисунок А.3 – График зависимости удельных магнитных потерь материала N87 фирмы Ерсос от магнитной индукции переменного поля

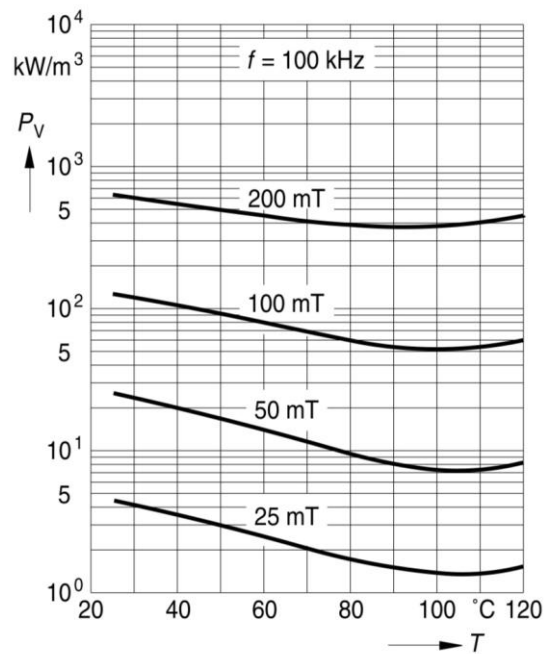


Рисунок А.4 – График зависимости удельных магнитных потерь материала N87 фирмы Ерсос от температуры

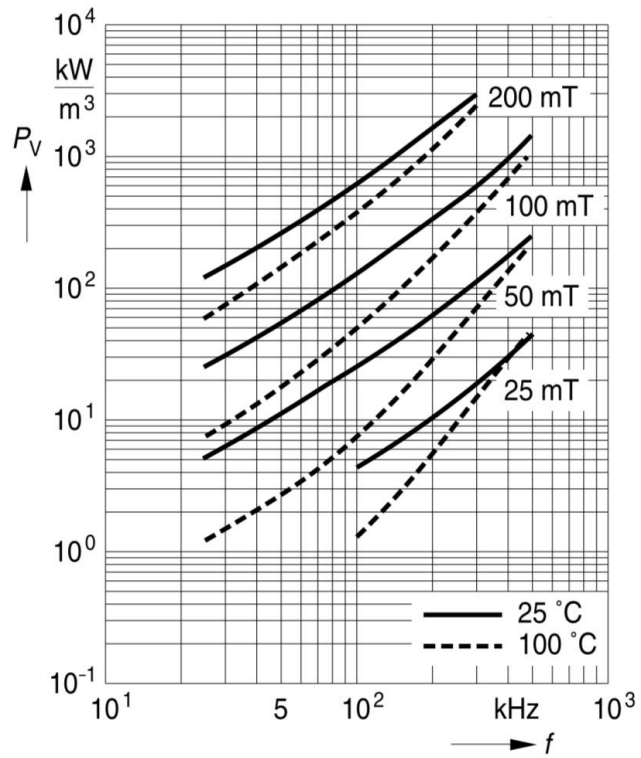


Рисунок А.5 – График зависимости удельных магнитных потерь материала N87 фирмы Epcos от частоты

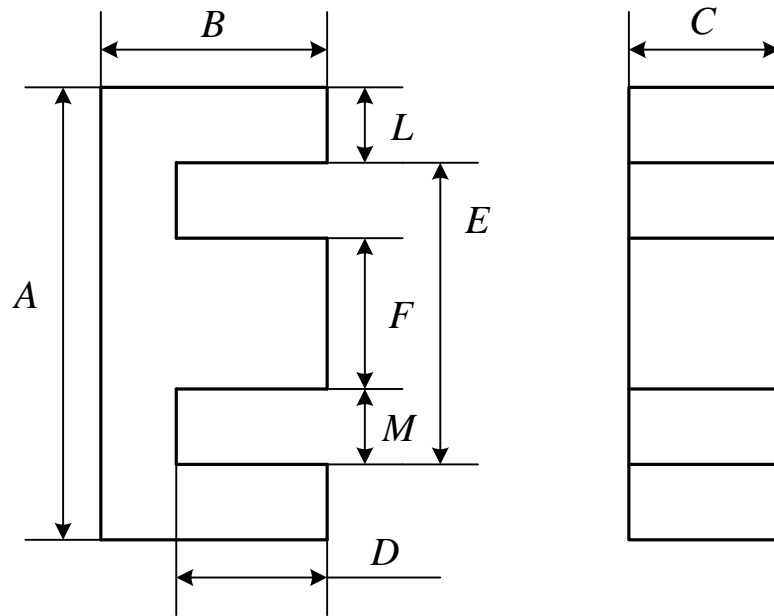


Рисунок А.6 – Размерные параметры сердечников конфигурации E фирмы Magnetics

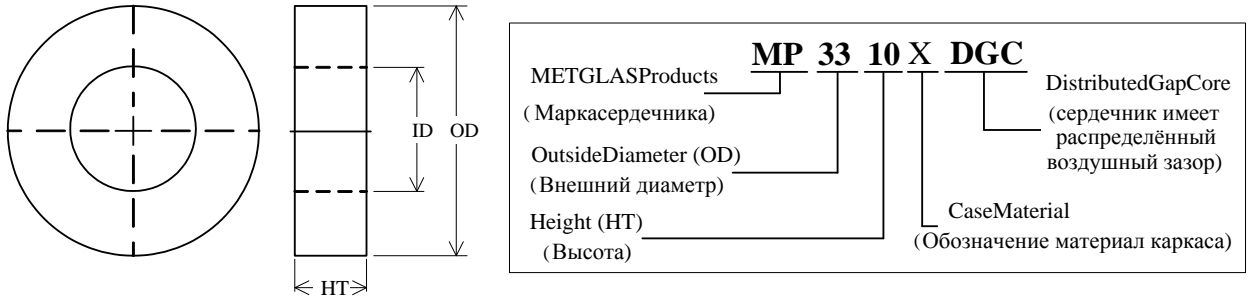


Рисунок А.7 – Маркировка сердечников фирмы Hitachi

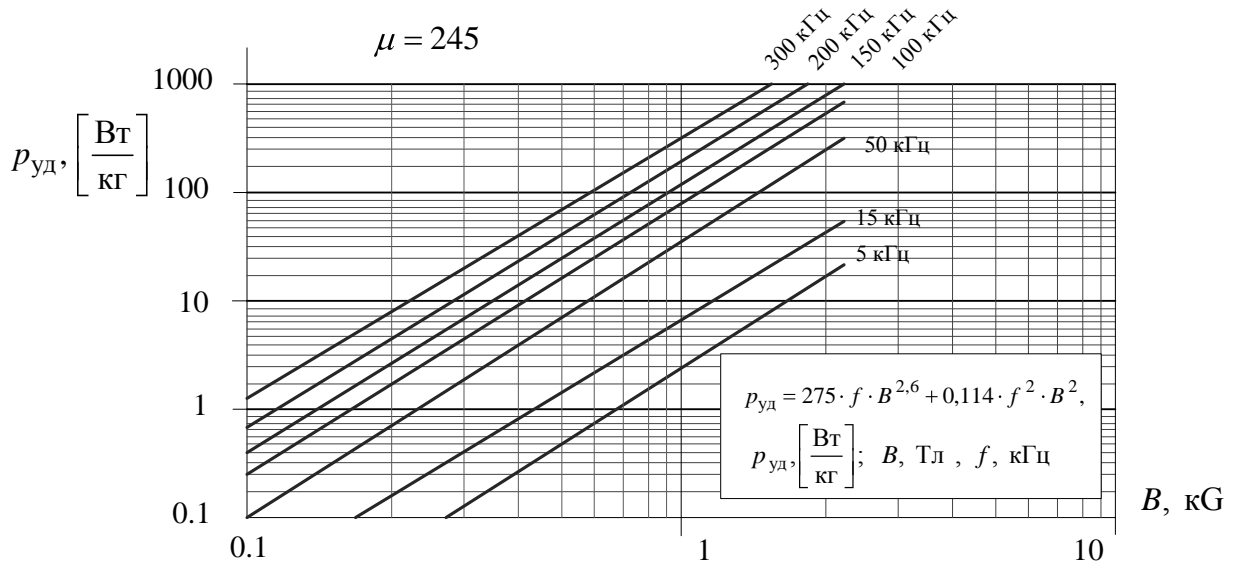


Рисунок А.8 – График зависимости относительных магнитных потерь сердечников фирмы Hitachi от магнитной индукции переменного поля

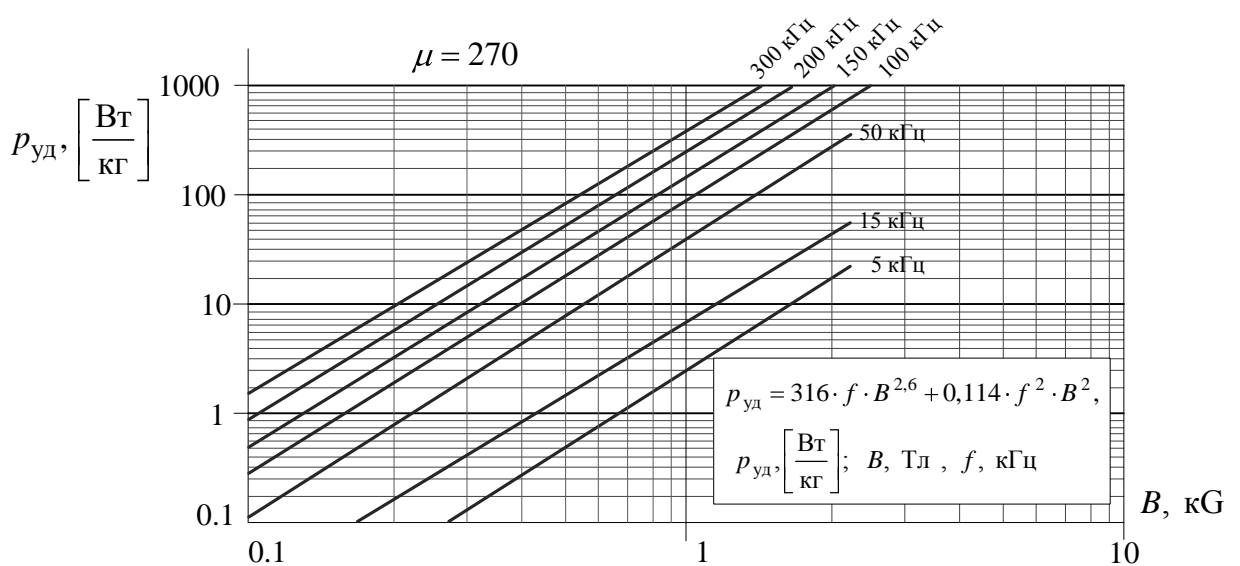


Рисунок А.9 – График зависимости относительных магнитных потерь сердечников фирмы Hitachi от магнитной индукции переменного поля

Таблица 10 – Размерные и эффективные параметры сердечников конфигурации E фирмы Magnetics

Маркировка сердечника	A (мм)	B (мм)	C (мм)	D _{min} (мм)	E _{min} (мм)	F (мм)	L _{nom} (мм)	M _{min} (мм)
1808	19,3±0,305	8,10±0,178	4,78±0,152	5,53	13,9	4,78±0,127	2,39	4,64
2510	25,4±0,381	9,53±0,178	6,35±0,102	6,22	18,7	6,35±0,127	3,18	6,24
3007	30,1±0,457	15,0±0,229	7,06±0,152	9,55	19,8	6,96±0,203	5,11	6,32
3515	34,54±0,508	14,2±0,229	9,35±0,178	9,60	25,2	9,32±0,203	4,45	7,87
4017	42,85±0,635	21,1±0,305	10,8±0,254	14,9	30,3	11,9±0,254	5,94	9,27
4020	42,85±0,635	21,1±0,330	15,4±0,254	14,9	30,35	11,9±0,254	5,94	9,27
4022	42,85±0,635	21,1±0,330	20,0±0,254	14,9	30,35	11,9±0,254	5,94	9,27
4317	40,87±0,610	16,5±0,279	12,5±0,178	10,3	28,32	12,5±0,300	6,05	7,87
5528	54,86±0,813	27,56±0,406	20,6±0,381	18,5	37,49	16,8±0,381	8,38	10,2
5530	54,86±0,813	27,56±0,406	24,6±0,381	18,5	37,49	16,8±0,381	8,38	10,2
6527	65,15±1,27	32,51±0,381	27,0±0,406	22,1	44,19	19,7±0,356	10,0	12,0
7228	72,39±1,09	27,94±0,508	19,1±0,381	17,7	52,62	19,1±0,381	9,53	16,8
8020	80,01±1,19	38,10±0,635	19,8±0,381	28,01	59,28	19,8±0,381	9,91	19,8
8024	80,01±1,19	24,05±0,635	29,72±0,381	14,02	59,28	19,8±0,381	9,91	19,8
8044	80,01±1,19	44,58±0,635	19,8±0,381	34,36	59,28	19,8±0,381	9,91	19,8

Таблица А.11 – Размерные и эффективные параметры кольцевых сердечников фирмы Hitachi

Core №.	ODmax (mm)	ID min (mm)	Ht max (mm)	Lm (cm)	A _e (cm ²)	Vol (cm ³)	W _a (cm ²)	W _a × A _e (cm ⁴)	Initial Perm	A _L (nH/N ²)
MP1005MDGC	11.32	4.47	6.12	2.40	0.10	0.25	0.16	0.016	270	144.1
MP1105MDGC	12.19	6.07	6.29	2.80	0.10	0.27	0.29	0.028	270	116.5
MP1205MDGC	13.66	7.46	6.29	3.22	0.09	0.30	0.44	0.041	270	97.7
MP1306MDGC	14.67	7.46	7.87	3.37	0.15	0.51	0.44	0.066	245	137.8
MP1603MDGC	17.03	8.99	4.70	3.98	0.09	0.34	0.63	0.055	270	73.9
MP1710MDGC	18.68	12.16	11.05	4.74	0.20	0.94	1.16	0.230	245	128.5
MP2010MDGC	21.25	12.16	11.05	5.13	0.30	1.54	1.16	0.348	245	180.1
MP2310MDGC	24.35	12.16	11.05	5.60	0.43	2.38	1.16	0.494	245	233.7
MP2510MDGC	26.84	18.51	11.05	7.01	0.27	1.89	2.69	0.725	245	118.4
MP2610MDGC	26.92	15.97	11.05	6.61	0.37	2.48	2.00	0.751	245	174.6
MP3210MDGC	33.57	21.69	11.05	8.54	0.41	3.52	3.69	1.520	245	148.3
MP3310MDGC	34.06	14.70	11.05	7.49	0.71	5.34	1.70	1.210	245	292.9
MP3505MDGC	36.40	21.69	6.29	8.97	0.26	2.35	3.69	0.968	245	90.0
MP3510MDGC	36.52	18.51	11.05	8.48	0.66	5.58	2.69	1.770	245	238.9
MP3710MDGC	38.50	21.69	11.05	9.29	0.61	5.66	3.69	2.251	245	201.9
MP4010MDGC	41.58	21.69	11.05	9.76	0.73	7.15	3.69	2.706	245	231.1
MP4510MDGC	46.73	21.69	11.05	10.55	0.94	9.91	3.69	3.472	245	274.4
MP7050MDGC	13.23	7.46	6.12	3.14	0.08	0.25	0.44	0.035	245	78.2
MP7089MDGC	46.55	28.95	15.72	11.65	0.94	10.92	6.58	6.170	245	247.7
MP7109MDGC	57.21	37.44	15.32	14.64	1.03	15.13	11.01	11.376	245	217.4
MP7120MDGC	17.31	10.46	7.87	4.24	0.14	0.59	0.86	0.119	245	100.3
MP7195MDGC	54.32	26.97	16.52	12.49	1.60	19.98	5.71	9.136	245	394.1
MP7206MDGC	21.41	13.46	7.87	5.35	0.17	0.89	1.42	0.238	245	96.2
MP7254MDGC	39.38	24.86	15.65	9.91	0.75	7.46	4.85	3.656	245	234.1

Продолжение таблицы А.11

Core №.	ODmax (mm)	ID min (mm)	Ht max (mm)	Lm (cm)	A _e (cm ²)	Vol (cm ³)	W _a (cm ²)	W _a × A _e (cm ⁴)	Initial Perm	A _L (nH/N ²)
MP7310MDGC	23.49	13.46	7.87	5.66	0.22	1.25	1.42	0.315	245	120.7
MP7324MDGC	36.99	23.01	11.05	9.24	0.49	4.50	4.16	2.026	245	162.3
MP7350MDGC	23.53	14.22	9.91	5.79	0.27	1.55	1.59	0.425	245	142.3
MP7380MDGC	18.30	10.23	7.87	4.35	0.17	0.74	0.82	0.140	245	120.6
MP7438MDGC	46.61	25.22	18.99	11.05	1.43	15.80	4.99	7.141	245	398.4
MP7548MDGC	33.25	19.73	11.05	8.15	0.47	3.82	3.06	1.435	245	177.4
MP7585MDGC	34.87	23.95	9.91	9.08	0.32	2.93	4.50	1.452	245	109.3
MP7715MDGC	51.53	32.46	13.89	12.97	0.89	11.57	8.27	7.379	245	211.7
MP7930MDGC	27.18	13.46	11.05	6.21	0.48	2.97	1.42	0.681	245	237.3
MP1306LDGC	15.80	6.17	8.13	3.37	0.15	0.51	0.30	0.045	245	137.8
MP1306PDGC	15.80	6.17	8.13	3.37	0.15	0.51	0.30	0.045	245	137.8
MP1306VDGC	15.80	6.17	8.13	3.37	0.15	0.51	0.30	0.045	245	137.8
MP1603LDGC	18.24	7.87	4.70	3.98	0.09	0.34	0.49	0.042	270	73.9
MP1603PDGC	18.24	7.87	4.70	3.98	0.09	0.34	0.49	0.042	270	73.9
MP1603VDGC	18.24	7.87	4.70	3.98	0.09	0.34	0.49	0.042	270	73.9
MP1710LDGC	20.22	10.87	11.43	4.74	0.20	0.94	0.93	0.184	245	128.5
MP1710PDGC	20.22	10.87	11.43	4.74	0.20	0.94	0.93	0.184	245	128.5
MP1710VDGC	20.22	10.87	11.43	4.74	0.20	0.94	0.93	0.184	245	128.5
MP2010LDGC	22.78	10.87	11.43	5.13	0.30	1.54	0.93	0.278	245	180.1
MP2010PDGC	22.78	10.87	11.43	5.13	0.30	1.54	0.93	0.278	245	180.1
MP2010VDGC	22.78	10.87	11.43	5.13	0.30	1.54	0.93	0.278	245	180.1
MP2310LDGC	25.91	10.80	11.48	5.60	0.43	2.38	0.92	0.389	245	233.7
MP2310PDGC	25.91	10.80	11.48	5.60	0.43	2.38	0.92	0.389	245	233.7

Окончание таблицы А.11

Core №.	ODmax (mm)	ID min (mm)	Ht max (mm)	Lm (cm)	A _e (cm ²)	Vol (cm ³)	W _a (cm ²)	W _a × A _e (cm ⁴)	Initial Perm	A _L (nH/N ²)
MP2310VDGC	25.91	10.80	11.48	5.60	0.43	2.38	0.92	0.389	245	233.7
MP2510LDGC	27.79	17.27	11.48	7.01	0.27	1.89	2.34	0.631	245	118.4
MP2510PDGC	27.79	17.27	11.48	7.01	0.27	1.89	2.34	0.631	245	118.4
MP2510VDGC	27.79	17.27	11.48	7.01	0.27	1.89	2.34	0.631	245	118.4
MP2610LDGC	28.32	14.15	11.48	6.61	0.37	2.48	1.57	0.589	245	174.6
MP2610PDGC	28.32	14.15	11.48	6.61	0.37	2.48	1.57	0.589	245	174.6
MP2610VDGC	28.32	14.15	11.48	6.61	0.37	2.48	1.57	0.589	245	174.6
MP3210LDGC	34.95	19.86	11.48	8.54	0.41	3.52	3.10	1.275	245	148.3
MP3210PDGC	34.95	19.86	11.48	8.54	0.41	3.52	3.10	1.275	245	148.3
MP3210VDGC	34.95	19.86	11.48	8.54	0.41	3.52	3.10	1.275	245	148.3
MP3310LDGC	36.07	12.95	11.48	7.49	0.71	5.34	1.32	0.939	245	292.9
MP3310PDGC	36.07	12.95	11.48	7.49	0.71	5.34	1.32	0.939	245	292.9
MP3310VDGC	36.07	12.95	11.48	7.49	0.71	5.34	1.32	0.939	245	292.9
MP3510LDGC	38.10	16.69	11.48	8.48	0.66	5.58	2.19	1.439	245	238.9
MP3510PDGC	38.10	16.69	11.48	8.48	0.66	5.58	2.19	1.439	245	238.9
MP3510VDGC	38.10	16.69	11.48	8.48	0.66	5.58	2.19	1.439	245	238.9
MP4010LDGC	43.05	19.86	11.48	9.76	0.73	7.15	3.10	2.270	245	231.1
MP4010PDGC	43.05	19.86	11.48	9.76	0.73	7.15	3.10	2.270	245	231.1
MP4010VDGC	43.05	19.86	11.48	9.76	0.73	7.15	3.10	2.270	245	231.1
MP4510LDGC	48.13	19.86	11.48	10.55	0.94	9.91	3.10	2.912	245	274.4
MP4510PDGC	48.13	19.86	11.48	10.55	0.94	9.91	3.10	2.912	245	274.4
MP4510VDGC	48.13	19.86	11.48	10.55	0.94	9.91	3.10	2.912	245	274.4

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

A_e – эффективное сечение магнитопровода

B – индукция магнитного поля

B_m – максимальная магнитная индукция за цикл перемагничивания

B_{m1} – первая гармоника магнитной индукции

B_s – индукция насыщения

$c_{об}$ – толщина обмотки

$d_{пр.из}$ – диаметр провода с изоляцией

f – частота

G – габаритный параметр трансформатора

H – напряженность магнитного поля

H_M – напряженность магнитного поля в магнитопроводе

H_{δ} – напряженность магнитного поля в зазоре

h – высота окна магнитопровода

$h_{об}$ – высота обмотки

I_m – амплитудное значение переменного тока

I – среднеквадратичное значение переменного тока

i_{μ} – ток намагничивания

j – плотность тока

k_p – коэффициент увеличения потерь в магнитопроводе вследствие резки

k_{ϕ} – коэффициент формы тока (напряжения)

$k_{ок}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода сечениями проводов обмотки без изоляции (коэффициент заполнения окна магнитопровода медью)

k – коэффициент связи двух индуктивно связанных контуров

$k_{доб}$ – коэффициент добавочных потерь

k_T – коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления провода обмотки вследствие нагрева

k_R – коэффициент увеличения сопротивления переменному току

L_{s1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора

L_{s2} – индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора

$\ell_{\text{ср.в}}$ – средняя длина одного витка обмотки

ℓ_M – длина средней линии магнитопровода

ℓ_e – эффективная длина магнитного пути

M – коэффициент взаимной индукции

$k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации трансформатора

$P_{\text{рас.}}$ – мощность тепловой энергии, рассеиваемой поверхностью трансформатора в окружающую среду

P_M – мощность потерь в магнитном материале магнитопровода

$P_{\text{об}}$ – мощность потерь в обмотке

P_{TV} – мощность трансформатора

p_M – удельные потери мощности в магнитном материале магнитопровода

q – скважность импульса

$S_{\text{об}}$ – площадь окна магнитопровода, занятая обмоткой

$S_{\text{ок}}$ – площадь окна магнитопровода

S_M – площадь сечения магнитопровода

$S_{\text{пр}}$ – сечение провода обмотки магнитного элемента

S_{TV} – площадь поверхности трансформатора

T_K – температура Кюри

V_M – объем магнитного материала магнитопровода

V_e – эффективный объем сердечника

W_M – энергия магнитного поля

w – число витков

α – коэффициент теплоотдачи

α_ρ – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления

γ – плотность магнитного материала

γ_H – коэффициент увеличения потерь в материале магнитопровода вследствие несинусоидальности магнитной индукции

Δ – глубина проникновения поля в проводник

ΔT – температура перегрева

δ – длина немагнитного зазора

μ – относительная магнитная проницаемость

μ_0 – магнитная постоянная

$\mu_{нач}$ – начальная магнитная проницаемость

$\mu_{макс}$ – максимальная магнитная проницаемость

$\mu_{диф}$ – дифференциальная магнитная проницаемость

ρ – удельное электрическое сопротивление провода обмотки

σ – удельная электрическая проводимость

τ_H – длительность импульса

Φ_0 – основной магнитный поток

Φ_s – магнитный поток рассеяния

Ψ – потокосцепление

ω – угловая частота