

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

А.И. Воронин, Г.А. Шадрин

Трансформаторы и дроссели источников электропитания электронных устройств

Учебное пособие

по дисциплине « Преобразовательная техника»

Рекомендовано Сибирским региональным
учебно-методическим центром высшего профессионального
образования для межвузовского использования
в качестве учебного пособия

Томск , 2009

УДК 621.314.2.001.24
ББК 32.844

Воронин А.И., Шадрин Г.А.

Трансформаторы и дроссели источников электропитания электронных устройств. Учебное пособие по дисциплине «Преобразовательная техника»
Томск: Изд-во ТУСУР, 2009. -145 с.

В пособии даны рекомендации по выбору магнитных материалов для магнитопроводов, обмоточных проводов и изоляционных материалов, для проектирования трансформаторов и дросселей промышленной и повышенной частоты. Приведены уравнения для определения основных параметров ферромагнитных элементов при различных формах питающих напряжений рабочих частот от промышленной до сотен килогерц. Пособие содержит ряд примеров, поясняющих методику расчетов, и справочных таблиц.

Учебное пособие предназначено для студентов ВУЗов всех форм обучения по дисциплинам “ Преобразовательная техника” и специалистов, занимающихся разработкой источников вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры.

Рецензенты: профессор кафедры КИБЭВС ТУСУР,
доктор технических наук *Бейнарович В.А.*;
доцент кафедры «Промышленная электроника» ТУСУР,
кандидат технических наук *Семёнов В.Д.*

IBSN

Воронин А.И., Шадрин Г.А.,2009
ТУСУР,2009

Введение. Области применения трансформаторов и дросселей.....	2
Глава 1. Классификация ФМЭ и основы их проектирования	4
1.1. Классификация трансформаторов и дросселей.....	4
1.2. Тип конструкции ФМЭ.....	5
1.3. Температурные условия ФМЭ.....	6
1.4. Оптимальные соотношения размеров магнитопроводов ФМЭ.....	7
1.5. Расчёт маломощных трансформаторов ИВЭП низкой частоты.....	12
1.6. Оптимальные соотношения размеров дросселей.....	14
Глава 2. Магнитные материалы и магнитопроводы	21
2.1. Характеристики намагничивания магнитных материалов.....	21
2.2. Магнитопроводы витые и штампованные для ФМЭ.....	32
2.3. Материал обмоток ФМЭ.....	37
2.4. Конструкция обмоток ФМЭ.....	39
Глава 3. Особенности ФМЭ и их характеристики при повышенных и высоких частотах	48
3.1. Критерии выбора магнитного материала.....	48
3.2. Рекомендации по выбору ферромагнетиков.....	50
Глава 4. Мощность потерь в трансформаторах и дросселях	58
4.1. Мощность потерь в магнитопроводе ФМЭ при синусоидальном напряжении.....	58
4.2. Мощность потерь при импульсном напряжении или токе.....	59
4.3. Мощность потерь при периодическом несинусоидальном воздействии.....	63
4.4. Добавочные потери в обмотках ФМЭ.....	65
Глава 5. Расчет реакторов и дросселей повышенной частоты	70
5.1. Параметры дросселей и реакторов.....	70
5.2. Расчет дросселя фильтра.....	74
5.3. Порядок расчета коммутирующих дросселей преобразователей с принудительной коммутацией.....	76
5.4. Особенности расчета дросселей при импульсных напряжениях (с большой скважностью).....	80
5.5. Расчет реакторов.....	84
Глава 6. Расчёт трансформаторов повышенной частоты	88
6.1. Электромагнитные процессы в ТММ. Расчёт индуктивности рассеяния.....	88
6.2. Параметры и геометрические соотношения в ТММ.....	91
6.3. Расчёт ТММ повышенной частоты при питании синусоидальным напряжением.....	101
6.4. Расчет ТММ при несинусоидальном напряжении питания.....	106
6.5. Расчёт ТММ при импульсном напряжении.....	111
6.6. Собственная емкость обмоток.....	116
Список литературы	122
Приложение	123

Введение

Области применения трансформаторов и дросселей

Трансформаторы для источников вторичного электропитания (ИВЭП) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) относятся, как правило, к трансформаторам малой мощности (ТММ).

Габаритная мощность ТММ не превышает нескольких кВА, а в случае работы в импульсном режиме их мощность может быть существенно больше. Проектирование ТММ имеет ряд особенностей, обусловленных отличием конструкций и многообразием их режимов работы. К ТММ для ИВЭП выдвигаются жёсткие требования по массе и габаритам. У ТММ общепромышленного и бытового назначения, работающих на частотах 50 и 400Гц, острее встают вопросы экономической эффективности, что вызвано большими масштабами их производства.

ТММ, как правило, представляют собой сухие трансформаторы: броневые, стержневые, тороидальные и трёхфазные стержневые, выполненные на ленточных магнитопроводах.

Важными параметрами ТММ являются электромагнитные нагрузки (индукция в сердечнике, плотность тока в обмотках), ток намагничивания, падение напряжения при постоянном перегреве или перегрев при падении напряжения $\Delta U = \text{const}$. В ТММ, в отличие от силовых трансформаторов, другими будут соотношения активного и реактивного сопротивлений обмоток, потери в магнитопроводе и обмотках, намагничивающий и рабочий ток и т.п. В связи со стремительным развитием радиоэлектроники, автоматики, связи, приборостроения, ИВЭП в промышленности и быту возникла задача проведения теоретических исследований на основе оптимальных методов проектирования.

При расчёте ферромагнитных элементов (ФМЭ) – трансформаторов, сглаживающих дросселей, дросселей насыщения, преобразователей числа фаз и других устройств принято использовать несколько групп уравнений, отражающих важнейшие соотношения между электромагнитными и геометрическими параметрами. Последние определяют связь между мощностью, потерями мощности и напряжения, тепловыми режимами электромагнитных величин, массой и габаритами и рядом других показателей, влияющих на технико-экономические характеристики при тех или иных условиях проектирования аппаратов.

Уравнения, устанавливающие связь между мощностью, основными электромагнитными параметрами и геометрическими размерами (массой и габаритами) ФМЭ, являются одними из центральных для оптимизации [2,3].

За расчётную мощность используют габаритную мощность, представляющую собой произведение входных напряжения и тока одной фазы ФМЭ. Довольно часто пользуются значением мощности нагрузки, учитывающей, в отличие от габаритной мощности, входной $\cos\phi$ и КПД, которые задаются в техническом задании, либо рассчитываются.

При проектировании оптимальных параметров ФМЭ удобно пользоваться габаритной мощностью, входными значениями тока и напряжения, определя-

ющими электромагнитные режимы питающей сети и ФМЭ в целом. Это особенно важно, когда число фаз или частота от входа к выходу меняются. Дроссели применяются для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Проектированию оптимальной геометрии трансформаторов и дросселей частотой до 400гц посвящены работы Бамдаса А.М., Бальяна Р.Х., Белопольского И.И., Каретниковой Е.И., Ермолина Н.П. и ряда других ученых [1...3,6,7,10,12]. Вопросам проектирования оптимальных дросселей сглаживающих фильтров также посвящено достаточно много работ, среди которых следует отметить исследования, проведенные под руководством Гольдштейна Е.И. [12]. По методам расчета и проектирования ФМЭ повышенной и высокой частоты для ИВЭП проводились исследования под руководством Драбовича Ю.И., Обрусника В.П., Ромаша Э.М., Русина Ю.С., Горского А.Н., Найвельта Г.С. и других [2,4...6,8,13,14,15]. В [2,4...6] авторы рассматривают методы оптимального проектирования однофазных трансформаторов и дросселей по критерию оптимизации-минимальный объем ФМЭ. В данном учебном пособии этот критерий и принят за основу.

Критерии проектирования

При заданных электрических параметрах всегда можно спроектировать трансформатор или дроссель с наименьшими массой, габаритами и стоимостью.

Выполнение указанных критериев с целью получения от ФМЭ максимальной мощности или индуктивности дросселей может быть осуществлено следующими способами:

1. Выбором магнитных материалов, с большой магнитной индукцией насыщения B_s при минимальных потерях и стоимости (для трансформаторов) и высокой магнитной проницаемости при достаточно высокой B_s (для дросселей).

2. Повышением допустимой температуры перегрева сердечника и обмоток до такой величины, при которой ещё возможна достаточно надёжная работа в течение всего заданного срока службы.

3. Выбором наиболее эффективной конфигурации сердечников (броневой, стержневой, тороидальной или чашечной).

4. Определение оптимальных соотношений между основными линейными размерами магнитопровода выбранной конфигурации (оптимальной геометрии ФМЭ).

5. Рациональным электрическим расчётом, при котором выполняются электрические, конструктивные, экономические и различные специальные требования, поставляемые перед проектировщиком. Повышение частоты питающей сети позволяет значительно уменьшить массу и габариты ФМЭ, при использовании специальных материалов.

Проектирование и расчёт ФМЭ возможны только после выбора его конкретной конфигурации, т.к. геометрические формы с соотношением размеров необходимы для определения индукции, плотности тока, мощности, индуктивности рассеяния, собственной ёмкости и других показателей.

Глава 1. Классификация ФМЭ и основы их проектирования

1.1. Классификация трансформаторов и дросселей

Трансформаторы малой мощности (ТММ) электронных устройств подразделяют на: силовые, согласующие и импульсные. К ним предъявляются особые требования, отличающиеся от требований к трансформаторам других назначений. В частности, широкий диапазон входной частоты, возможная несинусоидальность напряжения, минимальные величины индуктивности рассеяния обмоток и их собственной ёмкости требуют применения особых форм и конструкций магнитопроводов и активных материалов для изготовления ФМЭ.

Силовые ТММ служат для питания различных звеньев аппаратуры переменным током той или иной частоты. Они составляют более 70% всех трансформаторов.

Согласующие ТММ предназначены для согласования сопротивлений в разных схемных звеньях. Их используют в радиоприёмной и радиопередающей аппаратуре, выполненной на электронных и полупроводниковых элементах. ТММ подразделяют на входные, выходные и промежуточные по их месту в схеме. Ещё их называют трансформаторами низкой частоты [1].

Импульсные трансформаторы обеспечивают передачу импульсов напряжения или тока между участками электрической цепи. Длительность их импульсов от долей наносекунд до десятков микросекунд, в том числе до миллисекунд и более. Форма импульсов в основном прямоугольная, хотя может быть любой.

По схеме ФМЭ подразделяют на однообмоточные (автотрансформаторы), двухобмоточные (одна первичная и одна вторичная электрически не связанные) и многообмоточные (с несколькими вторичными гальванически не связанными) обмотками. Типичным является четырёх - пятиобмоточный трансформатор.

По рабочей частоте ФМЭ подразделяются на 5 диапазонов: пониженной – ниже 50Гц , промышленной – 50Гц , повышенной – от 100 до 10000Гц , высокой – свыше 10кГц , ультразвуковой – $10\text{-}100\text{кГц}$.

ТММ повышенной частоты применяются в бортовой радиоаппаратуре, в частотном электроприводе, в источниках вторичного электропитания (ИВЭП). Наиболее распространённой является рабочая частота 400Гц .

По числу фаз ТММ чаще выполняют однофазными и реже трёхфазными.

По напряжению на обмотках ФМЭ разделяют на низковольтные и высоковольтные. К низковольтным относятся ФМЭ, у которых напряжение всех обмоток не превышает $1000\text{-}1500\text{В}$ [1,2]. В высоковольтных ФМЭ рабочие напряжения обмоток сами по себе невысоки, однако в силу схемных особенностей высокие напряжения существуют между обмотками или по отношению к корпусу. Поскольку в этом случае требуется высоковольтная изоляция между обмотками, то ФМЭ следует отнести к высоковольтным.

По мощности весь диапазон мощностей ФМЭ подразделяется на 3 поддиапазона: малые – несколько десятков вольт-ампер; средние - от нескольких десятков до нескольких сотен ВА ; большие – от нескольких сотен ВА до не-

скольких kVA . Применяемые здесь понятия мощности характеризуют размеры, массу и габариты трансформатора. Габаритную мощность, в отличие от электрической мощности, определяют как среднеэффективную за полный цикл включения с учётом пауз потребления мощности нагрузкой.

Для силовых ТММ существует два основных критерия проектирования: допустимый (заданный) перегрев или допустимое падение напряжения. Один из этих критериев является одним из важнейших признаков классификации, предопределяющим в многом методику расчёта и анализа ТММ.

Катушки индуктивности широко применяют в установках радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Они характеризуются индуктивностью, допустимым отклонением индуктивности, добротностью, собственной ёмкостью. Собственная ёмкость увеличивает действующую индуктивность, повышает нестабильность и уменьшает добротность катушки. Изменение индуктивности под влиянием температуры характеризуют температурным коэффициентом и температурной нестабильностью катушки.

Дроссели и реакторы выполняют в РЭА различные функции. Сглаживающий дроссель обеспечивает сглаживание или подавление пульсаций в фильтрах питания. В различных низкочастотных фильтрах и избирательных цепях используют дроссели переменного напряжения. Дроссели должны обеспечивать требуемое значение индуктивности. В ИВЭП для принудительного запираания тиристоров создают коммутирующий L - C контур. В качестве индуктивности используют коммутирующий реактор (катушку индуктивности без магнитопровода). Основным его параметром является энергоемкость LI^2 .

В качестве регулируемых индуктивных сопротивлений в цепях переменного тока применяют дроссели насыщения. В отличие от сглаживающих дросселей, в дросселях насыщения, имеющих две и более обмотки, немагнитный зазор отсутствует. Управляемые дроссели имеют наибольшее индуктивное сопротивление при наименьшем подмагничивании и наоборот. Расчёт дросселя переменного тока обычно производится по заданным величинам индуктивности дросселя и тока обмотки.

Реакторы (без магнитопровода) проектируются для приближения вольт-амперных характеристик к линейным, для реализации больших энергоёмкостей с максимально возможной добротностью. Индуктивность катушки реактора при изменении тока в обмотке не изменяется.

1.2. Тип конструкции ФМЭ

Тип конструкции определяет характер конструкции ТММ. Известны 5 типов магнитопроводов (сердечников) ТММ: броневой- БТ, стержневой -СТ, тороидальный -ТТ, трёхфазный – 3Т, чашечный.

У БТ центральный стержень шире в 2 раза крайних, по которым замыкается магнитный поток, а на центральном стержне размещаются первичная и вторичные обмотки.

СТ имеет две катушки, по одной на каждом стержне, которые идентичны. Первичная обмотка, состоящая из двух одинаковых по числу витков-половинок, соединяется последовательно, либо параллельно. Если катушка с первич-

ной и вторичной обмоткой размещается на одном стержне, то такой трансформатор обозначается как 1 СТ. Обмотки ТТ наматывают на магнитопровод типа ОЛ равномерно по окружности. Магнитопровод 3Т состоит из трёх идентичных стержней, на каждом из которых размещена катушка. Аналогичные конструкции и у сглаживающих (однофазных) дросселей постоянного тока.

В настоящее время, в основном, для изготовления ФМЭ применяют витые ленточные магнитопроводы. Шихтованные сердечники, набираемые из отдельных пластин, сейчас используют редко. Названия пластин для разных типов ТММ повторяют названия самих трансформаторов.

Броневые трансформаторы изготавливают на сердечниках типа Ш, СТ – на П-образных сердечниках, ТТ – на магнитопроводах ОЛ и 3Т- на Т-образных.

Чашечная конструкция ферритовых магнитопроводов применяется для изготовления высокочастотных трансформаторов и дросселей с подстройкой индуктивности. Достоинство чашечных сердечников типа Б - хорошее охлаждение магнитопровода, что важно при повышенных магнитных потерях мощности на высоких частотах.

Охлаждение ТММ, в основном, естественное воздушное, хотя можно в особых случаях применять обдув вентилятором, жидкостное или парожидкостное.

1.3. Температурные условия ФМЭ

Температурные условия зависят от максимальной температуры окружающей среды t_{oc} , при которой эксплуатируются ФМЭ (трансформаторы, дроссели и другие); максимальная рабочая температура обмоток t_p , наблюдаемая при установленном тепловом режиме; перегрев обмоток τ – превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды - $\tau = t_p - t_{oc}$. Температура окружающей среды складывается из температуры наружной того дополнительного нагрева, который наблюдается в месте установки ФМЭ по отношению к этой наружной температуре.

Перегрев τ определяет в большей мере весь расчёт ФМЭ и выбор его рабочих режимов, величины t_p и t_{oc} существенно влияют на выбор обмоточных проводов и изоляционных материалов, а также влияют на расчёт ФМЭ. На выбор изоляционных материалов оказывает влияние рабочая температура t_p и напряжение [1... 3,6].

Температурные условия ФМЭ [1]

Таблица 1.1

Область применения ФМЭ	t_{oc} (°C)	t_{ocmin} (°C)	t_p (°C)	τ (°C)
Общепромышленная	40-70	-50	90-130	30-80
Бытовая аппаратура	50-60	-40	90-110	30-50
Бортовая	80-300	-70	110 \geq 200	40-150
Корабельная	70-80	-60	100-150	30-80
Наземная	70-90	-60	100-180	30-100

Для обычных ФМЭ $t_p < 100-130^\circ\text{C}$, для высокотемпературных $t_p > 130^\circ\text{C}$.

Применяют ФМЭ с высоким перегревом, работающие при высокой температуре окружающей среды - $t_{oc} \geq 80-90^\circ\text{C}$ [1]. Температуры t_{oc} и $t_{oc\ min}$ целиком определяются областью применения. Температура t_{oc} указана не для наружной среды, а для места непосредственной установки ФМЭ. В табл. 1.1 значения t_p и τ приведены для проектирования ФМЭ при заданном перегреве.

При заданном падении напряжения эти значения могут быть значительно ниже.

Наиболее часто при проектировании ФМЭ для ИВЭП применяются температуры $t_{oc}=50^\circ\text{C}$, а $\tau=60-70^\circ\text{C}$, поскольку температура наружной среды может в летние месяцы достигать до $40-45^\circ\text{C}$ [3]. Увеличение сопротивления провода при нагревании учитывается температурным коэффициентом

$$K_t = 1 + \alpha_t (t_p - 20^\circ),$$

где 20°C - нормальная температура; α_t - коэффициент теплоотдачи; $\alpha_t=0,004$ Вт/(см²·°C) – для медного провода; $\alpha_t=0,0036$ – для алюминиевого провода; .

Итак, проектирование ФМЭ следует вести по наименьшим: массе, объёму и стоимости.

1.4. Оптимальные соотношения размеров магнитопроводов ФМЭ

Геометрию ФМЭ, как пространственной фигуры, в основном, определяет геометрия магнитопровода. Размеры катушки, главным образом, определены размерами окна сердечника. Магнитопровод (сердечник) характеризует 4 основных размера: ширину стержня – a , толщину стержня – b , ширину окна – c и высоту окна – h (рис.1.1).

Понятия магнитопровод и сердечник довольно близкие. Магнитопровод – магнитная система электротехнического устройства или совокупность нескольких её частей в виде отдельной конструктивной единицы. Например: Ш – образный или П – образный магнитопровод состоит из минимум двух частей (как в дросселях) – Ш(П) – образная и прямоугольная – «перекрышка».

Сердечник – ферромагнитная деталь, на которой или вокруг которой расположена обмотка электротехнического устройства [11]. Поэтому, магнитопровод типа ОЛ можно также называть сердечником.

Промышленность выпускает унифицированные ряды ленточных сердечников типа ШЛ, ПЛ, ОЛ, ТЛ (трёхфазные ленточные).

Большая часть рядов предназначена для силовых ФМЭ, а некоторые применяют одновременно для согласующих и импульсных трансформаторов. Холоднокатаные электротехнические стали толщиной $\delta=0,5-0,35$ используют для ФМЭ частотой 50Гц , толщиной $\delta=0,08-0,15$ – для частоты 400Гц , $\delta=0,02-0,05\text{мм}$ – для более высоких частот [1]. Для согласующих и импульсных трансформаторов применяют пермаллоевые сплавы тех же толщин листа. Более оптимальными по габаритам и массе являются сердечники типа ШЛМ, ПЛМ, отличающиеся более низким и узким окном и специально предназначенные для малых и средних ТММ. Первый содержит ряд из 30 сердечников, второй - из 40.

Ряд ОЛ - сердечников наименьшей массы для тороидальных ФМЭ нормальной и повышенной частоты (400Гц) содержит 41 сердечник мощностью до

720ВА (50Гц) и до 2200ВА (400Гц). Ряд сердечников ТЛ наименьшей массы состоит из 45 магнитопроводов мощностью до 1000ВА (50Гц) и до 4100ВА (400Гц) [1]. Для высоковольтных согласующих ТММ создан ряд разрезных ПЛ наименьшей массы с более широкими и высокими окнами типа ПЛВ. Это вызвано необходимостью размещения высоковольтных катушек с большой удельной массой изоляции. В отличие от сердечников приведённых в табл.1.2, геометрия ПЛВ следующая: $x=1,3...2,5$, $y=0,66...2$, $z=2...9$ [1,2].

Выбор типоразмера магнитопровода ФМЭ производится с учётом его расчётного объёма стали V_C . Обмотки высокочастотных ФМЭ, в основном, намотаны многожильным проводом типа литцентрат и имеют небольшой коэффициент заполнения окна K_{OK} проводом (медью).

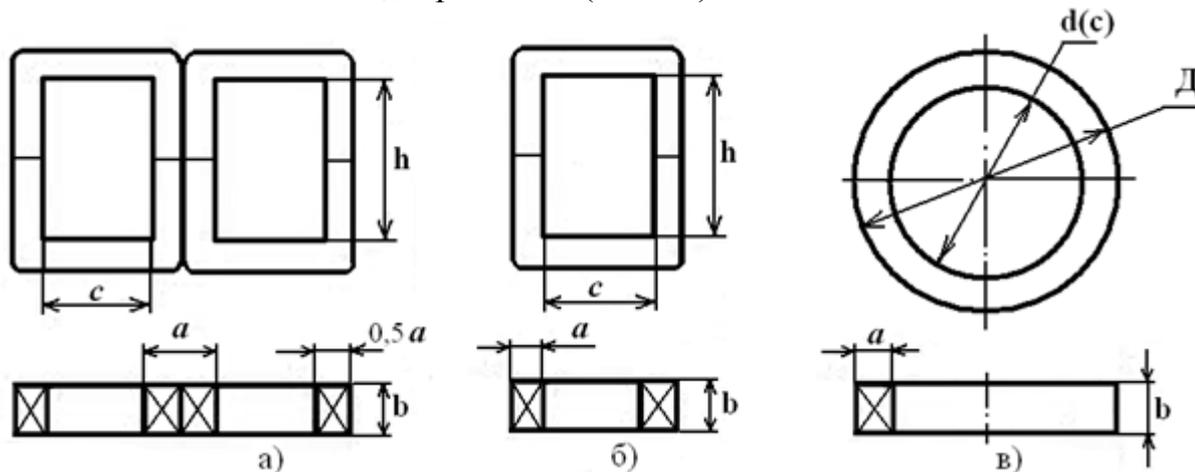


Рис.1.1.Конструкции магнитопроводов

Оптимальные размеры магнитопроводов [1,2].

Таблица 1.2

Ряд сердечников	Обозначение	x	y	z	Ряды сердечников приведены в приложении П.1-П.7
ШЛ	ШЛ $a \times b-h$	1	1-2	2,5	Мощность ТММ для типовых условий при частоте $f = 50\text{Гц}$ до 1,1 кВА, при $f = 400\text{Гц}$ – до 2,7кВА
ПЛ	ПЛ $a \times b-h$	1,25-1,6	1,6-5	1,6	
ОЛ	ОЛ $d \times D-b$	3,2	1,25-3,3	-	
ТЛ	ТЛ $a \times b-h$	2,5-2	1,6	2-4	

В тех случаях, когда одному и тому же расчётному объёму V_C соответствуют сердечники, имеющие различные размеры окна, для высокочастотных ФМЭ следует выбирать магнитопровод с большей площадью окна $S_{OK} = c \cdot h = c_{OK} \cdot h_{OK}$.

Для определения объёма магнитопровода можно воспользоваться выражениями [1,2]:

$$V_C = \varphi_c \cdot a^3 = S_C \cdot l_C = 2 \cdot a^3 \cdot y \cdot (x + z + \frac{\pi}{4}) \quad (1.1)$$

и расчётными значениями коэффициента φ_c :

$$\left. \begin{aligned} \text{для сердечников типа ШЛ} & \quad \varphi_c = 2 \cdot y \cdot (x + z + 1); \\ \text{для сердечников типа ПЛ} & \quad \varphi_c = 2 \cdot y \cdot (x + z + 2); \\ \text{для сердечников типа ОЛ} & \quad \varphi_c = \pi \cdot y \cdot (x + 1), \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где $x=c/a$, $y=b/a$, $z=h/a$; сечения стали и окна - $S_C = y \cdot a^2$, $S_{OK} = x \cdot z \cdot a^2$ - стержневых, чашечных, броневых; $S_{OK} = x^2 \cdot a^2 \cdot \frac{\pi}{4} = c^2 \cdot \frac{\pi}{4}$ - тороидальных, при

этом $a = 0,5(D - d)$; $S_C = a^2 \cdot \frac{\pi}{4}$ - чашечных. Средняя длина силовой линии магнитопровода равна $L_C = 2c + 2h + 2a \frac{\pi}{4} = 2(c + h + a \frac{\pi}{4}) = 2a (h + z + \frac{\pi}{4})$. (1.3)

Средняя длина витка катушки $L_K = 2(c + h + c \cdot n_c \frac{\pi}{2}) = 2a (1 + y + x \cdot n_c \frac{\pi}{2})$, (1.4)

где обозначено: $n_c = c_k / c$, $n_h = h_k / h$, – относительные величины, характеризующие какую часть окна занимают: толщина c_k и высота катушки $- h_K \leq h$ [6]. Для стержневых трансформаторов число катушек $n_k = 2$, для остальных конструкций $n_k = 1$; для БТи чашечных $n_c = 1$, для СТ $n_c = 0,5$, для ТТ $n_c = 0,2$. Объём катушки $V_K = S_K \cdot l_K$. Сечение катушки определяется по формуле [2,6]

$$S_K = h_k \cdot c_k \cdot n_k = n_h \cdot n_c \cdot n_k \cdot h \cdot c = n_h \cdot n_c \cdot n_k \cdot a^2 \cdot z \cdot x. \quad (1.5)$$

Поверхности охлаждения магнитопровода $\Pi_{\text{ост}}$ и катушек $\Pi_{\text{ок}}$ рассчитываются по уравнениям (естественное охлаждение и неполное заполнение окна) [2,6]:

$$\Pi_{\text{ос}} = 2(2a/2 + 2b) \cdot (l_C - h_K) = 4(a/2 + b) \cdot (l_C - n_h \cdot h), \quad (1.6)$$

$$\Pi_{\text{ок}} = n_k (2c_k + h_k) l_k = 2(2n_c \cdot c + n_h \cdot h) (a + b + n_c \cdot \pi \cdot c/2). \quad (1.7)$$

Поверхность охлаждения катушки ТТ находится по формуле

$\Pi_{\text{ок}} = \pi \cdot D_H (0,5 \cdot D_H + H)$, где $H = b + 0,6c$; $D_H = 2(a + 0,6 \cdot c)$ – размеры см. на рис. 2.16. Эта формула приближённая и основана на том, что внутреннее (технологическое) окно тороида не участвует в охлаждении. Здесь охлаждающая поверхность образована окружностью $\pi \cdot D_H$, умноженная на высоту H и две площади (сверху и снизу), равные $\pi \cdot D_H^2 / 4$.

Геометрические размеры a, b, c, h приведены на рис. 1.1.

Оптимальные соотношения размеров трансформаторов рассмотренных конструкций даны в табл. 1.3.

По оптимальной геометрии рекомендуется принимать:

для ШЛ $x=1, y=2, z=2,5$; для ПЛ $x=1,6, y=2, z=2,5-5$; для ОЛ $x=3,3, y=3,3$ [1].

Как следует из (1.1) основными размерами являются параметры стержня и окна сердечника. Для их определения необходимо знать мощность трансформатора.

Электромагнитная $P_{\text{эм}}$, полезная P_2 и входная P_1 мощность трансформатора равны :

$$P_{\text{эм}} = E_2 \cdot I_2, \quad P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad \text{и} \quad P_1 = U_1 \cdot I_1, \quad (1.8)$$

где E_2 – ЭДС вторичной обмотки, U_1, U_2, I_1, I_2 – напряжения и токи обмоток.

$$\text{Габаритная мощность равна } P_{\Gamma} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) = \frac{E_2 \cdot I_2}{2} \left(1 + \frac{1}{\eta \cdot \cos \varphi} \right). \quad (1.9)$$

Оптимальные соотношения размеров по массе, объёму, стоимости. Таблица 1.3

Конструкция трансформатора	Оптимальные соотношения размеров для трансформаторов								
	Минимальной массы			Минимального объёма			Минимальной стоимости		
	у	х	z	у	х	z	у	х	z
Стержневая с одной катушкой	1-2	1,0	3	1-2	0,5	7	1	0,5	1
Стержневая с двумя катушками	1-2	1,5	2	1-2	0,5	3	2	1,0	1
Броневая	1-2	1,0	2,5	1-2	1,0	2,5	2	0,5	1
Тороидальная	0,4-1,0	2,0	-	1-2	2,0	-	-	-	-

Размеры сердечника выбранной конфигурации определяются по уравнению

$$S_c \cdot S_{OK} = P_2 \cdot 10^2 / (2,22 \cdot f \cdot B \cdot j \cdot k_{OK} \cdot k_{3C}) \quad (1.10)$$

Коэффициент заполнения окна k_{OK} проводом для ТММ приведён в табл. 1.4.

Коэффициент заполнения окна обмоткой

Таблица 1.4

Частота сети, Гц	Конфигурация магнитопровода	Коэффициент заполнения окна k_{OK}				
		мощность P_2 , (ВА)				
		15-50	50-150	150-300	300-1000	1000-2500
50	Стержневой	0,18-0,26	0,26-0,30	0,30-0,33	0,33-0,35	-
	Броневой	0,22-0,28	0,28-0,34	0,34-0,36	0,36-0,38	-
400	Стержневой	0,17-0,22	0,22-0,25	0,25-0,27	0,27-0,35	0,35-0,36
	Броневой	0,21-0,25	0,25-0,28	0,28-0,3	0,3-0,37	0,37-0,38
	Тороидальный	0,16-0,17	0,17-0,24	0,24-0,25	0,25-0,28	-

где $S_c = a \cdot b$, $S_{ok} = c \cdot h$ (см²); B - индукция (Тл), j - плотность тока (А/мм²), k_{OK} , k_{3C} - коэффициенты заполнения окна проводом и стали сердечника (см. табл. 1.4 и 2.11).

Из произведения $S_c \cdot S_{ok} = x \cdot y \cdot z \cdot a^4$ можно определить ширину стержня

$$a = \sqrt[4]{\frac{S_c S_{ok}}{x \cdot y \cdot z}}. \quad (1.11)$$

Например, для броневых магнитопроводов минимальной массы с параметрами $x=1$, $z=2,5$ находим размер a :

$$\text{при } y=1 \quad a = 0,8 \sqrt[4]{S_c S_{ok}}; \quad (1.12)$$

$$\text{при } y=2 \quad a \approx 0,67 \sqrt[4]{S_c S_{ok}}. \quad (1.13)$$

Определив по (1.12) при значениях $y=1$ и $y=2$ размер a , по табл. П.1-П.5 выбираем магнитопровод, линейный размер которого близок к расчётному значению a . Можно также выбрать сердечник по произведению $S_c \cdot S_{ок}$.

При известных удельных потерях в стали $p_{y\partial}$ (Вт/кг) сердечника не трудно найти полные потери в стали $\Delta P_c = p_{y\partial} \cdot G_c$, где $G_c = V_c \cdot L_c \cdot g_c$ – масса сердечника, $g_c = 7,65$ г/см³ – удельная масса стали. Зная массу сердечника G_c и длину силовой линии L_c , по закону полного тока находим реактивную составляющую тока намагничивания $I_{op} = H \cdot L_c / W_1$ и активную составляющую $I_{oa} = P_c / U_1$ полного тока холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2} . \quad (1.14)$$

Значения напряженности поля H выбираются для индукции B по кривым намагничивания $B=f(H)$ применяемого магнитного материала. В табл.1.5 приведена предельная рабочая индукция B_s для разных видов сердечников [1].

При постоянном (нормальном) перегреве индукцию B и плотность тока в первом приближении можно принять: для частоты 400Гц, $B = 1,4/\sqrt{a}$ (Тл), $j = \frac{2,8}{\sqrt{a}}$ А/мм²; для частоты 50Гц $B = 1,6$ Тл, $j = 4/\sqrt{a}$ А/мм².

Значения индукции приведены в табл.1.5,1.6,1.8.

Плотность тока в зависимости от мощности ТММ, от расположения обмоток относительно поверхности охлаждения катушки, изменяется в широких пределах: от 2 до 7А и чем больше мощность, тем выше сечение обмоточного провода, тем меньше плотность тока, что связано с эффектом вытеснения тока. В расчётах принято, что плотность тока всех катушек примерно одинакова.

При этом допущении для любой обмотки ФМЭ j можно считать по формуле

$$j = \sqrt{\frac{\Delta P_K}{V_K \cdot \rho \cdot k_{3K}}} , \quad (1.15)$$

где ΔP_K – потери мощности в обмотках (из опыта короткого замыкания); V_K – объём катушки; ρ – удельное сопротивление проводника при заданной температуре перегрева τ ; k_{3K} – коэффициент заполнения площади катушки проводом без изоляции (для проводов круглого сечения $k_{3K} \approx 0,35$).

В [6] приведена формула пропорциональности плотности тока и объёма катушки $j \equiv 1/\sqrt{V_K}$, из которой следует, чем больше объём катушки, тем меньше плотность тока.

Рекомендуемые значения индукции.

Таблица 1.5

Вид сердечника	Значение индукции B_s , (Тл)			
	Для сплавов		Для стали	
	80НХС, 79 НМ	50 Н, 34НКС	Горячекатаной	Холоднокатаной
Шихтованный	0,6	1,1-1,25	1,1-1,25	1,2-1,4
Ленточный	0,6	1,2-1,3	1,2-1,45	1,5-1,65

Примечание: большие цифры диапазона соответствуют большим размерам сердечника, где $1Тл = B \cdot c / м^2$

Средними значениями для плотности тока являются: $j = 2 \dots 2,5$ А/мм² для естественного охлаждения и $j = 4 \dots 4,5$ А/мм² для принудительного охлаждения. Если расчётные значения по (1.15) отличаются от указанных более на 20%, то необходимо снова произвести расчёт.

1.5. Расчёт маломощных трансформаторов ИВЭП низкой частоты

При расчёте трансформатора малой мощности до 10кВА исходными параметрами являются:

- а) напряжение питающей сети переменного тока, его форма, напряжение вторичных обмоток, частота ($\Gamma\text{ц}$);
- б) токи вторичных обмоток или мощность трансформатора P_2 ;
- в) максимальная температура окружающей среды t_{oc} , температура перегрева τ ;
- г) реальные или необходимые значения КПД и коэффициента мощности;
- д) характер нагрузки: активно-индуктивная, активно-ёмкостная или чисто активная;
- е) масса (кг) и габариты, например, в дм³;
- ж) конструкция ТММ (материалы сердечника и обмоток, условия охлаждения).

Порядок расчёта трансформатора

Рассчитывается габаритная мощность (ВА) первичной обмотки, которая равна сумме мощностей вторичных обмоток:

1, а) для работы вторичных обмоток на нагрузку, по которой протекают двухполупериодные токи – $P_{\text{тр}} \cong \sum P_2$;

1, б) для выпрямителей мощность считается с учётом коэффициентов схемы, приведённых в табл.П.14. Например, для однофазного выпрямителя при R -нагрузке $P_{\text{тр}} = 1,23P_d$, а при L -нагрузке $P_{\text{тр}} = 1,11P_d$, где $P_d = U_d \cdot I_d$ – мощность нагрузки постоянного тока.

2. По габаритной мощности предварительно выбирается тип магнитопровода (БТ, СТ, ТТ) и марка магнитного материала. Для трансформаторов следует выбирать холоднокатаные текстурованные стали: для частоты 50Гц - марки 3411 – 3414 толщиной 0,35 – 0,5 мм, для частоты 400Гц – 5000Гц – марки 3421 – 3425 толщиной листа 0,15 – 0,02 мм [1,2,6]. Чем выше частота, тем тоньше должен быть лист магнитного материала.

По марке стали (табл.1.6) выбирается индукция B_m , КПД, плотность тока j (А/мм²), коэффициент заполнения окна проводом k_{OK} (табл.1.4) и коэффициент заполнения сечения сердечника k_{3C} (табл.2.12).

3. По габаритной мощности трансформатора определяется ток первичной обмотки

$$I_1 = P_{\text{тр}} / (U_1 \cdot \eta \cdot \cos\varphi_1) \quad (1.16)$$

Обычно при R нагрузке $\cos\varphi_1 = 0,9$, а при $R-L$ нагрузке $\cos\varphi_1 = 0,85$.

Рекомендуемые значения индукции, плотности тока, КПД и коэффициента $k_{ок}$. Таблица 1.6

Габаритная мощность $P_{г}, В\cdot А$	Индукция $B, Тл$				$j, А/мм^2$		η (КПД)		$k_{ок}$
	Для марок стали								
	1511, 1512, 1513	3411, 3412, 3413	1521, 1561, 1562	3421, 3422, 3423	50 Гц	400 Гц	50 Гц	400 Гц	
	50 Гц		400 Гц						
10	1,1	1,2	1,0	1,15	4,8	7,2	0,85	0,78	0,22
20	1,26	1,4	1,08	1,33	3,9	6	0,89	0,83	0,26
40	1,37	1,55	1,13	1,47	3,2	5	0,92	0,86	0,28
70	1,39	1,6	1,14	1,51	2,8	4,2	0,94	0,88	0,3
100	1,35	1,6	1,12	1,5	2,5	3,8	0,95	0,9	0,31
200	1,25	1,51	1,02	1,4	2	3,1	0,96	0,92	0,32
400	1,13	1,43	0,92	1,3	1,6	2,5	0,97	0,94	0,33
700	1,05	1,35	0,83	1,2	1,3	2,1	0,97	0,95	0,34
1000	1,0	1,3	0,78	1,15	1,2	1,8	0,97	0,95	0,35
2000	0,9	1,2	0,68	1,05	1,1	1,5	0,97	0,95	0,36
4000	0,8	1,1	0,58	0,95	1	1,5	0,97	0,95	0,36
7000	0,72	1,02	0,5	0,87	1	1,4	0,97	0,95	0,37
10000	0,68	0,97	0,45	0,82	1	1,4	0,97	0,95	0,37

Примечание: $k_{ок}$ - приведен для проводов марки ПЭЛ, ПЭВ, ПЭТ, ПЭТВ

4. Определяется произведение сечения стали на сечение окна сердечника

$$S_c \cdot S_{ок} = \frac{10^2 P_{тр}}{1,11 \cdot (1 + \frac{1}{\eta}) \cdot B \cdot f \cdot j \cdot k_{ок} \cdot k_{зс}} \quad (\text{см}^4). \quad (1.17)$$

По расчётному значению $S_c \cdot S_{ок}$ по табл. П.1-П.5 выбирается ближайший больший магнитопровод трансформатора. При напряжении $U_1 \leq 1кВ$ для $S_{тр} \leq 200Вт$ целесообразно выбирать магнитопроводы типа ШЛ, имеющих ряд положительных показателей. Единственным недостатком БТ, по отношению к другим конструкциям, является большая индуктивность рассеяния и собственная электрическая ёмкость обмоток.

При напряжениях выше 1кВ и мощностях $S_{тр} \geq 200Вт$ и до нескольких кВА предпочтительнее магнитопроводы типа ПЛ. На частоте $f > 400Гц$ следует использовать магнитопроводы типа ОЛ при мощностях трансформатора до 200ВА и более. Ширину стержня следует выбирать по (1.11).

5. Вычисляется число витков обмоток в соответствии с законом электромагнитной индукции с учётом потерь напряжения на первичной и вторичной стороне трансформатора.

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = U_1 \left(1 - \frac{\Delta U_{1\%}}{100} \right) \cdot \frac{10^4}{4 \cdot K_{\phi} \cdot f \cdot B \cdot S_c k_{зс}} \quad (1.18)$$

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = U_2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_{2\%}}{100}\right) \frac{10^4}{4 \cdot K_\phi \cdot f \cdot B \cdot S_c \cdot k_{3c}} \quad (1.19)$$

В табл.1.7 приведены относительные значения падений напряжения в обмотках.

Потери напряжения в обмотках .

Таблица1.7

Частота, Гц	$\Delta U_{\%}$	Габаритная мощность P_T , ВА				
		15-50	50-150	150-300	300-1000	1000-2500
50	$\Delta U_{1\%}$	15-5	5-4	4-3	3-1	-
	$\Delta U_{2\%}$	20-10	10-8	8-6	6-2	-
400	$\Delta U_{1\%}$	8-4	4-1,5	1,5-1	1-0,5	0,5
	$\Delta U_{2\%}$	10-5	5-2	2-1,2	1,2-0,5	0,5

6. По плотности тока определяется сечение провода

$$S_{np} = I / j \quad (1.20)$$

По сечению провода по справочнику или по приложению табл. П.9 выбирается марка и диаметр провода.

В табл. 1.8 приведены значения плотности тока для разных размеров магнитопроводов ТММ.

Плотность тока в обмотках

Таблица1.8

Типоразмер магнитопровода, $(a \times b) \cdot h$	09x09-12	12x09-32	16x09-40	20x12-50	25x16-64	32x20-80	40x25-100
Плотность тока, (A/mm^2)	6,6-7,0	4,4-4,7	3,2-3,5	3,05-3,25	2,6-2,9	1,85-2,2	1,65-1,75

Примечание: в табл.1.8 приведён диапазон изменения размера b .

Расчёт трёхфазного ТММ

Расчёт производится по методике однофазного трансформатора. Различие состоит только в способе определения типовой мощности трансформатора, значений токов и напряжений в обмотках.

При равномерной загрузке фаз трехфазного ТММ мощность каждой фазы составляет одну треть от его мощности при любой схеме соединения обмоток- звезда или треугольник.

При активной нагрузке мощность вторичной обмотки трехфазного ТММ определяется значениями линейных токов и напряжений по формуле $P_{2л} = \sqrt{3} \cdot U_{2л} \cdot I_{2л}$, а мощность каждой фазы-фазными $P_{2ф} = U_{2ф} I_{2ф}$. Магнитопровод следует выбирать трехфазным- типа ТЛ по табл. П.4 или по [3,11].

Следует заметить, что установка катушек на магнитопровод типа ТЛ возможна, если между катушками имеется зазор не менее 2...5 мм.

1.6. Оптимальные соотношения размеров дросселей

Для сглаживания пульсаций в фильтрах применяют сглаживающие дроссели (с немагнитным материалом в зазоре).

Они используются в одно – и трехфазных (многофазных) выпрямителях, в электроприводе, в ИВЭП, в радиоэлектронной аппаратуре и в других преобразователях переменного (напряжения) тока в постоянный.

Геометрические размеры, масса и стоимость сглаживающих дросселей фильтров (СДФ) зависят от величины его электромагнитной энергии LI_0^2 .

Видно, что основным параметром дросселя является его индуктивность, величину которой можно определить на основании закона равновесия [1,3].

Напряжение на зажимах дросселя равно $U_{др} = I \cdot r_{др} - (E_a + E_p)$.
Величина ЭДС реактивной составляющей может быть определена по формуле

$$E_p = \omega \cdot L \cdot I \cdot \sin \phi, \quad (1.21)$$

где $L = \frac{\psi}{I} = \frac{w \cdot \Phi}{I}$, ψ – потокосцепление, Φ – поток, w – число витков, ϕ – угол потерь.

Реактивная составляющая ЭДС $E_p \gg E_a$, поэтому можно принять $E_p = E$ и на основании закона электромагнитной индукции записать

$$L \approx \frac{E}{\omega I} = \frac{4k_\phi \cdot w \cdot \Phi_{max} 10^{-4}}{2\pi f I} = w \cdot \frac{\Phi_{max}}{I_{max}} \cdot 10^{-4} \quad (1.22)$$

По закону полного тока, заменив ток, получим

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{w^2 \cdot \mu_a \cdot S_C}{L_c}, \quad (1.23)$$

где R_M – магнитное сопротивление определяется по уравнению

$$R_M = R_C + R_3 = \frac{L_c}{\mu_a \cdot S_C} + \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_C} \quad (1.24)$$

В (1.24) $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu \left(\frac{\Gamma_H}{M}\right)$, δ – зазор (мм) в магнитопроводе, μ – относительная магнитная проницаемость.

Введение зазора делает характеристику $B=f(H)$ более линейной, при этом дроссель не насыщается. Из-за введения немагнитного зазора возрастает общее магнитное сопротивление R_M (см. (1.23)), величина потока уменьшается. Изменяя величину δ , можно изменить величину R_M дросселя, т.е его индуктивность. В любой схеме выпрямления пульсирующий ток можно представить в виде суммы постоянной и ряда переменных составляющих различных частот, изменяющихся по синусоидальному закону [3]. С увеличением частоты амплитуды переменных составляющих выпрямленного тока существенно снижаются. Поэтому выпрямленный ток изменяется приближенно в соответствии с уравнением

$$i = I_0 + I_{max} \cdot \sin \alpha t, \quad (1.25)$$

где I_0 – постоянная составляющая выпрямленного тока; I_{max} – амплитуда переменного тока.

Индуктивность сглаживающего дросселя может быть определена на основании (1.22), в которое надо подставлять отношение Φ_{max}/I_{max} при наличии подмагничивания. При увеличении тока подмагничивания следует увеличивать значение магнитного зазора до оптимальной величины, соответствующей максимальному значению индуктивности сглаживающего дросселя. В сглаживающих дросселях введение зазора δ в магнитопровод дросселя снижает постоянную составляющую индукции, вследствие чего повышается магнитная проницаемость μ материала и падает его магнитное сопротивление. При оптимальном зазоре $\delta_{з\text{ опт}}$ уменьшение R_m снижает полное сопротивление для переменной составляющей магнитного потока существенно сильнее, чем его увеличивает введение зазора.

Максимальное значение индуктивности дросселя при наличии оптимального значения зазора равно [3]

$$L_{max} = \frac{1,256 \cdot w^2 \cdot S_c \cdot k_{зс} \cdot 10^{-4}}{l_c \left(\frac{1}{\mu_g} + \frac{\delta_{опт}}{l_c} \right)} = \frac{1,256 \cdot w^2 \cdot S_c \cdot k_{зс} \cdot \mu_{эф} \cdot 10^{-4}}{l_c}, \quad (1.26)$$

где $\mu_g = B_{max}/H_{max}$ – динамическая магнитная проницаемость материала сердечника; $\mu_{эф} = 1 / \left(\frac{1}{\mu_g} + \frac{\delta_{опт}}{l_c} \right)$ – эффективная магнитная проницаемость при зазоре в сердечнике.

Из уравнения (1.26) следует, что величина индуктивности дросселя при заданных геометрических размерах магнитопровода и заданном числе витков w зависит от магнитной проницаемости μ_g и величины зазора $\delta_{з,опт}$.

Электромагнитная энергия дросселя определяется по уравнению

$$LI_0^2 = 1,256 \cdot S_c \cdot k_{зс} \cdot l_c \cdot \mu_{эф} \cdot \left(\frac{w \cdot I_0}{l_c} \right) \cdot 10^{-4} = 1,256 \cdot V_c \cdot H_0^2 \cdot k_{зс} \cdot \mu_0 \cdot 10^{-4}, \quad (1.27)$$

где $H_0 = \frac{w \cdot I_0}{l_c}$ или $H_0 = \frac{jk_{ок} S_c S_{ок}}{V_c}$ – удельные ампервитки подмагничивания.

С учётом (1.22) и (1.23) получим [3]

$$LI_0^2 = \frac{1,256 \cdot \mu_{эф} \cdot 10^{-4} \cdot k_{зс} j \cdot S_{ок} \cdot k_{ок}^2 \cdot S_c^2}{V_c} \quad (1.28)$$

Обозначим

$$K_1 = \frac{S_c}{a^2} = y; \quad K_2 = \frac{S_{ок}}{a^2} = x \cdot z, \quad (1.29)$$

$$K_3 = \frac{V_c}{a^3} = 2y \cdot (2 + x + z).$$

Выражая из (1.29) параметры S_c , $S_{ок}$, V_c , получим ширину стержня сердечника [3], (см)

$$a = \sqrt[5]{\frac{K_3}{(K_1 K_2)^2} \cdot \frac{L \cdot I_0^2 \cdot 10^4}{1,256 \cdot \mu_{эф} (j \cdot k_{ок})^2 \cdot k_{зс}}} \quad (1.30)$$

Число витков дросселя по (1.27) будет

$$w = 10^4 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{1,256 \cdot S_c \cdot k_{зс} \cdot \mu_{эф}} \right)^{0,5} \quad (1.31)$$

Плотность тока j в обмотке дросселя зависит от типоразмера сердечника. Значения j при перегреве $\tau = 50^\circ\text{C}$ для сердечников приведены в таблице 1.8.

Следует заметить, что большее значение тока соответствуют большему значению размера b (толщине стержня – рис 1.1).

Для определения оптимального размера зазора $\delta_{з.опт}$ введём вспомогательную величину M , определяемую из уравнения

$$M = LI_0^2 / V_{ca}, \quad (1.32)$$

где $V_{ca} = V_c \cdot k_{зс}$ – активный объём стали, представляющий собой удельную электромагнитную нагрузку – величину электромагнитной энергии на единицу объёма сердечника.

Индуктивность дросселя с зазором можно рассчитать по формуле [6]

$$L = \frac{S_c \cdot w^2}{(l_c / \mu_a) + 0,8 \cdot 10^6 \cdot \delta} \quad (1.33)$$

Из (1.33) видно, что индуктивность зависит от геометрических параметров магнитопровода, числа витков и магнитной проницаемости $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$, которая выбирается на линейном участке кривой намагничивания и является *постоянной* величиной. Например, для ЭТС $\mu_a = (4...5) \cdot 10^{-3}$ Гн/м.

Немагнитный зазор в сердечнике определяется по уравнению

$$\delta_{опт} = (\delta\% / 100) \cdot L_c, \quad (1.34)$$

где $\delta\% = f(M)$ и $\mu_{эф} = f(M)$, которые находятся по кривым рис.1.2, определённым экспериментально [3].

Эффективная магнитная проницаемость в сердечнике с зазором определяется

по формуле [3]

$$\mu_{эф} = \frac{10^8}{1,256 H_0} \cdot M = f_1(M), \quad (1.35)$$

а величина зазора $\delta\%$ по уравнению

$$\delta\% = \frac{\delta_{опт}}{L_c} 100 = \left(\frac{1}{\mu_{эф}} - \frac{1}{\mu_2} \right) \cdot 100 \quad (1.36)$$

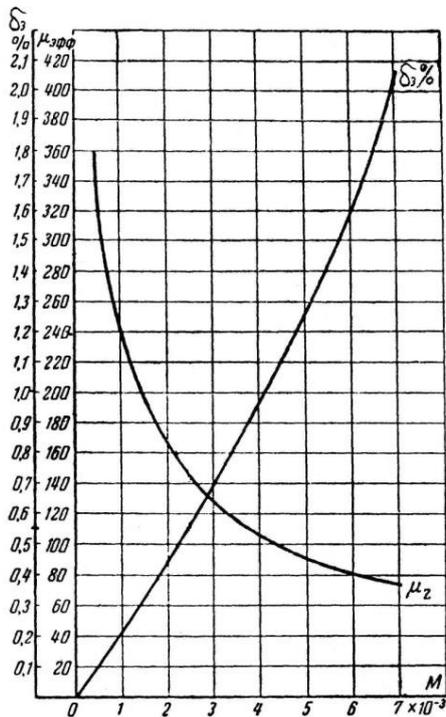


Рис.1.2. Зависимость эффективной проницаемости стали от параметра M для стали 1512 толщиной $\delta = 0,35$ мм.

Величину $1/\mu_2$, в виду её малости, можно не учитывать.

В главе 1 приведены данные соотношения для расчётов ТММ и дросселей для сглаживания пульсаций выпрямленного тока на рабочих частотах до 3000 Гц. Для частот от 3000 Гц до критической конкретного типа магнитного материала и сердечников теоретические соотношения рассмотрены в гл. 2 и 3.

Расчёт параметров сопротивлений контура намагничивания

Для расчёта статических и динамических характеристик составляется электрическая схема замещения. Напряжения и токи в ней всегда указываются в действующих значениях. Параметры схемы замещения при наличии реального трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания. При проектировании трансформатора параметры схемы замещения можно с достаточной для инженерной практики точностью рассчитать.

К параметрам схемы замещения относятся: R_1, R_2^l и X_{1S}, X_{2S}^l – активные и индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток; R_μ, X_μ – активное и индуктивное сопротивления току намагничивания; C_n – собственная (проходная) ёмкость обмоток; Z_H = сопротивление нагрузки. Обычно в схеме замещения параметры вторичной обмотки приведятся к параметрам первичной обмотки через коэффициент трансформации и обозначают со штрихом-



Рис.1.3. Кривые зависимости объёма стали от величины LI_0^2

$$-K_T = U_1 / U_2 = I_2 / I_1 = w_1 / w_2, \quad R_2' = R_2 \cdot K_T^2; \quad X_{2s}' = X_2 \cdot K_T^2; \quad Z_H' = Z_H \cdot K_T^2; \quad U_2' = U_2 \cdot K_T; \\ I_2' = I_2 \cdot K_T.$$

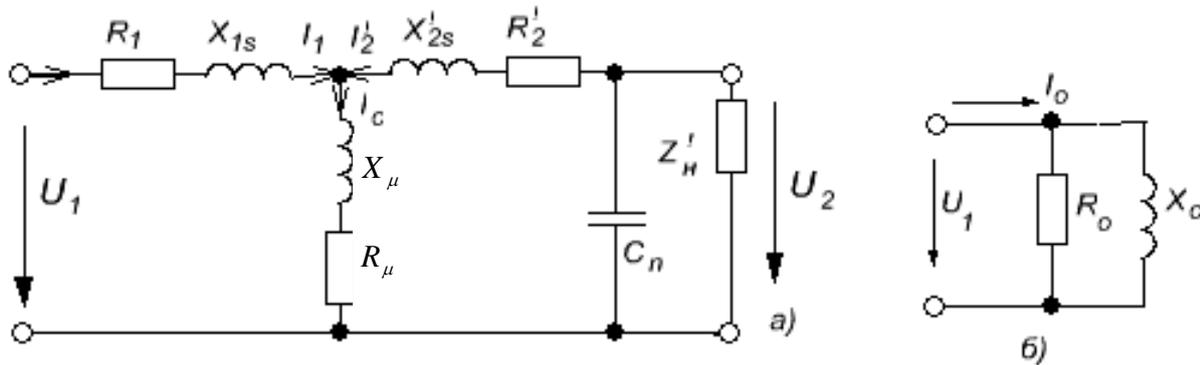


Рис.1.4. Схема замещения трансформатора

В схеме замещения на рис.1.4,а сопротивления X_μ и R_μ соединены последовательно. Их значения пересчитываются по реальным значениям X_0 и R_0 , существующим при напряжении U_1 , как включенные параллельно (рис.1.4,б).

Активное сопротивление цепи намагничивания (рис.1.4,б)

$$R_0 = U_1 / \Delta P_C, \quad (1.37)$$

где потери в стали $\Delta P_C = p_{уд} \cdot G_C \left(\frac{B}{B_m^*}\right)^\beta \cdot \left(\frac{f_1}{f^*}\right)^\alpha$. Удельные потери в стали определяются по уравнению (3.4) и таблицам 2.6, 2.9, 2.10, 3.1 и 3.2.

Индуктивность L_0 цепи намагничивания определяется по формуле (1.33), при этом индуктивное сопротивление определяется $X_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_0$. (1.38)

При наличии технологического зазора $\delta \cong 0,025$ мм (стык двух половинок сердечника) [6], получим
$$X_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \frac{\mu_a \cdot S_C \cdot w_1^2}{l_C + 2 \cdot 10^2 \cdot \mu_a}.$$

Параметры X_μ, R_μ определяются по уравнениям

$$X_\mu = X_0 \cdot R_0^2 / (R_0^2 + X_0^2); \quad (1.39)$$

$$R_\mu = R_0 \cdot X_0^2 / (R_0^2 + X_0^2); \quad (1.40)$$

Обычно $X_\mu > 4R_\mu$, тогда $Z_\mu = X_\mu \sqrt{1+1/16} \cong X_\mu$, вследствие чего сопротивлением R_μ пренебрегают.

Ток холостого хода рассчитывается по формуле $I_{10} = U_1 / X_\mu$. (1.41)

Для уменьшения значения тока холостого хода и повышения КПД следует увеличить число витков, т.е. принять меньшее значение ЭДС на виток.

Пример 1.1. Ориентировочный расчёт индуктивности дросселя

Определить максимальную индуктивность дросселя, выполненного на магнитопроводе ПЛ 20x30-50, если паспортная $\mu_a = 4 \cdot 10^{-4}$ Гн / м;

лента из ЭТС 3421 толщиной 0,2мм.

Решение

1. Определяем сечение сердечника и длину силовой линии по (1.3)

$$S_C = a \cdot b \cdot k_{3C} = 2 \cdot 3 \cdot 0,9 = 5,4 \text{ см}^2 = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$l_C = 2(h + c + 0,5 \cdot a \cdot \pi) = 2(5 + 2 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 2) \approx 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м},$$

где коэффициент заполнения стали $k_{3C} = 0,9$ - по табл. 2.12.

2. Рассчитываем сечение провода обмотки дросселя при усреднённой плотности тока $j = 2,5 \text{ А/мм}^2$ (охлаждение естественное)

$$S_{\text{пр}} = I / j = 2 / 2,5 = 0,8 \text{ мм}^2.$$

3. Находим число витков, которое можно разместить в окне магнитопровода сечением $S_{\text{ок}} = 10 \text{ см}^2$ при полном заполнении проводом $S_{\text{пр}} = 0,8 \text{ мм}^2$

$$w = S_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ок}} / S_{\text{пр}} = 1000 \cdot 0,35 / 0,8 = 437 \text{ вит.}$$

4. Определяем значение индуктивности дросселя при немагнитном зазоре $\delta = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ (обычно $\delta = 0,5 \dots 5 \text{ мм}$) по уравнению (1.33)

$$L = (0,54 \cdot 10^{-3} \cdot 437^2) / \left(\frac{0,1}{5 \cdot 10^{-4}} + 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \right) \approx 0,1 \text{ Гн.}$$

Если убрать немагнитный зазор, то индуктивность дросселя увеличится в 4раза.

Изменить идуктивность можно за счёт изменения зазора, числа витков, сечения магнитопровода или абсолютной магнитной проницаемости.

В электронных устройствах электромагнитные дроссели являются неотъемлемой частью LC и L -фильтров.

Глава 2. Магнитные материалы и магнитопроводы

2.1. Характеристики намагничивания магнитных материалов

В электромагнитной технике применяют электротехнические стали ЭТС – горячекатаные ГОСТ 21497.0-75 и холоднокатаные текстурованные (с явным направлением прокатки) – ГОСТ 21427.3-75. Стали с толщиной листа δ_d от 0,5 до 0,02мм используются для изготовления магнитопроводов типов Ш, П, О (ГОСТ 20249-80) и витых ленточных типов ШЛ, ПЛ, ОЛ и трёхфазные по ГОСТ 22050-76 “Магнитопроводы ленточные”.

Важнейшими характеристиками магнитного материала, используемого для изготовления магнитопроводов, - ЭТС, пермаллой, аморфные магнитные сплавы, ферриты, альсиферы, пресспермы и другие, является кривая намагничивания и величина удельных потерь как на частоте 50 Гц, так и на частотах 100 кГц и выше. ЭТС обозначают четырьмя цифрами, а в пермаллоях – цифры обозначают процентное содержание никеля, у ферритов – цифры соответствуют начальной магнитной проницаемости, у альсиферов и пресспермов (Мо- пермаллоев) – цифра соответствует начальной магнитной проницаемости.

Параметры альсиферов, магнитопроводов из карбонильного железа МР-10, МР-20, пресспермов, сплавов и ферритов приведены в таблицах 2.1-2.5. На рисунках 2.1-2.5, 2.7-2.8 приведены зависимости $B = f(H)$ для разных магнитных материалов. На рисунках 2.4- для Mn-Zn и Ni-Zn ферритов, а на 2.6 и 2.9 - зависимости удельных потерь для ферритов 2500 НМС1 и 1500 НМЗ. Зависимости удельных потерь $p_{y0} = f(B_m, f)$ от индукции и частоты для других магнитных материалов практически линейны.

Параметры альсиферов

Таблица 2.1

Параметры	ТЧ-90	ТЧ-60	ТЧК-55	ВЧ-32	ВЧ-22	ВЧК-22
μ	79...91	56...63	48...58	28...33	19...24	19...24
$\delta_r \cdot 10^4, м/А$	1,1	0,81	0,81	0,38	0,25	0,25
$\delta_{в.т} \cdot 10^9, 1/Гц$	-	-	-	-	25	25
$\delta_H \cdot 10^3$	3	2	2	1,2	2	2
$f_n, МГц$	0,02	0,07	0,07	0,2	0,7	0,7
Цвет маркировочного знака	Синий	Чёрный	Красный	Белый	Зелёный	Жёлтый

Примечание: ТЧ - тональная частота, ВЧ – высокая частота, К – с компенсированным температурным коэффициентом магнитной проницаемости. Маркировочный знак марки альсифера (цветная риска) наносится на внешней поверхности кольца.

Параметры магнитопроводов из карбонильного железа

Таблица 2.2

Марка	μ	$\delta_r \cdot 10^5, м/А$	$\delta_{в.т} \cdot 10^9, 1/Гц$	$\delta_H \cdot 10^3$
MP-10	13...15	0,3...05	2...3,5	0,15...0,20
MP-20	12...14	0,15...0,25	2,3	0,05...0,10

Параметры пресспермов

Таблица 2.3

Марка	μ	Температурный диапазон, °C	$\delta_r \cdot 10^{-4}, м/А$	$\delta_{в.т} \cdot 10^{-9}, 1/Гц$	$\delta_H \cdot 10^{-3}$
МП-60	60	-60...+85	0,19	100	1,5
МП-100	100	-60...+85	0,31	200	2
МП-140	140+10	-60...+85	0,625	450	2
МП-250	230	-60...+85	1	1000	3

Магнитные параметры сплавов

Таблица 2.4

Марка сплава	Толщина ленты, мм	Относительная магнитная проницаемость, не менее		Коэрцитивная сила $H_c, А/м$, не более	Индукция насыщения $B_s, Тл$, не менее
		начальная	максимальная		
79НМ	0,005...2,5	7000...22000	30000...130000	8,0...1,6	0,75
80НХС	0,005...2,5	8000...25000	70000...150000	8,0...1,0	0,63
81НМА	0,02...0,5	50000...70000	250000	1,2	0,5
83НФ	0,02...0,1	35000...50000	-	-	0,6
50НХС	0,005...1,0	1000...3000	15000...20000	56...10	1,0
45Н	0,1...2,5	2000...2800	20000...25000	24...16	1,5
50Н	0,05...2,5	2000...2800	20000...25000	20...13	1,5

Параметры ферритов

Таблица 2.5

Марка феррита	Температурный интервал, °C	$B_s, Тл$
1500НМ3	-60...+135	0,35...0,4
2000НМ1	-60...+135	0,38...0,4
2000НМ3	-60...+135	0,35...0,4
2500НМС1	+20...+135	0,4...0,5
2500НМС2	-60...+135	0,45...0,53

В качестве материалов магнитопроводов согласующих трансформаторов и дросселей (ферромагнитных элементов ФМЭ – магнитопровода с одной или несколькими обмотками), работающих на повышенных и высоких частотах, выбираются материалы, имеющие минимальные значения $p_{уд}$.

Оптимальное значение частоты для ЭТС находится в диапазоне 3...5 кГц, для пермаллоев - 5...15 кГц, для ферритов – 15...40 кГц.

Наибольшее применение для ФМЭ находят сплавы (пермаллой) 34НКМП, 79НМ, 50Н, 50НП, 80НХС, 65НП с толщиной ленты $\delta_n = 0,05 - 0,01\text{мм}$.

Железоникель-кобальтовые сплавы 47НК, 47НКХ, 64Н, 40НКМ после отжига в поперечном магнитном поле имеют линейный участок основной кривой намагничивания (ОКН) и неизменное значение магнитной проницаемости при напряженности постоянного магнитного поля до 600-800 А/м.

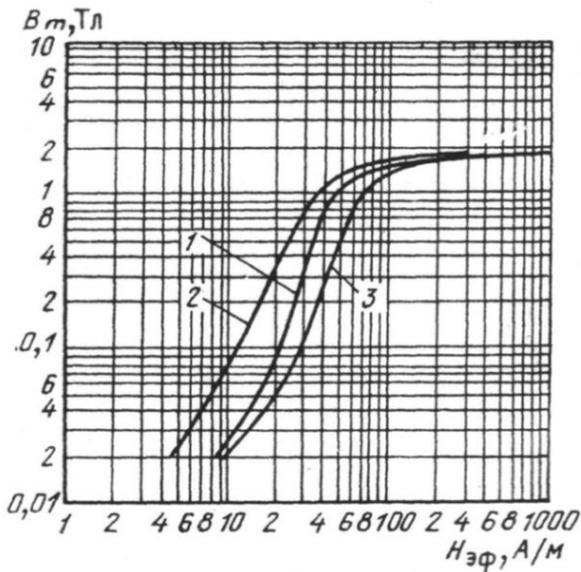


Рис. 2.1. Кривые намагничивания стали 3424 для ленты толщиной 0,08 мм при частотах, Гц: 400 (2), 1000 (1), 3000 (3)

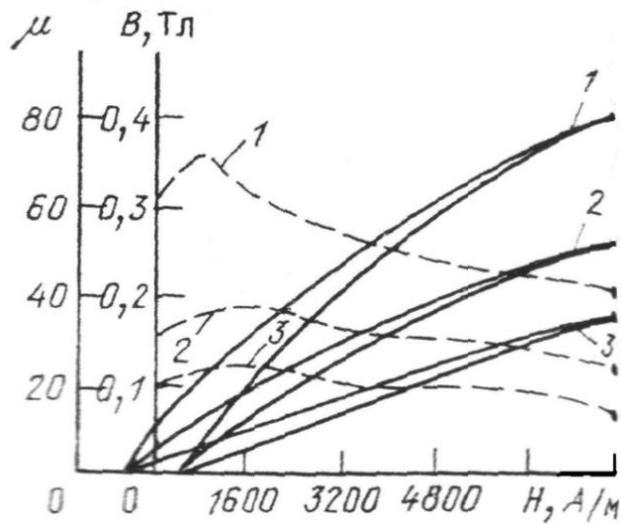


Рис. 2.2. Кривые намагничивания для альсиферов в постоянных полях: 1- ТЧ-60, 2- ВЧ-32, 3- ВЧ-22.

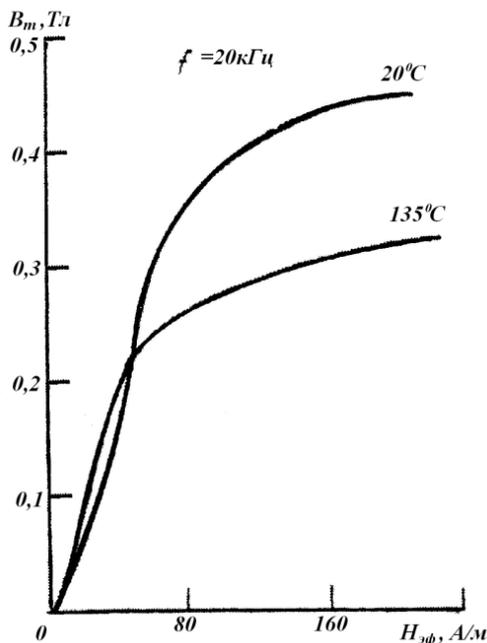


Рис. 2.3. Зависимость $B = f(H)$ для образцов марки 2500НМС при $f=20 \text{ кГц}$

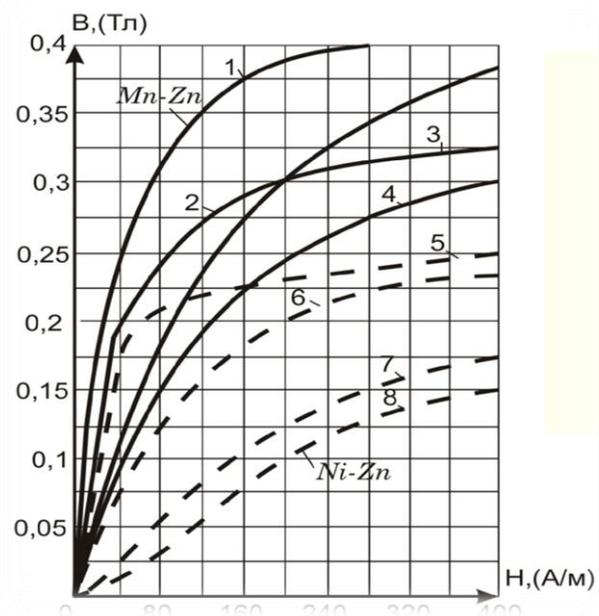


Рис. 2.4. Зависимости $B = f(H)$ ферритов: Mn - Zn 1-4000НМ, 2-3000НМ, 3-2000НМ, 4-1000НМ; Ni - Zn 5-2000НН, 6-600НН, 7-400НН, 8-200НН.

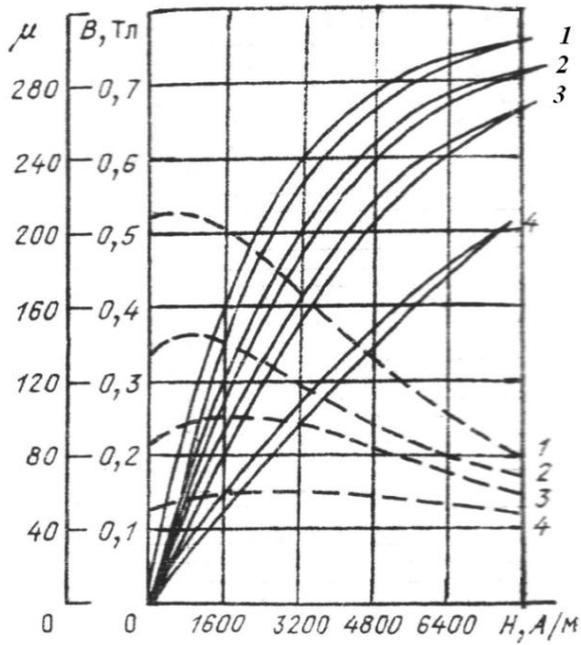


Рис. 2.5. Кривые намагничивания пресспермов в постоянных полях: 1 – МП-250; 2 – МП-140; 3 – МП-100; 4 – МП-60.

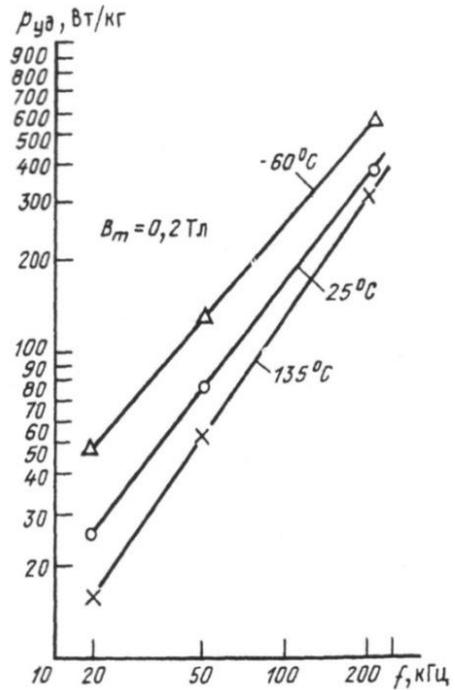


Рис. 2.6. Зависимость $P_{y0}(f)$ образцов К $16 \times 10 \times 4,5$ феррита марки 2500НМС1

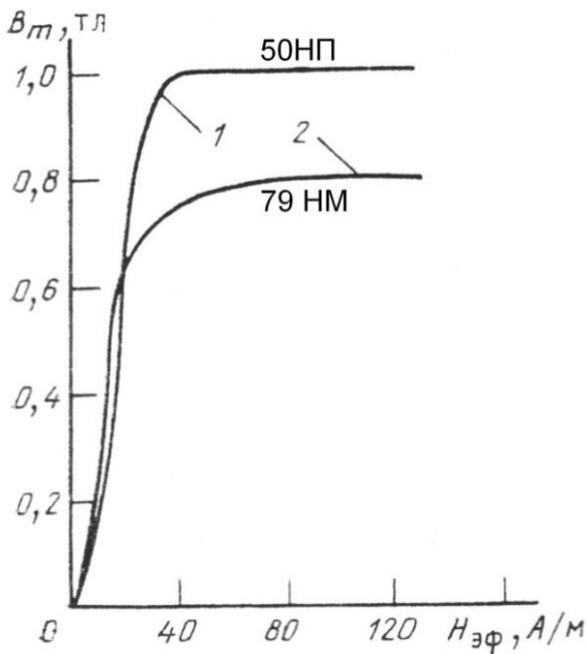


Рис. 2.7. Зависимости $B(H)$ сплавов 50 НП и 79 НМ

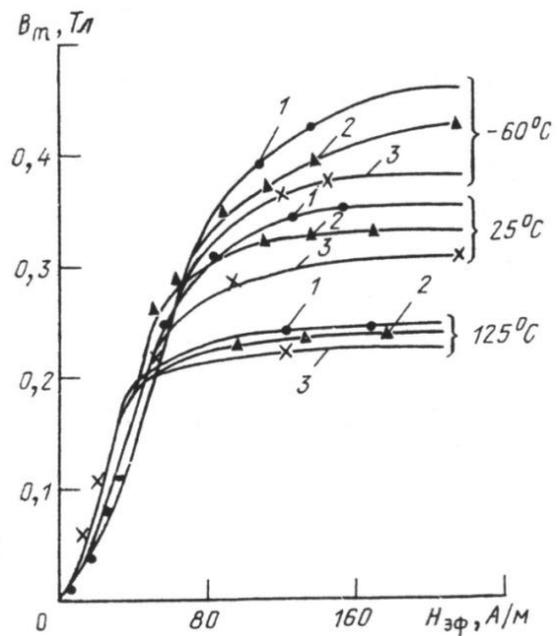


Рис.2.8. Зависимость $B(H)$ для феррита марки 1500НМЗ при различных температурах и частотах, кГц: 20 (1); 50 (2); 100(3)

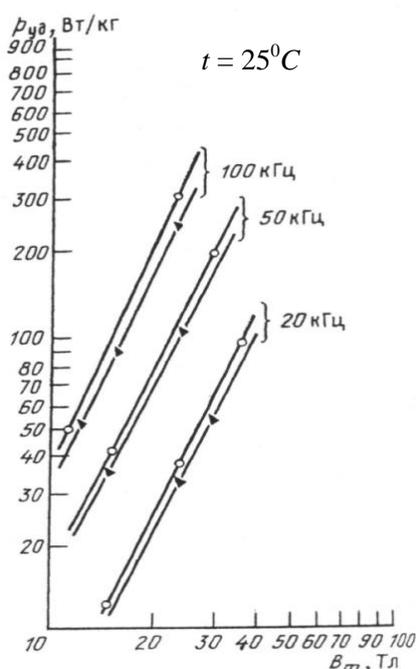


Рис.2.9. Зависимость $p_{уд}$ (Вт) ферритов 1500НМЗ (K28x16x10)

Они применяются для тороидальных трансформаторов на частотах 10-50 кГц. Ферритовые сердечники кольцевые - прямоугольного, круглого и фигурного сечения типов ПП, ПК, ПФ и Ш-образные применяются на частотах 20-100 кГц и выше. Они значительно дешевле пермалловых сердечников, основу которых составляет никель. К недостаткам ферритов относится значительное изменение индукции насыщения от температуры. В диапазоне температур от 60°C до $+135^{\circ}\text{C}$ (табл. 2.5) индукция насыщения B_S изменяется на $\pm 30\%$. В диапазоне температур от -60°C до $+200^{\circ}\text{C}$ наиболее часто применяются прецизионные термостабильные ферриты 2000НМ3, 2000НМ1, 1500НМ(3...1), 1000НМ3, 700НМ [1,6,11].

Сердечники из молибденого пермаллоя (МП-60, МП-140, МП-160) применяются в дросселях на частотах 50-100 кГц. Магнитная проницаемость мало изменяется с ростом напряженности поля до 2000A/м ; работают они в интервале температур от -60°C до $+85^{\circ}\text{C}$ (табл.2.3); их зависимость $B=f(H)$ -близка к линейной.

Сердечники из альсиферов и ферритов (табл.2.1) имеют малую частотную зависимость $B=f(H)$ на частотах до 100 кГц, однако, потери на перемагничивание в них при этом значительны. Зависимости удельных потерь ферритов от частоты и температуры имеют линейный характер (рис.2.6,2.8).

В таблице 2.6 приведены частотные характеристики некоторых марок магнитных материалов [8], а в табл. 2.7 - рекомендуемые толщины листов.

В последние годы выпускают аморфные магнитные сплавы АМС (металлические сплавы с аморфной структурой) типов 45НПР-А с параметрами $B_m = 0,78\text{Тл}$, $H_c = 1,6 - 4,9\text{A/м}$, $\mu_{max} = 70000 - 310000$, 94ЖСР-А с индукцией $B_m = 1,6\text{Тл}$, с коэрцитивной силой $H_c = 4,7 - 6,4\text{A/м}$ и коэффициентом прямоугольности $K_n = 0,81 - 0,985$ [11].

АМС обладают комплексом уникальных свойств с высокими прочностными, магнитными, коррозионными свойствами, большим удельным сопротивлением и низким температурным коэффициентом. В процессе изготовления получают ленты микронной толщины, не требующие дополнительного проката. Иностранное название АМС – метглас.

По своим магнитным свойствам АМС фактически заменяет ЭТС и пермаллои. Большинство из них имеют прямоугольную петлю гистерезиса. Магнитные потери ниже потерь кристаллических сталей и на частоте $f = 1\text{кГц}$ при индукции B_m потери в переменном поле частотой до 100кГц и малых значениях индукции

$B_m = 0,1\text{Тл}$ составляют в среднем $0,1\text{Вт/кг}$.

В последние годы выпускают аморфные магнитные сплавы АМС (металлические сплавы с аморфной структурой) типов 45НПР-А с параметрами $B_m = 0,78\text{Тл}$, $H_c = 1,6 - 4,9\text{ А/м}$, $\mu_{\max} = 70000 - 310000$, 94ЖСР-А с индукцией $B_m = 1,6\text{Тл}$, с коэрцитивной силой $H_c = 4,7 - 6,4\text{ А/м}$ и коэффициентом прямоугольности $K_n = 0,81 - 0,985$ [11].

Частотные характеристики некоторых марок магнитных материалов. Таблица 2.6

Марка	Толщина ленты	Удельные потери $p_{уд}, \text{Вт/кг}$ и напряжённость поля $H, \text{А/м}$											
		1 кГц			2,4 кГц			5 кГц			10 кГц		
		Магнитная индукция $B_m, \text{Т}$											
		0,5	0,65	1,0	0,5	0,65	1,0	0,5	0,65	1,0	0,5	0,65	1,0
34НКМП	0,1	$\frac{2,2}{12}$	$\frac{3,6}{13}$	$\frac{7,2}{17}$	$\frac{8,0}{16}$	$\frac{12,5}{19}$	$\frac{26}{25}$	$\frac{25}{24}$	$\frac{38}{30}$	$\frac{79}{40}$	$\frac{68}{34}$	$\frac{103}{39}$	$\frac{220}{54}$
	0,05	$\frac{2,2}{15}$	$\frac{3,6}{16}$	$\frac{7,0}{17}$	$\frac{8,5}{20}$	$\frac{12,5}{21}$	$\frac{23}{23}$	$\frac{23}{26}$	$\frac{33}{28}$	$\frac{66}{30}$	$\frac{60}{33}$	$\frac{90}{36}$	$\frac{170}{44}$
	0,02	$\frac{3,4}{16}$	$\frac{4,5}{17}$	$\frac{8,3}{18}$	$\frac{9,0}{19}$	$\frac{15,0}{21}$	$\frac{27}{21}$	$\frac{24}{22}$	$\frac{35}{24}$	$\frac{60}{26}$	$\frac{50}{31}$	$\frac{75}{34}$	$\frac{135}{40}$
79НМ	0,05	$\frac{0,9}{4}$	$\frac{1,4}{9,0}$	-	$\frac{2,9}{6}$	$\frac{4,8}{10,5}$	-	$\frac{10,5}{8}$	$\frac{16}{14}$	-	$\frac{32}{13}$	$\frac{50}{20}$	-
50НМ	0,05	$\frac{3,5}{28}$	$\frac{5,0}{29}$	$\frac{9,5}{30}$	$\frac{12}{32}$	$\frac{16,8}{33}$	$\frac{30}{34}$	$\frac{35}{36}$	$\frac{40}{38}$	$\frac{95}{41}$	$\frac{85}{42}$	$\frac{120}{44}$	$\frac{250}{50}$
	0,02	$\frac{3,0}{14}$	$\frac{4,4}{15}$	$\frac{8,0}{16}$	$\frac{9,5}{17}$	$\frac{13,5}{20}$	$\frac{24}{24}$	$\frac{24}{21}$	$\frac{35}{22}$	$\frac{60}{26}$	$\frac{56}{29}$	$\frac{80}{32}$	$\frac{140}{36}$
3422	0,08	$\frac{7,0}{30}$	$\frac{11,0}{34}$	$\frac{24,0}{47}$	$\frac{25,0}{40}$	$\frac{40}{47}$	$\frac{86}{64}$	$\frac{75}{56}$	$\frac{120}{68}$	$\frac{260}{96}$	$\frac{205}{83}$	$\frac{430}{98}$	$\frac{650}{-}$
47НК	0,02	$\frac{2,5}{250}$	$\frac{6,0}{450}$	$\frac{25}{900}$	$\frac{4}{250}$	$\frac{11}{460}$	$\frac{46}{920}$	$\frac{7,5}{260}$	$\frac{20}{470}$	$\frac{85}{940}$	$\frac{15}{280}$	$\frac{45}{490}$	$\frac{200}{980}$
47НК	0,02	$\frac{20}{120}$	$\frac{42}{190}$	$\frac{122}{320}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40НКМ	0,02	$\frac{6,0}{-}$	$\frac{16}{230}$	$\frac{50}{360}$	$\frac{24}{-}$	$\frac{56}{330}$	$\frac{170}{500}$	-	-	-	$\frac{70}{-}$	$\frac{150}{550}$	$\frac{400}{800}$
1000НМ	-	$\frac{30}{40}$	$\frac{80}{65}$	-	$\frac{60}{40}$	$\frac{230}{65}$	-	$\frac{1165}{46}$	$\frac{420}{70-}$	-	$\frac{240}{45}$	$\frac{650}{70}$	-
2000НМ1	-	$\frac{26}{40}$	$\frac{80}{100}$	-	$\frac{87}{40}$	$\frac{300}{100}$	-	$\frac{140}{400}$	$\frac{400}{100}$	-	$\frac{330}{40}$	-	-
2000НМ3	-	$\frac{23}{40}$	$\frac{70}{70}$	-	$\frac{60}{40}$	$\frac{160}{40}$	$\frac{160}{75}$	-	$\frac{90}{50}$	$\frac{250}{80}$	-	$\frac{150}{55}$	$\frac{400}{85}$

Примечание: для каждой марки материала в числителе даны значения удельных потерь, в знаменателе - напряжённости поля. Например, для сплава 40НКМ с $\delta_d = 0,02\text{мм}$ при частоте $f = 20\text{кГц}$ и индукции $B_m = 0,5\text{Тл}$, удельные потери $p_{уд} = 50\text{ Вт/кг}$, а $H_m = 360\text{ А/м}$.

Рекомендуемые толщины магнитных материалов для ФМЭ на повышенные частоты, (мм) приведены в таблице 2.7.

Зависимости толщины листа материала от частоты.

Таблица 2.7

Материал	Частота f , кГц					
	1-2	2-6	6-10	10-20	20-50	50-100
34НКМП	0,1	0,05	0,05-0,02	0,02	-	-
40НКМП	0,1-0,05	0,05	0,05-0,02	-	-	-
50НМ	0,1	0,05-0,02	0,02	-	-	-
68НМП	0,1-0,05	0,05	0,02	-	-	-
79НМ	0,1	0,05	0,05	0,02	0,02	-
47НК	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02-0,01	0,01
40НКМ	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02-0,01
3422 (Э350)	0,08-0,05	0,05	-	-	-	-
3423 (Э360)	0,08	0,05	0,05	-	-	-
1500НМЗ	-	-	+	+	+	-
2000НМ1	-	-	+	+	+	+
2000НМЗ	-	-	-	+	+	+

Витые кольцевые магнитопроводы марок АМС10-20 и АМС10-31 прямоугольного сечения применяются в катушках индуктивности и трансформаторах, в проводной связи и в ИВЭП и работают на частоте до 0,2 МГц. Пример условного обозначения АМС10-31, витой кольцевой ВК20×12×6, маркировка красная. В обозначении: 20×12 – диаметры, 6 – высота в мм.

С 1992г. освоено производство новых сплавов: 2НСР, 30КСР, 56БДСР, 71НКСР, 82КЗХСР, 82КГМСР, 84КСР, 84КХСР, 86КГСР, которые обозначают цифрами и только два сплава 82КГМСР, 84КХСР обозначают цифрами и буквой – 82М и 84Х.

Магнитопроводы из нанокристаллической или аморфной ленты производятся по ТУ14-123-150-99 и ТУ14-123-152-99. Основные компоненты у сплавов 71, 82, 82М, 84Х, 86 – кобальт (6%), у остальных – железо. В состав также входят: никель-Н, кремний-С, бор-Р, ниобий-Б, медь-Д, хром-Х, молибден-Г, марганец-З.

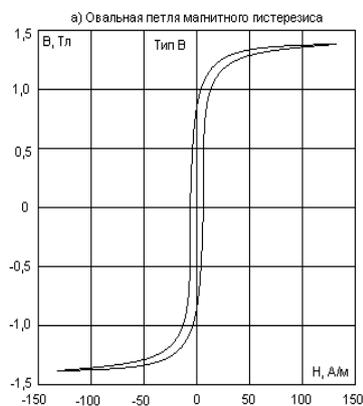
Магнитопроводы из нанокристаллического сплава 5БДСР успешно заменяют все известные магнитомягкие материалы (ЭТС, пермаллои, ферриты, магнитодиэлектрики). Лента из сплава 5БДСР производится трёх типов В, П, Т.

Изделия из ленты этого сплава нуждаются в обязательной термомагнитной обработке без наложения магнитного поля (тип В), в продольном (тип П) или поперечном (тип Т) магнитном поле при температурах 520-550 °С в воздушной атмосфере или в среде инертного газа. Сплав производится в виде тончайшей ленты, имеющей аморфную (стеклообразную) структуру, подобную АМС.

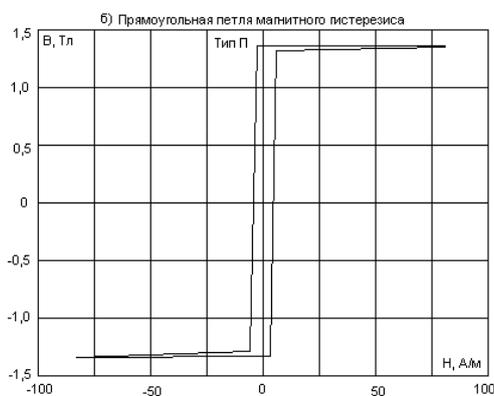
Сравнительные характеристики магнитных материалов.

Таблица 2.8

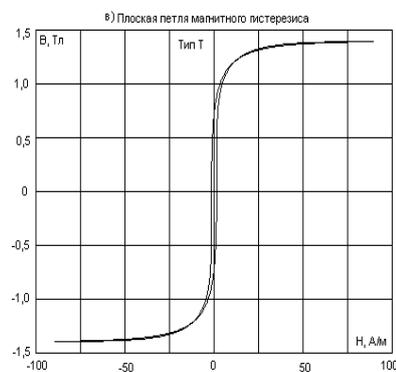
Характеристика	Vitroperm 500Z	5БДСР Тип П	Vitroperm 500F	5БДСР Тип Т	Vitroperm 500R	5БДСР Тип В
Толщина ленты - δ_l (мкм)	20-30	20-32	20-30	20-32	20-30	20-32
Индукция - B_s (Тл)	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3
Коэрцитивная сила H_c (А/м)	2,0	0,6	2,0	0,6	2,0	0,6
Коэффициент прямоугольности - $K_n = B_r/B_s$	0,93	0,9	0,1	0,1	-	-
Относительная магнитная проницаемость - μ	-	-	30000	50000	100000	100000
Магнитострикция λ_s (ppm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Измерения при частоте 100кГц, 80 А/м, при синусоидальной индукции 0,3Тл						
Коэффициент прямоугольности - $K_n = B_r/B_s$	0,96	0,95	-	-	0,95	0,95
Коэрцитивная сила H_c (А/м)	34	40	-	-	34	34
Удельные потери $P_{уд}$ (Вт/кг)	105-120	100-120	105-120	100-120	105-120	100-120



а) тип В (овальная)



б) тип П(прямоугольная)



в) Тип Т (плоская)

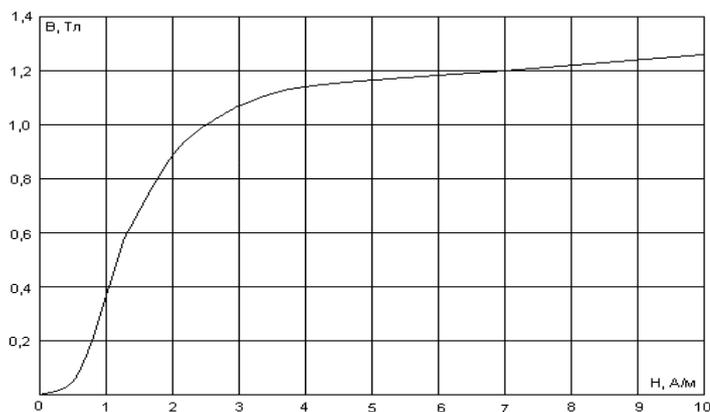


Рис.2.11. Типичная кривая намагничивания сплава 5 БДСР.

Рис. 2.10. Зависимость $B = f(H)$ гистерезиса типов В, П и Т

Витые термообработанные сердечники из ленты 5БДСР хорошо разрезаются абразивным инструментом.

Сплав типа В имеет округлую петлю гистерезиса, высокую магнитную проницаемость μ в слабых полях.

Сплав типа П имеет прямоугольную петлю гистерезиса, экстремальную максимальную магнитную проницаемость в малых полях.

Сплав типа Т имеет плоскую петлю гистерезиса, малую остаточную индукцию B_r , высокую μ в малых полях, постоянство уровня μ вплоть до насыщения. Зависимости $B=f(H)$ петель гистерезиса типов В, П, Т сплава 5БДСР приведены на рис.2.10, а на рис.2.11- его типичная кривая намагничивания.

Приближенные зарубежные аналоги – сплавы типа Finemet, Namglass, Vitroperm.

Сравнительные данные по свойствам аналогов приведены в табл.2.7. Максимальная температура длительного применения сплавов 240°C , а температура Кюри $T_k = 350^{\circ}\text{C}$.

Типичные характеристики сплавов других марок типов В, П, Т: индукция $B = 1,25 \text{ Тл}$ при напряжённости поля $H = 800 \text{ А / м}$; плотность $g_c = 7,6 \text{ г/см}^3$, удельное электрическое сопротивление $\rho_c = 1,6 \text{ мОм} \cdot \text{м}$. Относительная магнитная проницаемость μ в зависимости от типа при напряжённости магнитного поля $H = 0,1 \text{ А/ м}$ находится в пределах 80000-50000; коэрцитивная сила H_c при $B = 0,5 \text{ Тл}$ и $f = 100 \text{ кГц}$ от 24 до 30 А/м .

В настоящее время разработчики ИВЭП применяют: для трансформаторов высокой частоты нанокристаллически магнитные сплавы марки ГМ412В, а для дросселей ГМ54ДС-60...1000 вместо Мо-пермаллоя. Производители: Екатеринбургский завод «Гаммамет» и металлургический завод в г. Аша, Челябинской области. Поиск сайта по названию фирмы следует выполнять по адресу: www.chipinfo.ru.

Рекомендуемые толщины δ_n магнитных материалов для трансформаторов и дросселей для различных частот приведены в табл.2.8.

В средних и особенно сильных полях применяют марганец – цинковые ферриты, лучшими из которых являются марки М2500НМС1 и 2500НМС2. Их индукция $B_s = 0,4 - 0,53 \text{ Тл}$ (табл. 2.5).

Применение в трансформаторах ИВЭП ферритов типа 2500НМС1(2) позволяет снизить массу и габариты ФМЭ соответственно на 8 и 15% и увеличить их мощность до 20%. Магнитодиэлектрики (табл. 2.1-2.3) имеют невысокую магнитную проницаемость и близкую к линейным зависимости $B = f(H)$, поскольку частицы измельчённого ферромагнетика отделены друг от друга связкой системы [4;11].

Как отмечено выше, другим важным параметром является величина удель-

ных потерь $p_{уд}$ в ферромагнетике. Для некоторых марок ЭТС в таблицах 2.9 и 2.10 приведены значения удельных потерь на частотах $f = 50 Гц$ и $f = 400 Гц$. Для других частот различных марок сталей и сплавов коэффициенты для расчёта удельной мощности потерь для альсиферов даны в таблице 2.1.

Рулоны магнитного материала, из которых нарезают ленты для изготовления сердечников, изолируют лаком или эмалью, однако при этом снижается активное сечение ЭТС или сплава. Отношение площади активного материала к

Удельные потери и магнитная индукция для некоторых марок электротехнической листовой стали на частоте $50 Гц$ Таблица 2.9

Марка стали	Толщина листа, мм	$p_{уд}, Вт/кг$			$B_m, Тл$		
		$B_m, Тл$			$H_m, А/м$		
		1,0	1,5	1,7	100	250	2500
3411(Э310)	0,35	0,80	1,75	2,50	-	-	1,75
3412(Э320)	0,35	0,70	1,50	2,50	-	-	1,85
3413(Э330)	0,5	0,80	1,75	2,50	-	-	1,85
	0,35	0,60	1,30	1,90	-	-	1,85
3414(Э330А)	0,5	0,70	1,50	2,20	1,6	1,7	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,6	1,7	1,88
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	

площади геометрического сечения сердечника учитывается коэффициентом заполнения стали $k_{зс}$, который учитывается только для листовых и витых магнитопроводов. Резка ленты на отдельные узкие полоски, из которых навивают сердечники, приводит к ухудшению магнитных свойств, в частности к увеличению потерь.

Потери в сердечнике из-за резки учитывают коэффициентом резки $K_p = 1.3...3$, приведённым в таблице 2.11. Коэффициент заполнения стали $k_{зс}$ в зависимости от толщины ленты δ_l изменяется от 0,93 до 0,62 – табл. 2.12. Для листа (ленты) толщиной 0,5мм $k_{зс} = 0,95$.

Из закона электромагнитной индукции следует, что с увеличением частоты при входной ЭДС $E = const$ необходимо уменьшать индукцию или число витков, при этом снижается масса и габариты ФМЭ. Учитывая, что потери в стали пропорциональны $f^{1,3}$, а B_m^2 , то для исключения перегрева ФМЭ приходится снижать индукцию с ростом частоты соответственно $B \approx 1/f^{0,65}$.

Итак, магнитные материалы в основном определяют массо-габаритные и энергетические показатели ФМЭ. Высокая индукция насыщения B_s и малые удельные потери в материале сердечника позволяют выполнить ФМЭ с меньшими массой и габаритами, с более высоким КПД. На частотах $f = 400 Гц$ и выше следует применять ЭТС марок 3421-3425, 3441 и другие с толщиной лис-

та $\delta_n = 0,05 - 0,15 \text{ мм}$ (табл. 2.10). Минимальной масса сердечника (кг/ кВт) из стали 3423 с толщиной ленты 0,05 мм будет на частоте около 3,5 кГц, а затем с увеличением частоты масса снова возрастает из-за увеличения потерь.

При несинусоидальных формах токов и напряжений потери в стали ФМЭ также возрастают.

Удельные потери и магнитная индукция для некоторых марок электротехнической ленточной стали на частоте 400 Гц. Таблица 2.10

Марка стали	Толщина листа, мм	$p_{уд}, \text{Вт/кг}$		$B_m, \text{Тл}$			
		$B_m, \text{Тл}$		$H_m, \text{А/м}$			
		1,0	1,5	40	80	400	2500
3421(Э340)	0,15	10,0	23,0	0,50	0,80	1,30	1,70
	0,08	10,0	22,0	0,40	0,75	1,25	1,70
	0,05	10,0	21,0	0,40	0,75	1,25	1,70
3422(Э350)	0,15	9,0	20,0	0,60	0,95	1,40	1,75
3422(Э350А)	0,08	8,5	19,0	0,55	0,90	1,35	1,75
	0,05	8,5	19,0	0,55	0,90	1,35	1,75
3423 (Э360)	0,15	8,0	19,0	0,80	1,10	1,55	1,82
	0,08	7,5	17,0	0,80	1,05	1,50	1,82
	0,05	-	17,0	0,80	1,05	1,50	1,82
3424(Э360А)	0,15	-	18,0	0,80	1,10	1,55	1,82
	0,08	-	16,0	0,80	1,10	1,55	1,82
	0,05	7,5	16,0	0,80	1,10	1,55	1,82
3425	0,15	-	17,0	1,10	1,35	1,65	1,82
	0,08	-	15,0	1,05	1,30	1,65	1,82
	0,05	-	15,0	1,05	1,30	1,65	1,82

Коэффициент увеличения потерь K_p в магнитопроводе вследствие резки. Таблица 2.11

Материал	Значения K_p при частоте, Гц			
	50	400	2000	10000
Сталь толщиной 0,15...0,35мм	1,3	1,4	1,5	1,6
Сталь толщиной 0,05мм	-	1,5	1,6	1,7
Сплавы 50Н, 33НКМС толщиной 0,05...0,1мм	-	1,7	1,8	1,9
Сплавы 79НМ, 80НХС толщиной 0,05...0,1мм	-	2,5	2,8	3

Коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью Таблица 2.12

Магнитопровод	Изоляция	Значение $K_{зс}$ при толщине материала, мм				
		0,35	0,15...0,2	0,08...0,1	0,05	0,02
Шихтованный	Лаковая	0,93	0,85	0,75	-	-
Ленточный	Эмалевая	0,93	0,9	0,82	0,75	0,62

2.2. Магнитопроводы витые и штампованные для ФМЭ

При выборе конструкции ФМЭ прежде всего надо знать достоинства и недостатки Ш (ШЛ) – образных, П (ПЛ) – образных и О (ОЛ) – образных магнитопроводов. Для наиболее распространённых броневых конструкций трансформаторов и дросселей применяются ленточные магнитопроводы типа ШЛ.

Стержневые ФМЭ изготавливают на сердечниках типа ПЛ. Для тороидальных ФМЭ применяются сердечники кольцевого типа ОЛ.

Обмотки броневых и стержневых ФМЭ выполняются в виде катушек с каркасной и бескаркасной намоткой. Используется, как правило, рядовая многослойная намотка обмоток на каркасе или гильзе прямоугольной формы. Рядовая намотка производится по всей высоте каркаса (гильзы) или секциями на его части. Секционная намотка применяется в высоковольтных трансформаторах и при намотке низковольтных ФМЭ медной и алюминиевой фольгой.

Сердечники ПЛ и ШЛ имеют продольный разрез по середине высоты окна. В тороидальных ФМЭ обмотки укладываются на изолированный и защищённый магнитопровод. Обычно намотка выполняется по всему периметру сердечника непрерывно, а в высоковольтных – секциями.

Крайние стержни конструкции броневых трансформатора или дросселя частично защищают обмотки от механических воздействий и по ним замыкается по половине магнитного потока Φ_m среднего стержня.

Недостатки броневых ФМЭ: значительная индуктивность рассеяния L_S и собственная ёмкость C , большая чувствительность к внешним воздействиям, а также увеличенная средняя длина витка обмотки $L_{об}$.

В стержневых ФМЭ полуобмотки размещены на каждом стержне, что снижает индуктивность рассеяния L_S и снижает поверхностный эффект (скин-эффект) от тока, протекающего вдоль провода. В стержневых ФМЭ больше поверхность охлаждения катушек, но меньше поверхность охлаждения сердечника. Чувствительность к внешним магнитным полям у стержневых ФМЭ меньше, поскольку при однонаправленной намотке катушек наводимые в обмотках ЭДС помехи взаимно компенсируются. Тороидальные ФМЭ имеют минимальную индуктивность рассеяния L_S , поскольку внешнее электромагнитное поле ФМЭ существует только в осевом направлении. Основным недостатком тороидальных ФМЭ – плохая технологичность намотки.

Кольцевые сердечники применяются в силовых маломощных однофазных трансформаторах, в дросселях насыщения и в бесконтактных магнитных элементах радиотехнической и электронной аппаратуры. Магнитопроводы из ЭТС предназначены для работы в диапазоне частот от 400 до 5000 Гц. Допустимые отклонения для ОЛ на размер $a = (D - d)/2$ выбирают в зависимости от толщины

ленты: для ленты толщиной $\delta_d = 0,05 - 0,08 \text{ мм}$ - по 12-14-му качеству, на размеры d и h - по 14-му качеству, где d - внутренний диаметр кольца, h - высота кольца; a - толщина намотки ленты (рис.1.1).

Расчётные параметры кольцевых ленточных магнитопроводов типа ОЛ по ГОСТ 24011-80 приведены в табл. П.1.

Технические данные магнитопроводов ШЛ и ПЛ приведены табл. П.1-П.4, а основные данные сердечников типа К из феррита в табл.2.14.

Кольцевые магнитопроводы из аморфных сплавов марок 5БДСР и других, как и пермаллоевые, помещают в контейнеры из немагнитного материала (пластмассы, дюралюминия, полистирола и т. п.)- табл. 2.13.

Магнитопроводы из ленты сплава типа 5БДСР применяются в измерительных трансформаторах тока, дросселях, импульсных и высокочастотных трансформаторах. В магнитопроводах дросселей с немагнитным зазором зависимость $B = f(H)$ - линейная.

Броневого цилиндрический магнитопровод показан на рис. 2.12, 2.13. В обозначении броневое сердечника из феррита, число стоящее за буквой Б (броневой), показывает примерное значение наружного диаметра d_I (мм)

Из рисунка 2.12 видно, что броневой сердечник состоит из двух чашек и подстроечного сердечника. Подстроечные сердечники по конструкции делятся на 3 типа: ПС – стержневой, ПТ – трубчатый, ПР – резьбовой.

Конструкция и размеры подстроечных сердечников показаны на рис.2.14 [11]. Конструкция и размеры чашек сердечников типа Б даны на рис.2.13 и табл.2.15 и 2.16.

Технические характеристики магнитопроводов кольцевого типа из аморфных и нанокристаллических сплавов по ТУ14-123-150-99 и ТУ14-123-1

Таблица 2.13

Размер магнитопровода			Средний диаметр $D_{\text{ср}}$, мм	Длина магнитного пути L_c , см	Площадь сечения S , см^2	Масса магнитопровода m , г			Размер магнитопровода					
Наружный диаметр D , мм	Внутренний диаметр d , мм	Высота h , мм				Со-основа	Fe-основа	Нанокристаллический сплав	Пластиковый корпус			Эмалированный корпус		
			Наружный диаметр D , мм	Внутренний диаметр d , мм	Высота h , мм				Наружный диаметр D , мм	Внутренний диаметр d , мм	Высота h , мм			
15	10	4,5	12,5	3,93	0,079	2,4	2,3	2,3	18,0	8,0	4,6	15,5	9,7	4,6
18	12	10	15,0	4,71	0,210	7,6	7,2	7,5	21,6	9,6	10,2	18,5	11,6	10,6
20	13	6	16,5	5,18	0,147	5,9	5,6	5,8	24,0	10,4	8,1	20,6	12,6	8,1
21	14	10	7,50	5,50	0,245	10,4	9,8	10,2	25,2	11,2	10,2	21,6	13,6	10,6
24	16	5	20,0	6,28	0,140	6,8	6,4	6,6	28,8	12,8	5,1	24,7	15,5	5,1
25	15	10	20,0	6,28	0,350	16,9	16,0	16,6	30,0	12,0	10,2	25,8	14,6	10,6
26	16	10	21,0	6,59	0,350	7,8	6,8	7,4	1,2	2,8	0,2	26,8	5,5	10,6
26	16	20	21,0	6,59	0,700	35,5	33,7	34,9	31,2	12,8	20,3	26,8	15,5	21,2
26	20	5	23,0	7,22	0,105	5,8	5,5	5,7	31,2	16,0	5,1	26,8	19,4	5,8
27	17	10	22,0	6,91	0,350	18,6	17,6	18,3	32,4	13,6	10,2	27,8	16,5	10,6

27	20	7	23,5	7,38	0,172	9,7	9,2	9,6	32,4	6,0	7,1	27,8	9,4	7,4
28	17	10	22,5	7,07	0,385	0,9	9,9	0,6	3,6	3,6	0,2	28,8	16,5	10,6
30	20	20	25,0	7,85	0,700	2,3	0,1	1,5	6,0	6,0	0,2	30,9	9,4	1,2
32	20	10	26,0	8,16	0,420	6,4	5,0	5,9	8,4	6,0	0,2	33,0	9,4	0,6
32	20	5	26,0	8,16	0,210	3,2	2,5	3,0	8,4	6,0	5,1	33,0	9,4	5,3
32	20	20	26,0	8,16	0,840	52,8	50,1	51,8	38,4	16,0	0,3	33,0	9,4	1,2
32	20	8	26,0	8,16	0,336	21,1	20,0	20,7	38,4	16,0	8,1	33,0	19,4	8,5
35	25	10	30,0	9,42	0,350	25,4	24,1	24,9	42,0	20,0	10,2	36,1	24,3	10,6
35	25	25	30,0	9,42	0,875	63,5	60,2	62,3	42,0	20,0	25,4	36,1	24,3	26,6
40	25	8	32,6	10,21	0,420	33,0	31,3	32,4	48,0	20,0	8,1	41,2	24,3	8,5
40	25	20	32,5	10,21	1,050	82,5	78,2	81,0	48,0	20,0	20,3	41,2	24,3	21,2
45	25	25	35,0	10,99	1,750	148,1	140,4	145,4	54,0	20,0	25,4	46,4	24,3	26,5
45	28	10	36,5	11,46	0,595	52,5	49,8	51,6	54,0	22,4	10,2	46,4	27,2	10,6
50	32	10	41,0	12,87	0,630	62,5	59,2	61,3	60,0	25,6	10,2	51,5	31,0	10,6
50	32	25	41,0	12,87	1,575	156,1	148,0	153,3	60,0	25,6	25,4	51,5	31,0	10,6
50	44	10	47,0	14,76	0,210	23,9	22,6	23,4	60,0	35,2	10,2	51,5	42,7	21,2
53	47	10	50,0	15,70	0,210	25,4	24,1	24,9	63,6	37,6	10,2	54,6	45,6	31,2
55	44	10	49,5	15,54	0,385	46,1	43,7	45,2	66,0	35,2	10,2	56,7	42,7	10,6
64	40	20	52,0	16,33	1,680	211,2	200,2	207,4	76,8	32,0	20,3	65,9	38,8	21,2
64	40	30	52,0	16,33	2,520	316,8	300,4	311,1	76,8	32,0	30,5	65,9	38,8	31,2
64	40	10	52,0	16,33	0,640	105,6	100,1	103,7	76,8	32,0	10,2	65,9	38,8	10,6
70	50	6	60,0	18,84	0,420	60,9	57,8	59,8	84,0	40,0	6,1	72,1	48,5	6,4
76	70	10	73,0	22,92	0,210	37,1	35,1	38,4	91,2	56,0	10,2	77,5	67,9	10,6
80	60	20	70,0	21,98	1,400	236,9	224,6	232,6	96,0	48,0	20,3	81,6	58,2	21,2
85	55	10	70,0	21,98	1,050	177,7	168,5	174,5	102,0	44,0	10,2	86,7	53,4	10,6
65	55	18	70,0	21,98	1,890	319,9	303,3	314,1	102,0	44,0	18,3	86,7	53,4	19,1
90	60	10	75,0	23,55	1,050	190,4	180,5	188,9	108,0	48,0	10,2	91,8	58,2	10,6
98	90	10	94,0	29,52	0,280	63,6	60,3	62,5	117,6	72,0	10,2	100,0	88,2	10,6
125	75	20	100	31,40	3,500	846,2	802,3	830,8	150,0	60,0	20,3	127,5	73,5	21,2
204	140	35	172	54,01	7,840	3260	3091	3201	244,8	112	35,5	207,1	137,0	36,0

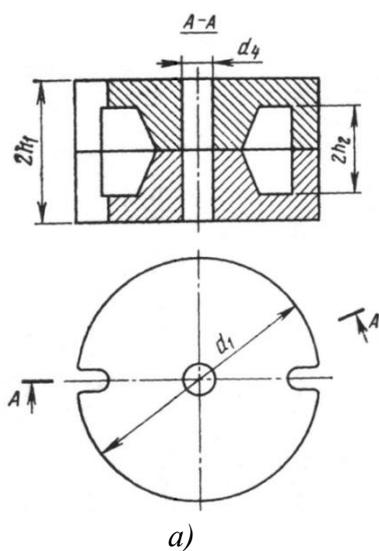


Рис.2.12. Сердечник броневой без подстроечника ряда Б

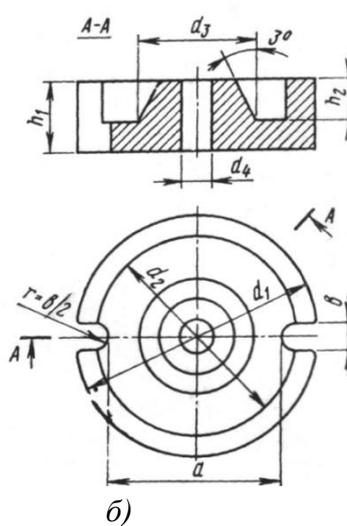


Рис.2.13. Чашка броневой сердечника ряда Б

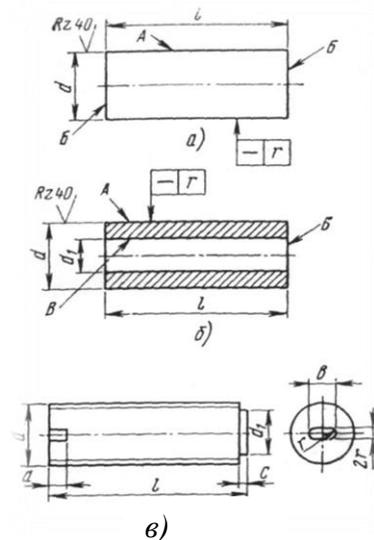


Рис.2.14. Сердечники подстроечные броневых сердечников Б: а- типа ПС; б- типа ПТ; в-типа ПР

Применяются сердечники типа Б в качестве магнитопроводов реакторов (дросселей), к которым предъявляются следующие требования: высокая добротность в заданной полосе частот; возможность регулировать индуктивность; обеспечение малого коэффициента нелинейных искажений, вносимых в схему; высокая устойчивость к механическим и климатическим воздействиям; отсутствие полей рассеяния; технологичность изготовления.

Основные данные магнитопроводов типа К из ферритов

Таблица 2.14

Типоразмер магнитопровода К D×d×b	$S_c, \text{см}^2$	$L_c, \text{см}$	$S_o, \text{см}^2$	масса G, грамм	$S_o S_c, \text{см}^2$
K4×2,5×2	0,015	1,02	0,049	0,06	0,0007
K5×2,0×1,5	0,0225	1,1	0,031	0,14	0,0007
K5×3×1,5	0,015	1,26	0,07	0,12	0,001
K7×4×1,5	0,0225	1,73	0,125	0,24	0,0028
K7×4×2	0,03	1,73	0,125	0,32	0,0038
K10×6×2	0,04	2,51	0,282	0,59	0,0112
K10×6×3	0,06	2,51	0,282	0,86	0,017
K10×6×4,5	0,09	2,51	0,282	1,3	0,025
K12×5×5,5	0,192	2,67	0,196	2,83	0,038
K12×8×3	0,06	3,14	0,502	1,12	0,03
K16×8×6	0,24	3,77	0,502	4,9	0,12
K16×10×4,5	0,135	4,08	0,785	3,1	0,106
K17,5×8,2×5	0,232	4,04	0,528	5,1	0,122
K20×10×5	0,25	4,71	0,785	6,4	0,196
K20×12×6	0,24	5,03	1,13	6,7	0,271
K28×16×9	0,54	6,91	2,01	20	1,085
K31×18,5×7	0,438	7,78	2,69	19	1,178
K32×16×8	0,64	7,54	2,01	26	1,286
K32×20×6	0,36	8,17	3,14	17	1,130
K32×20×9	0,54	8,17	3,14	25	1,696
K38×24×7	0,49	9,74	4,52	27	2,215
K40×25×7,5	0,562	10,2	4,91	32	2,759
K40×25×11	0,825	10,2	4,91	46	4,05
K45×28×8	0,68	11,47	6,15	43	4,182
K45×28×12	1,02	11,47	6,15	62	6,273

Конструктивные размеры чашек броневого сердечников из ферритов ряда Б. Таблица 2.15

Тип сердечника	Класс точности	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$	$d_4, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	$a, \text{мм}$	$b, \text{мм}$	$r_{1\text{max}}$	Множ-ль К
Б6	I	6,65 _{-0,3}	5 ^{+0,25}	2,8 _{-0,2}	1 ^{+0,2}	2,7 _{-0,12}	1,8 ^{+0,12}	4,3 _{-0,6}	1,2 ^{+0,3}	0,25	0,05
	I	6,65 _{-0,6}	5 ^{+0,5}	2,8 _{-0,3}	1 ^{+0,4}	2,7 _{-0,4}	1,8 ^{+0,4}				
Б9	I	9,3 _{-0,3}	7,5 ^{+0,25}	3,9 _{-0,2}	2 ^{+0,2}	2,7 _{-0,12}	1,8 ^{+0,12}	6,6 _{-0,6}	1,6 ^{+0,3}	0,25	0,05
	I	9,3 _{-0,6}	7,5 ^{+0,6}	3,9 _{-0,4}	2 ^{+0,4}	2,7 _{-0,4}	1,8 ^{+0,4}				
Б11	I	11,3 _{-0,4}	9 ^{+0,4}	4,7 _{-0,2}	2 ^{+0,2}	3,3 _{-0,16}	2,2 ^{+0,12}	7,5 _{-0,6}	1,8 ^{+0,3}	0,25	0,05
	I	11,3 _{-0,6}	9 ^{+0,6}	4,7 _{-0,5}	2 ^{+0,4}	3,3 _{-0,4}	2,2 ^{+0,4}				

Продолжение таблицы 2.15

4	I	14,3 _{-0,5}	11,6 ^{+0,4}	6 _{-0,2}	3 ^{+0,2}	4,25 _{-0,16}	2,8 ^{+0,12}	9,8 _{-0,6}	2,5 ^{+0,6}	0,25	0,05
	I	14,3 _{-0,8}	11,6 ^{+0,8}	6 _{-0,6}	3 ^{+0,4}	4,25 _{-0,4}	2,8 ^{+0,4}				
Б18	I	18,4 _{-0,8}	14,9 ^{+0,5}	7,6 _{-0,3}	3 ^{+0,2}	5,35 _{-0,16}	3,6 ^{+0,16}	12,5 _{-0,6}	2,8 ^{+0,6}	0,25	0,1
	I	18,4 ₋₁	14,9 ⁺¹	7,6 _{-0,6}	3 ^{+0,4}	5,35 _{-0,4}	3,6 ^{+0,4}				
Б22	I	22 _{-0,8}	17,9 ^{+0,6}	9,4 _{-0,3}	4,4 ^{+0,3}	6,8 _{-0,2}	4,6 ^{+0,16}	15 _{-0,6}	3 ^{+0,6}	0,35	0,1
	I	22 ₋₁	17,9 ⁺¹	9,4 _{-0,6}	4,4 ^{+0,5}	6,8 _{-0,4}	4,6 ^{+0,6}				
Б26	I	26 ₋₁	21,2 ^{+0,8}	11,5 _{-0,4}	5,4 ^{+0,3}	8,15 _{-0,2}	5,5 ^{+0,16}	18 _{-0,6}	3 ^{+0,6}	0,35	0,1
	I	26 _{-1,4}	21,2 ⁺¹	11,5 _{-0,8}	5,4 ^{+0,6}	8,15 _{-0,4}	5,5 ^{+0,6}				
Б30	I	30,5 ₋₁	25 ^{+0,8}	12,6 _{-0,6}	5,3 ^{+0,4}	9,5 _{-0,2}	6,5 ^{+0,16}	21 _{-0,6}	3,5 ^{+0,6}	0,35	0,1
	I	31,2 _{-2,4}	24,6 ^{+1,6}	12,8 ₋₁	5,2 ^{+0,6}	9,5 _{-0,4}	6,5 ^{+0,6}				
Б36	I	36,2 _{-1,2}	29,9 ⁺¹	16,2 _{-0,6}	5,4 ^{+0,3}	11 _{-0,24}	7,3 ^{+0,2}	26 _{-0,6}	4 ^{+0,6}	0,35	0,1
	I	36,2 _{-1,8}	29,9 ^{+1,6}	16,2 _{-0,8}	5,4 ^{+0,6}	11 _{-0,6}	7,3 ^{+0,8}				
Б42	I	43,1 _{-1,4}	35,6 ^{+1,4}	17,7 _{-0,6}	5,4 ^{+0,3}	14,95 _{0,24}	10,15 ^{+0,24}	30 _{-0,6}	4 ^{+0,6}	0,4	0,1
	I	43,1 _{-1,8}	35,6 ^{+1,8}	17,7 ₋₁	5,4 ^{+0,6}	14,95 _{-0,6}	10,15 ^{+0,8}				
Б48	I	48,7 _{-1,4}	39,5 ^{+1,4}	20,4 _{-0,8}	7,3 ^{+0,4}	15,9 _{-0,24}	10,3 ^{+0,24}	4 _{-0,6}	4 ^{+0,6}	0,4	0,1
	I	48,7 _{-1,8}	39,5 ^{+1,8}	20,4 ₋₁	7,3 ^{+0,8}	15,9 _{-0,6}	10,3 ^{+0,8}				

Каркасная катушка с внутренним диаметром d_3 , внешним d_2 и высотой $2h$ помещается между чашками. Подстроечным сердечником регулируется индуктивность дросселя. Преимущество броневых сердечников ряда Б – хорошее охлаждение, что важно при повышенных магнитных потерях на высоких частотах 20 кГц и выше при токах не более 5 А [6].

Геометрические параметры броневых сердечников из феррита.

Таблица 2.16

Тип сердечника	Внешний объем сердечника V_B , см ³	Объем внутреннего свободного пространства сердечника $V_{B.C.}$, см ³	Объем материала сердечника V_M , см ³	Эффективная длина пути магнитной линии L_C , см	Эффективная площадь поперечного сечения $A_{эф}$, см ²	Эффективный объем $V_{эф}$, см ³
Б6	0,19	0,05	0,12	1,04	0,07	0,073
Б9	0,42	0,12	0,21	1,26	0,11	0,139
Б11	0,66	0,2	0,4	1,54	0,18	0,277
Б14	1,46	0,38	0,84	1,89	0,28	0,529
Б18	2,85	0,93	1,71	2,49	0,48	1,195
Б22	5,17	1,68	3,06	3,04	0,69	2,1
Б26	8,65	2,74	5,22	3,6	1,01	3,64
Б30	13,89	4,52	8,43	4,41	1,46	6,44
Б36	22,64	7,24	14,77	5,4	2,2	11,9
Б42	43,62	15,2	26,44	6,17	2,48	15,3
Б48	52,29	18,5	32,09	6,92	3,74	25,88

2.3. Материал обмоток ФМЭ

Для изготовления обмоток применяются медные и алюминиевые обмоточные провода. Удельная масса и удельное сопротивление равны: для меди $\gamma_{Cu} = 8,9 \text{ г/см}^3$, $\rho_{Cu} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ при температуре 20°C ; для алюминия- $\gamma_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^3$, $\rho_{Al} = 0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$. Обмоточные провода изготавливают круглого или прямоугольного сечения (шина), покрытые изоляцией, предохраняющей расположенные рядом витки обмотки от замыкания.

По виду изоляции обмоточные провода делятся на 3 группы: 1 - с эмалевой изоляцией; 2 - с органической волокнистой, плёночной или бумажной изоляцией; 3 - с комбинированной изоляцией (см. табл. П.8 и П.13).

Для изготовления обмоток ФМЭ широко применяются провода с эмалевой изоляцией, толщина которой в зависимости от диаметра провода колеблется в пределах 0,05-0,4мм. Все виды эмалевых покрытий обмоточных проводов стойки к воздействию лаков, применяемых для пропитки обмоток после изготовления ФМЭ.

Классы нагревостойкости.

Таблица 2.17

Класс	Рабочая температура ($^\circ\text{C}$)	Виды материалов
У	90	Органические волокнистые непропитанные материалы (бумага, картон, фибра, древесина, ПВХ, резина)
А	105	То же, что и У, но пропитанные лаками
Е	120	Синтетические плёнки (фторопластовые, эпоксидные, полиэфирные, лакоткани, поликарбонатные плёнки и др.)
В	130	Материалы на основе слюды, асбеста, стекловолокна с органическими связующими (стеклоткани, стеклотекстолиты, изоляция эмальпроводов на лаках, миканиты)
F	155	То же, но с синтетическими связующими на основе смол и лаков (кремнийорганических, полиуретановых, эпоксидных и др.)
Н	180	То же, но с кремнийорганическими связующими (лаки и смолы, изоляция эмальпроводов на полиэфирных лаках)
С	>180	Слюда, керамика, кварц без связующих, стекло (изоляция эмальпроводов на полиимидных смолах и лаках)

Класс нагревостойкости межобмоточной изоляции и изолированных проводов определяет способность надёжной работы ФМЭ при соответствующей рабочей температуре τ_p в течение 20тыс. часов и более [1]-табл.2.17. Для межслоевой изоляции, кроме кабельной и конденсаторной бумаги, используются: плёночные материалы-полистирольные, лавсановые (нагревостойкость до $120-130^\circ\text{C}$), териленовые, фторопластовые (нагревостойкость до 200°C , морозостойкость- ($-100-120^\circ\text{C}$), полиэтиленовые ($+55\div 65^\circ\text{C}$),

Полиакрилатные типа ПАР при $\tau_p \leq 150^\circ\text{C}$, полиамидные типа ПАМ (τ_p до 90°C), полихлорвиниловые ($\tau_p \leq 60\dots 75^\circ\text{C}$ и $-20\dots 35^\circ\text{C}$), полиимидные типа ПАМ ($\tau_p \leq 250^\circ\text{C}$). Перегрев на каждые $8\text{-}12^\circ\text{C}$ снижает приблизительно в 2 раза срок службы изоляции и наоборот. Класс проводов по нагреву дан в табл.2.18.

Обмоточные провода

Для намотки обмоток ФМЭ чаще применяют круглые провода с эмалевой изоляцией (эмальпровода), реже с волокнистой или эмалево-волокнистой. Сортамент проводов приведён в приложении П1, П2, а свойства проводов в таблице П.1.3. До температуры 105°C применяют провода типа ПЭЛ с обычной лакостойкой эмалевой изоляцией, имеющей низкую механическую прочность изолирующего слоя [3].

Провода и их свойства.

Таблица 2.18

Вид	Марка	Класс по нагреву	Диаметр или размеры сторон, мм	U_{np} , кВ
Эмальпровода (ЭМ)	ПЭЛ	А	0,03-2,44	0,3-1,2
	ПЭВ-1,2 (ПЭМ)	Е	0,06-2,44	0,4-2
	ПЭВ	Е	0,02-0,05	0,1-0,2
	ПЭВП	Е	0,5-4,4	0,2
	ПЭВА, ПЭЛРА	Е	0,08-2,44	0,5-2
	ПЭВТЛ-1,2	В	0,06-1,56	0,4-2
	ПЭТВ	В	0,06-2,44	0,5-2
ЭМ-волокнистые	ПЭЛШО	А	0,05-1,56	0,3-0,9
	ЛЭШО, ЛЭЛО, ЛЭШД, ЛЭЛД, ЛЭТЛО	А	$0,05 \times 10 - 0,07 \times 630 - 0,2 \times 49$	-
	ПЭТКСО	Н	0,38-1,56	0,5
Волокнистые	ПСД и ПСДК	Ф и Н	0,31-4,8	0,5
	ПСДКТ	С	0,31-1,56	0,5
	ПНСДК (КТ)	С	0,31-1,56	0,5

Примечания: 1. U_{np} (пробивное)-дано по мере роста размеров. 2. Провода ПЭВП – прямоугольного сечения (провода остальных марок - круглого); ПЭВА, ПЭЛРА – алюминиевые (остальные медные); ЛЭШО, ЛЭЛО, ЛЭШД, ЛЭЛД – расщеплённые провода типа литцендрат.3. Провода ПЭВТЛ лудятся без зачистки эмали.

В основном, для намотки катушек ФМЭ применяют провода типа ПЭВ-1 и ПЭВ-2 (τ_p до 120°C) с одинарным или двойным покрытием высокопрочной эмалью типа винифлекс или металвин (провода марки ПЭМ). ПЭМ отличаются от ПЭВ лучшим качеством. Необходимо заметить, что сечение одного проводника не должно превышать величину [2] $S_{np} \cong 14/f_{\text{сети}} \text{ (мм}^2\text{)}$.

При температурах до $+130^{\circ}\text{C}$ и в условиях высокой влажности применяются теплостойкие провода ПЭТВ с покрытием полиэфирным лаком. Применяются также высокопрочные, теплостойкие, лудящиеся эмальпровода на полиуретановых лаках марки ПЭВТЛ класса изоляции Е (допускают кратковременный нагрев до 150°C). Этот провод обладает способностью покрываться слоем олова без зачистки эмали и применения флюсов. Для более высоких температур применяют провода со стекловолокнистой изоляцией марок ПСД (с двумя слоями изоляции) и ПСДК дополнительно пропитанные кремнийорганическими лаками. Первый выдерживает температуру до 200°C , а второй – до 350°C в течение 250-600 часов. Алюминиевые провода на полиэфирных лаках имеют нагревостойкость по классу F. Эти провода сложно паять.

Провода с комбинированной изоляцией, предназначенные для работы до $+105^{\circ}\text{C}$ марок ПЭЛШО, ПЭЛШКО изолированы лакостойкой эмалью и одним слоем шелковой или капроновой пряжи. Волокнистая изоляция защищает лаковую. Самой прочной является лавсановая оплётка. Пробивное напряжение ПЭЛШО $U_{\text{пр}} = 0,3 \dots 0,9 \text{ кВ}$ [1].

Из специальных проводов для борьбы с заметными проявлениями поверхностного эффекта при повышенной и высокой частоте применяют расщеплённые провода типа литцендрат марок ЛЭШО, ЛЭТЛО, ЛЭШД, ЛЭЛО, ЛЭЛД и др. Например, провод ЛЭТЛО выпускается диаметром 0,2-1,3 мм с лаковой изоляцией повышенной нагревостойкости и одним слоем лавсанового волокна.

Для работы при температуре до $+200^{\circ}\text{C}$ провода марок ПЭТКСО и ПЭТКСОТ изолированы слоем кремнийорганического лака и одним слоем стекловолокна, пропитанного тем же лаком.

Кроме обмоточных проводов для обмоток применяют медную и алюминиевую фольгу. Медная фольга перспективна для уменьшения объёма трансформаторов и дросселей с проводами больших сечений. Алюминиевая фольга толщиной 30-200 мкм изолирована тонкой (2...4 мкм) оксидной плёнкой, выдерживает напряжение до 100 В и более, но гигроскопична и недостаточно эластична. Стоимость ФМЭ с фольговыми алюминиевыми обмотками довольно высока из-за сложной технологии.

2.4. Конструкция обмоток ФМЭ

Обмотки ФМЭ должны быть достаточно хорошо изолированы между собой и от магнитопровода. Изоляция обмотки БТ и СТ осуществляется при помощи каркасов или гильз. Сборные каркасы изготавливаются из гетинакса или текстолита. Часто используются склеенные из прессшпана (электротехнического картона ЭВ) каркасы, отличающиеся от гильз наличием боковых щёчек, защищающих торцевые части обмоток от механических повреждений. Бескарка-

ные обмотки наматывают на основание – гильзу, изготовленную из прессшпана-см. рис.2.17.

Помимо каркаса катушки ФМЭ содержат также межслоевую, междуобмоточную и внешнюю изоляцию. Для изоляции отдельных слоёв каждой обмотки друг от друга укладывают межслоевую изоляцию. Она необходима для ровной укладки обмоточного провода, а в высоковольтных ФМЭ – для снижения разности потенциалов между соседними слоями. В многообмоточных ТММ применяется также междуобмоточная изоляция для обеспечения между ними необходимой изоляции. Для защиты от внешних повреждений служит внешняя изоляция, предохраняющая обмотку от пробоя на корпус или на соседние детали. Указанные виды изоляции изготавливают из различных сортов изоляционной бумаги: кабельной, телефонной, конденсаторной, из плёнок, тканей, твёрдых диэлектриков, некоторые из которых приведены в таблице 2.19 [1].

В качестве изоляции используют материалы толщиной в сотые доли мм;

Некоторые данные электроизоляционных материалов

Таблица 2.19

Вид	Марка	Класс по нагреву	$U_{nn}, кВ / мм$	Толщина или назначение материала, мкм
Бумага	Кабельная К	А*	20	80, 120, 170
	Телефон. КТН	А*	30	40, 50
	Конденс. КОН II	А*	50	5, 6, 7, 8, 10, 12
	Намоточн. ЭН	А-В**	8	50, 70
	Пропит. ЭИП	А-В**	5	90, 110, 130
	Микалентная	А-В**	-	20
	Картон ЭВ	А*	11	0,2-3 мм
Плётка	ПЭТФ (лавсан)	F	140	4-25
	Ф4 (фторопласт)	С**	100	5-40
Ткань	Стеклоткань	Н, С**, F	4	60-100
	Лакоткань ЛХЧ	А	20	0,17; 0,2; 0,24 мм
	Лакоткань ЛШС	А	40	40-150
	Стеклолакоткань	А	>20	0,11-0,24 мм
Твёрдый	Гетинакс	А, Е	25	0,2 мм и выше
	Стеклотекстолит	В	10	0,2 мм и выше

Примечание: звёздочкой отмечены классы материалов по нагреву с пропиткой лаками.

толщина зависит от диаметра проводов. Изоляцию выбирают по рабочей температуре. Пропитка катушек лаками цементирует катушки, вытесняет воздух из катушки, повышает класс нагревостойкости изоляции.

Различают два вида обмоток ФМЭ: цилиндрические (состоящие из одного или нескольких слоёв) и дисковые (в виде галет), расположенные на сердечнике друг за другом (первичная- вторичная и т.д.) и разделённые изоляционными прокладками.

Такое размещение обмоток, затем соединённых последовательно, уменьшает индуктивность рассеяния, улучшает симметрирование обмоток в двухполупериодных трансформаторах и снижает поверхностный эффект в проводах. В кольцевых магнитопроводах равномерно намотанные обмотки образуют один слой на наружной стороне сердечника и два слоя на внутреннем диаметре, что приводит к снижению индуктивности рассеяния.

Для изготовления обмоток используют изолированные обмоточные провода с эмалевой изоляцией (для напряжений до 500В). При более высоких напряжениях применяют провода с комбинированной изоляцией (лако-шёлковая оплётка и др.) марки ПЭШО, ПЭЛШО, ПЭЛБО, ПБД и другие. После пропитки и сушки пробивное напряжение проводов возрастает по величине. При работе ФМЭ на повышенных частотах применяют провода ПЭШО, ПЭЛШО и литцендрат марок ЛЭШО, ЛЭШД, ЛЭЛО, ЛЭТЛО и другие по ГОСТ 16186-74, представляющий собой пучок тонких изолированных лаком проводов. Например, провод ЛЭТЛО сечением: $1,6\text{мм}^2$ может быть выполнен проводом диаметром 0,23мм-40 шт. или диаметром 0,5мм-8шт. Чем выше частота, тем диаметр провода меньше. Эквивалентное сечение провода состоит из небольшого количества проводников, которое может быть больше сотни. Пучок проводов скручен и по поверхности изолирован.

При использовании литцендрата (пучка проводов малого диаметра) можно существенно повысить плотность тока $j(\text{А/мм}^2)$ и снизить коэффициент добавочных потерь до $K_{доб} \leq 2$. Обмотки толщиной $C_{к1}$ и $C_{к2}$ размещают на среднем стержне магнитопровода одна поверх другой с зазором между катушками C_{12} .

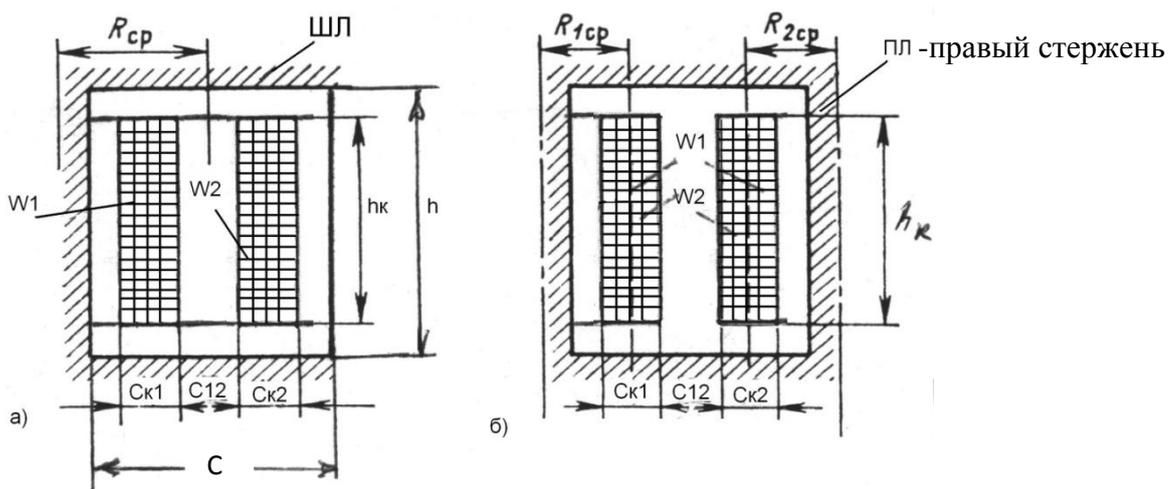


Рис. 2.15. Расположение обмоток: а- коаксиальное; б – на разных стержнях

При расположении обмоток w_1 и w_2 на разных стержнях магнитопровода типа ПЛ средняя длина витков $L_{об}$ обмотки будет меньше, чем при коаксиальной намотке. Зная толщину изоляционного материала (гетинакса, прессшпана,

текстолита и др), из которого изготавливается каркас катушки, можно определить осевую длину каркаса. Обычно длину каркаса берут на 1-3мм короче высоты окна сердечника. При намотке на каркасе допустимая высота каждой обмотки будет
$$h_k = h - 2\delta_{щ} - (1 - 3), \quad (2.1)$$

где $\delta_{щ}$ - толщина щётки каркаса, которая выбирается в зависимости от диаметра провода. Обычно она берётся от 1 до 3мм (см. рис.2.15 и 2.17).

Затем определяется число витков в 1-м слое (ряду) каждой обмотки

$$w_c = h_k / (k_y d_{из}), \quad (2.2)$$

где $d_{из}$ - диаметр провода с изоляцией (мм); K_Y , K_B – коэффициенты укладки и выпучивания провода, определяемые по таблице 2.20. Плотную намотку катушки выполнить особенно трудно у больших сечений проводов.

Коэффициенты укладки и выпучивания обмоток

Таблица 2.20

$d_{из} (мм)$	0,07-0,12	0,13-0,19	0,2-0,3	0,31-0,8	0,8-1,0	Свыше 1,0
K_Y	1,15	1,10	1,07	1,05	1,1	1,15
K_B	1,05	1,08	1,10	1,12	1,5	1,15

В таблице 2.20 K_B - коэффициент выпучивания, который учитывается при расчёте толщины катушки C_K путём умножения на K_B . На практике можно пользоваться тем, что высота второго и последующих слоёв на один виток меньше, чем в первом слое. Он является переходным из первого слоя во второй. Зная число витков в одном слое, находим число слоёв каждой обмотки

$$N_c = w / w_c \quad (2.3)$$

Для БТ число витков w – на каркасе полное, в СТ – на каждом каркасе половинное число витков каждой обмотки.

Важно знать среднюю длину витка обмотки $l_{об}$ [3].

$$L_{об1} = 2[a + b + \pi \cdot r_1] \cdot 10^{-3}, \quad (2.4)$$

здесь $r_1 = C_{к1} / 2$

$$L_{об2} = 2[a + b + \pi \cdot r_2] \cdot 10^{-3}, \quad (2.5)$$

где $r_1 = C_{к1} + C_{12} + C_{к2} / 2$; $C_{к1}$, $C_{к2}$, C_{12} - толщина катушек 1 и 2 и расстояние (зазор) между катушками; r_1 , r_2 - радиус средней длины, замеренный от угла магнитопровода.

Толщина катушки находится по числу слоёв плюс толщина изоляции между слоями и поверх катушки [3].Тороидальные трансформаторы имеют существенно сложнее конструкцию обмоток, чем СТ или БТ, что является особенностью их расчёта. У ТТ нет немагнитного зазора.

На рисунке 2.16 показан разрез двухобмоточного ТТ.

Для защиты от механических повреждений при намотке обмотки кольцевой пермаллоевый сердечник помещают в пластмассовый или из любого немагнитного материала контейнер высотой на 1,5-2 мм больше размера b магнитопровода и прикрывают пластмассовым кольцом с выступом, входящим во внутренний диаметр контейнера.

Тороидальные магнитопроводы из ЭТС также помещают в контейнеры для защиты обмоточных проводов от повреждения.

Видно, что обмотки ТТ имеют трапецеидальную форму. Это вызвано тем, что при намотке внутреннего диаметра плотно на наружном диаметре между витками остаётся зазор, в который укладывается второй ряд слоя обмотки, то есть на внутреннем диаметре d сердечника будет уже два слоя, а на наружном D – один. Намотка обмоток часто ведётся вручную, т.к. шпулочные станки далеки от совершенства. Витки обмоток необходимо накладывать вертикально размеру b -(рис.2.16), что обеспечивает минимальные значения фронтов импульсов.

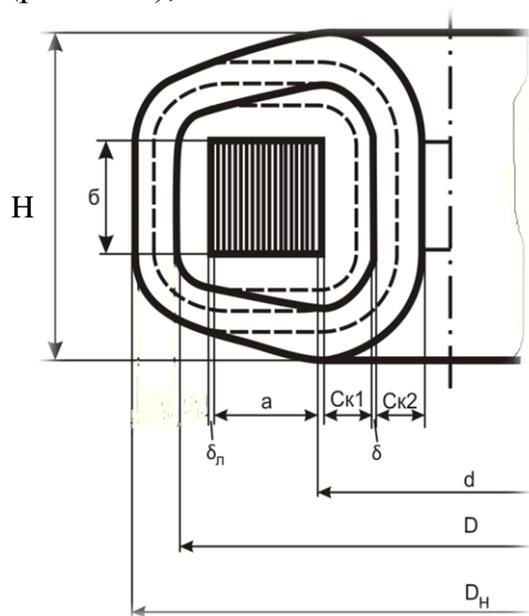


Рис.2.16. К определению средней длины витка ТТ.

Среднюю длину витка определяют как полусумму длин нижнего и верхнего витков [3], один из которых удалён от сердечника на расстояние толщины изоляции (контейнера) плюс толщина катушки наружная, а второй – на толщину изоляции плюс толщину внутренней катушки. Поскольку провод подвергается значительно большим механическим воздействиям, то рекомендуется применять провода марки ПЭЛШО или ПЭВ-2. Остаточный диаметр после намотки $d_{ocm.min}$ определяется материалом сердечника и его внутренним диаметром d – рис 1.1. Для магнитопроводов из ЭТС $d = 10-64$ мм $d_{ocm.min} = 5-20$ мм; для сердечников из сплавов с $d = 12-40$ мм, $d_{ocm.min} = 6-15$ мм.

Следовательно, расчетное значение остаточного диаметра, необходимо для намотки и крепления на основе ТТ не должно быть меньше $d_{ocm.min}$. При намотке тороидального трансформатора на специальных намоточных станках $d_{ocm.min}$ может быть меньше указанных.

В таблице 2.21 приведены ориентировочные значения индукции и плотности тока в обмотках для трансформаторов, выполненных на сердечниках холоднокатаной текстурированной стали типа 3421-3425 для частоты $f = 400$ Гц.

Зависимость параметров трансформатора от его мощности.

Таблица 2.21

Параметры	Мощность трансформатора, (Вт)			
	15-50	50-150	150-300	300-1000
B (Тл)	1,7	1,7-1,35	1,35-1,15	1,15-1,1
η	0,82-0,93	0,93-0,96	0,96-0,97	0,98
j (А/мм ²)	7-4,5	4,5-3,0	3,0-2,5	2,5-2,0

При частотах 20...25 кГц применение ТТ из ЭТС становится проблематичным из-за перегрева магнитопровода собственными потерями мощности на вихревые токи и гистерезис.

В целом расчёт ТТ практически не отличается от расчёта броневых и стержневых трансформаторов. Для ФМЭ повышенных (свыше 2 кГц) и высоких частот расчёты приводятся в главах 3...6.

Пример 2.1. Расчет сглаживающего дросселя

Рассчитать сглаживающий дроссель фильтра с броневым ленточным магнитопроводом из стали 3411 с толщиной пластины $\delta=0,35$ мм. Индуктивность дросселя $L=3$ Гн, ток подмагничивания $I_0=0,5$ А, рабочий потенциал обмотки дросселя $U_0=310$ В. Конструкция дросселя подобна ТММ (рис.2.17), но между верхней и нижней половинками магнитопровода введен немагнитный зазор.

Решение:

1. Определяем величину электромагнитной энергии $LI^2=3\cdot0,5^2=0,187$ Дж.
2. По кривой рис 1.3 находим объём сердечника $V_{ca}=50$ см³.
3. Из таблицы П.1-П.5 предварительно выбираем сердечник ШЛ 20x20-50 с $V_c=59,9$ см³.
4. По (1.30) находим $M=LI^2/V_{ca}=0,187/59,9=3,12\cdot10^{-3}$.
5. По кривым рис. 1.2 находим $\mu_{эф} = 125$, $\delta\% = 1,43\%$.
6. По данным плотности тока для ширины $a=20$ мм находим $j=3,15$ А/мм².
7. По уравнению (1.28) с учётом (1.27) находим ширину стержня a

$$a = \sqrt[5]{\frac{11}{[(1-2)\cdot2,5]^2} \cdot \frac{0,187\cdot10^4}{1,256\cdot125(3,15\cdot0,35)^2\cdot0,91}} = 1,57 - 1,8 \text{ см,}$$

где $K_1=1...2$, $K_2=2,5$, $K_3=11...22$, $k_{OK}=0,35$, $k_{ЗС}=0,91$.

Выбираем ленту шириной $a=20$ мм. Магнитопровод ШЛ 20x20-50 с объёмом $V_c=59,9$ см³; его масса $G_a=460$ г, $l_c=17,1$ см, активное сечение $S_{ca}=3,5$ см².

8. По формуле $\delta_{онт}=\delta\%\cdot l_c/100$ находим $\delta_{онт}=\frac{1,43}{100}\cdot 17,1 = 0,24$.

9. Толщина магнитной прокладки $\Delta z=\frac{1}{2}\delta_{онт} = 0,12$ см.

10. Число витков дросселя находим по (1.24)

$$w = 10^4 \sqrt{\frac{3\cdot17,1}{1,256\cdot125\cdot3,5}} = 3055 \text{ вит.}$$

11. Определяем сечение провода $S_{пр}=I_0/j=0,5/3,15=0,159$ мм².

12. По табл. П.12 выбираем провод ПЭВ-2 диаметром $d_{пр}=0,44$ мм, сечением $S_{пр}=0,152$ мм².

13. Рассчитываем сопротивление провода по формуле при $t_p=105^0$ С

$$r_{др} = \rho \frac{L_{об}\cdot W}{S_{пр}} = 0,0235 \frac{0,09\cdot3055}{0,152} = 42,5 \text{ ом,}$$

где $l_{об}$ – средняя длина витка обмотки (см).

14. Определяем падение напряжения на дросселе $\Delta U_{dp} = r_{dp} \cdot I_0 = 42,5 \cdot 0,5 = 21,25 \text{ В}$.

Пример 2.2. Расчет трансформатора малой мощности

Рассчитать силовой трансформатор для следующих исходных данных: сеть напряжением $U_1 = 220 \text{ В}$, 400 Гц , напряжения и токи вторичных обмоток- $U_2 = 27 \text{ В}$, $I_2 = 3 \text{ А}$; $U_3 = 15 \text{ В}$, $I_3 = 2 \text{ А}$ - рис.2.17.

Конструкция ТММ на магнитопроводе типа ШЛ показана на рис.2.17. Для решения примера следует использовать материал раздела 2. Габаритная мощность трансформатора согласно (1.6) $P_{\Gamma} = 27 \cdot 3 + 15 \cdot 2 = 111 \text{ ВА}$.

1. По таблицам 1.6 и 1.7 для $P_{\Gamma} = 115 \text{ ВА}$ и частоты 400 Гц выбираем холоднокатанную сталь марки 3422 с толщиной ленты $0,01 \text{ мм}$. Принимаем для трансформатора $P_{\Gamma} = 100\text{-}150 \text{ ВА}$ индукцию $B = 1,5 \text{ Тл}$, плотность тока $j = 3,6 \text{ А/мм}^2$, КПД $\eta = 0,91$, $k_{OK} = 0,31$, $\cos \varphi = 0,88$, $\Delta U_1 = 3\%$, $\Delta U_2 = 3,5\%$, $k_{3C} = 0,9$ -табл.2.12.

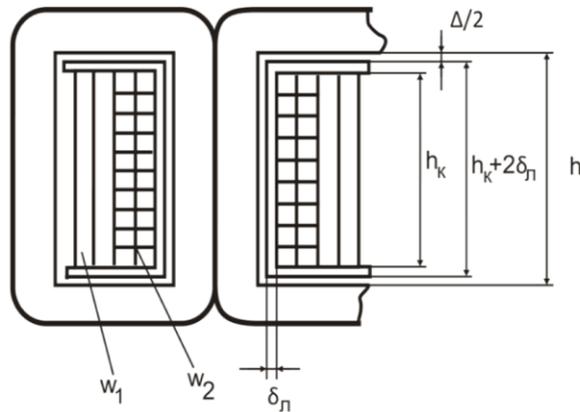


Рис.2.17. Двухобмоточный ТММ на штампованном каркасе

Решение

2. По (1.13) определяем ток первичной обмотки

$$I_1 = 10^2 P_{\Gamma} / (U_1 \cos \varphi \eta) = 11100 / (220 \cdot 0,88 \cdot 0,91) = 0,63 \text{ А}$$

3. По уравнению (1.14) находим произведение

$$\begin{aligned} S_o \cdot S_c &= 100 P_{\Gamma} / [1,11 (1 + 1/\eta) f B j k_{OK} k_{3C}] = \\ &= 11100 / [1,11 (1 + 1/0,91) 400 \cdot 1,5 \cdot 3,6 \cdot 0,32 \cdot 0,9] = 8,46 \text{ см}^4. \end{aligned}$$

По приложению П.3 выбираем броневой магнитопровод ШЛ 12x20x30, где $a = 12 \text{ мм}$, $b = 20 \text{ мм}$, $h = 30 \text{ мм}$, $c = 12 \text{ мм}$, $S_c = 2,1 \text{ см}^2$, $L_c = 10,2 \text{ см}$, $V = 21,4 \text{ см}^3$, масса $G = 165 \text{ г}$, параметры $S_c \cdot S_{OK} = 8,7 \text{ см}^4$, $x = 1$, $y = 1,6$, $z = 2,5$.

По формуле (1.8) уточняем ширину стержня $a = \sqrt[4]{\frac{8,78}{1,6 \cdot 2,5 \cdot 1}} = 12,1 \text{ мм}$.

4. Число витков обмоток трансформатора определяем согласно (1.15) и (1.16):

$$W_1 = U_1 \cdot (1 - \Delta U_1 / 100) \cdot 10^4 / (4 \cdot K_\phi \cdot f \cdot B \cdot S_c) = \\ = 220(1 - 0,03)10^4 / (4,44 \cdot 400 \cdot 1,5 \cdot 2,1) = 382_{\text{вит.}}$$

$$W_2 = U_2 (1 + \Delta U_2 / 100) \cdot 10^4 / (4K_\phi f B S_c) = 27(1 + 0,35) 10^4 / (4,44 \cdot 400 \cdot 1,5 \cdot 2,1) = 50_{\text{вит}}$$

$$W_3 = U_3 (1 + \Delta U_2 / 100) 10^4 / (4K_\phi f B S_c) = 15 \cdot 1,035 \cdot 1000 / 5594,4 = 28_{\text{вит.}}$$

где $K_\phi = 1,11$ - коэффициент формы для синусоиды; для прямоугольной формы - $K_\phi = 1,0$.

5. По уравнению (1.17) определяем сечение проводов обмоток $S_{\text{пр}} = I / j$:

$$S_{\text{пр}1} = 0,63 / 3,6 = 0,175 \text{ мм}^2, S_{\text{пр}2} = 3 / 3,6 = 0,83 \text{ мм}^2, S_{\text{пр}3} = 2 / 3,6 = 0,56 \text{ мм}^2.$$

По приложению П.12 выбираем стандартные провода марки ПЭВ-2 сечением:

$$S_{\text{пр}1} = 0,177 \text{ мм}^2, \text{ диаметром } d_1 = 0,175 \text{ мм, с изоляцией } d_{1\text{из}} = 0,2 \text{ мм}^2;$$

$$S_{\text{пр}2} = 0,88 \text{ мм}^2, \text{ диаметром } d_2 = 1,06 \text{ мм, с изоляцией } d_{2\text{из}} = 1,16 \text{ мм};$$

$$S_{\text{пр}3} = 0,56 \text{ мм}^2, \text{ диаметром } d_3 = 0,83 \text{ мм, с изоляцией } d_{3\text{из}} = 0,94 \text{ мм.}$$

6. Фактические плотности тока в проводах обмоток:

$$J_1 = 0,63 / 0,177 = 3,56 \text{ А/мм}^2, J_2 = 3 / 0,88 = 3,41 \text{ А/мм}^2, J_3 = 2 / 0,576 = 3,53 \text{ А/мм}^2.$$

7. В зависимости от сечения провода и его сортамента (круглый или прямоугольный) обмотки могут быть размещены на гильзе из электрокартона или на штампованном каркасе с высотой катушки $h_k = h - 2\delta_{\text{л}} - \Delta$ - уравнение (2.1), либо изготовленном из прессшпана, гетинакса, текстолита, стеклотекстолита, толщиной листа $\delta_{\text{л}} = 1 \dots 3 \text{ мм}$. Кроме того, каркас должен свободно надеваться на стержень и быть меньше высоты окна магнитопровода на величину $\Delta = 1 \dots 3 \text{ мм}$.

Обычно для серийных ТММ (таблицы П.1-П.4) имеются штампованные каркасы катушек.

8. Определяется возможность размещения обмоток на каркасе. Для этого рассчитывается витков обмотки в слое W_c и число слоев N обмотки по формулам (2.2) и (2.3):

$$W_c = h_k / (d_{\text{из}} \cdot K_y) = h - 2\delta - \Delta / (K_y \cdot d_{\text{из}}), \\ N = W / W_c;$$

Число витков в слое и число слоев в обмотках W_1, W_2, W_3
(при толщине $\delta = 1 \text{ мм}$)

$$W_{c1} = 30 - 2 - 1 / (1,08 \cdot 0,2) = 125 \text{ вит.};$$

$$W_{c2} = 27 / (1,08 \cdot 1,06) = 24 \text{ вит.};$$

$$N_1 = 382 / 125 = 3,06 \text{ ряда};$$

$$N_2 = 50 / 24 = 2,08 \text{ ряда};$$

$$W_{c3}=27/(1,08 \cdot 0,94)= 27 \text{ вит.};$$

$$N_3=28 / 25 =1,12 \text{ ряда,}$$

где $K_y=1,05-1,15$ - коэффициент укладки по табл.2.20 [4].

Принимаем $N_1=3$, $N_2=3$, $N_3=1$.

9. Неполный ряд обмотки может быть заполнен следующей обмоткой через межслоевую изоляцию толщиной 0,04...0,5 мм (конденсаторная бумага, лакоткани, фторопласт,полипропилен, капрон и др.) –табл. 2.19 или по П.13. Принимаем для межслоевой (2 ряда) и межобмоточной изоляции (3 ряда) шелковую лакоткань (0,04...0,16 мм) толщиной $\delta =0,1$ мм.

Общее число рядов изоляции с учетом межобмоточной изоляции $N_{об}=14+9=23$. Толщина изоляции будет $\delta_{из}=\delta \cdot N_{об} =0,1 \cdot 23=2,3$ мм.

10. Толщина катушки C_k без учета толщины изоляции

$$C_k =K_b (d_{1из} N_1+d_{2из} N_2 +d_{3из} N_3)=1,1(0,2 \cdot 3+1,06 \cdot 3+0,94 \cdot 1) = 5,19 \text{ мм,}$$

где $K_b=1,05...1,15$ – коэффициент выпучивания-табл.2.19 [4].

Полная ширина катушки $C_{к.п} = C_k + \delta_{из} =5,19+2,3=7,49$ мм.

При плотной рядовой намотке допускается $k_{ок} \leq 0,4$.

Реальный коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом

$$k_{ок} = S_{пр} / S_{ок} =(0,177 \cdot 382+0,88 \cdot 50 +0,567 \cdot 28)/(12 \cdot 30)= 0,354 < 0,37.$$

При рядовой намотке допускается $k_{ок} \leq 0,4$ – см. табл. 1.6.

Следовательно, все обмотки разместятся в окне магнитопровода.

Более подробно расчет ТММ, в том числе и тепловой, приведен в [3].

Глава 3. Особенности ФМЭ и их характеристики при повышенных и высоких частотах

При разработке ТММ с минимальными показателями особое значение приобретает уменьшение массы и габаритов. На эти показатели различные факторы влияют по-разному:

1. масса и габариты ТММ уменьшаются с повышением частоты, а дросселей (и реакторов) могут возрасти с увеличением частоты выше критической;
2. массу ТММ можно снизить, используя аморфные и нанокристаллические сплавы с высоким значением индукции насыщения;
3. масса и габариты ФМЭ возрастают с повышением окружающей температуры для изоляции одного и того же класса. Чтобы максимальная рабочая температура оставалась постоянной, то для снижения перегрева активных материалов необходимо увеличивать поверхности охлаждения;
4. масса и габариты ФМЭ уменьшаются с повышением рабочей температуры при заданной мощности и окружающей температуре;
5. масса и габариты ФМЭ возрастает при усилении защиты от внешних условий.

Способность ФМЭ сохранять свои значения от основных параметров при воздействии температуры, влажности, атмосферного давления, механических нагрузок и др. называется стабильностью.

Например, при длительном воздействии повышенной температуры происходит старение изоляции, а сопротивление проводникового материала уменьшается. В частности, превышение расчётного перегрева на 8-10⁰С снижает срок службы ФМЭ вдвое [5].

Влажность резко снижает сопротивление изоляции и её электрическую прочность, что может привести к пробое изоляции.

При высоком давлении изменяется диэлектрическая проницаемость воздуха и собственная ёмкость катушек ФМЭ, а при низком давлении может появиться корона и пробой изоляции у выводов катушек.

Под влиянием механических усилий (ударов, тряски) возможны деформации и разрушение деталей ФМЭ.

Основные критерии проектирования ФМЭ для частот от 50Гц до 2000Гц рассмотрены в гл.1 и 2. Ниже будет рассмотрена специфика методики проектирования ФМЭ для повышенных и высоких частот, хотя расчётом отдельных параметров следует воспользоваться из глав 1 и 2.

3.1. Критерии выбора магнитного материала

При выборе магнитных материалов для изготовления ФМЭ необходимо исходить из конкретных условий, предъявляемых к ИВЭП: минимальные масса и габариты, ограниченный объём источника, минимальные удельные потери и стоимость, минимальное влияние на первичный источник питания, высокий КПД, высокая магнитная проницаемость и др.

Наиболее общие требования к магнитным материалам следующие:

1. узкая петля гистерезиса, способность легко перемагничиваться, малая коэрцитивная сила H_c , большие значения магнитной проницаемости $\mu_{нач}$ и μ_{max} ;
2. высокая индукция насыщения B_s , хотя уже на повышенных частотах это требование второстепенно;
3. малая мощность потерь, однако в реакторах фильтров при малых токах и малых потерях целесообразно использовать материалы с большими потерями: тогда, кроме фильтрующего действия фильтра, демпфирование, возникающее из-за потерь в магнитопроводе, способствует затуханию высоких частот;
4. минимальная зависимость магнитных свойств, сплавов (пермаллоев и др.) от механических напряжений, от которых зависят $\mu_{нач}$ и μ_{max} и H_c ;
5. стабильность магнитных свойств от температуры, вибрации и т.п.; низкая стоимость и дефицитность материалов.

Потери в магнитных материалах (альсиферах, из карбонильного железа, магнитодиэлектриков на основе Мо-пермаллоя) характеризуют тангенсом полных потерь $tg\delta$, который определяется по выражению

$$tg \delta = tg\delta_{в.м} \cdot f + tg\delta_{г} \cdot H + tg\delta_{н} \quad (3.1)$$

где $tg\delta_{в.м}$ – коэффициент потерь на вихревые токи, отнесённый к частоте $1 Гц$; $tg\delta_{г}$ – коэффициент потерь на гистерезис, отнесённый к напряженности поля $H=80 А/м$; $tg\delta_{н}$ – коэффициент начальных потерь (для магнитодиэлектриков значения $tg\delta_{н}$ даны в табл 1.1 - 1.3 и на рис 1.4).

Тангенс $tg\delta$ связан с удельной мощностью потерь в единице объёма, которая определяется по уравнению

$$P_{уд} = \pi \cdot B_m^2 \cdot f \cdot \frac{tg\delta}{\mu_a}, \quad (3.2)$$

где B_m – амплитудное значение индукции ($В \cdot с/сМ^2$); $\mu_a = \mu_0 \mu$ абсолютная магнитная проницаемость ($Гн/сМ$); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{Гн}{сМ}$.

Потери на гистерезис в ЭТС и сплавах можно снизить за счёт уменьшения толщины ленты δ_l , но при этом повысится удельное сопротивление γ_c ферромагнетика. Однако с уменьшением толщины ленты (листа) падает магнитная проницаемость μ и растёт коэрцитивная сила H_c .

Необходимо заметить, что все расчёты здесь и далее *проводятся в см.*

С потерями на гистерезис считаются на низкой частоте в проводниковых магнитных материалах, а в полупроводниковых ферритах и магнитодиэлектриках потери на гистерезис сильно заметны на любых частотах. Явление магнитной вязкости (последствия) связано с изменением границ доменов. При смещении границ доменов возникают внутренние напряжения. Их равновесное распределение устанавливается не сразу, а благодаря механическому последствию, с конечной скоростью, что приводит к временной зависимости и потерям. Магнитная вязкость проявляется на частотах порядка несколько сотен или тысяч кГц. С понятием $tg\delta$ связано представление о так называемой граничной частоте $f_{гр}$. Частота, при которой $tg\delta=0,1$ называют критической (граничной) $f_{кр} = f_{гр}$.

Она является одним из параметров магнетиков. В средних ($0,3 \leq \frac{B_m}{B_s} \leq 0,8$) и сильных полях потери определяют экспериментально по петлям гистерезиса при фиксированных значениях B_m , $H_{эфф}$ и частоте f .

3.2. Рекомендации по выбору ферромагнетиков

Среди рассмотренных магнитомягких материалов самое широкое применение для изготовления трансформаторов и дросселей на частотах до 5 кГц нашли холоднокатанные текстурованные электротехнические стали (ЭТС) [1, 3].

Сплавы с толщиной ленты от 0,01 до 0,05мм, несмотря на свои достоинства, имеют большую чувствительность магнитной проницаемости к механическим воздействиям, входят в насыщение при сравнительно малых индукциях, а из-за содержания никеля и других компонентов довольно дорогие и имеют сложную технологию изготовления.

Ферриты на частоте свыше 30кГц, при малых потерях на вихревые токи, имеют низкие значения индукции ($B_s \leq 0,5Тл$) и магнитной проницаемости, сильную зависимость от температуры, довольно тверды и хрупки. Для дросселей следует применять магнитодиэлектрики, которые имеют линейную зависимость $B=f(H)$, в том числе и броневые (чашечные), позволяющие с помощью перемещения винта изменить его индуктивность.

В последние годы для высокочастотных ФМЭ и повышенной частоты разработчики ИВЭП используют сердечники на основе сплавов АМС, нанокристаллических, типа В, П, Т марки 5БДСР и других, приведенных выше.

При проектировании ФМЭ с минимальными массой и габаритами при прочих равных условиях можно выбрать магнитомягкий материал в первом приближении по следующим критериям: для трансформатора по показанию удельной передаваемой мощности – P_p , для дросселя – по показателю удельной энергоёмкости P_w [3,5,8]. Для определения этих критериях при известных параметрах ФМЭ и характеристик магнитных материалов потребуются следующие зависимости:

1. критерий подобия оптимальных по массе и габаритам трансформаторов

$$T_1 = \sqrt{A} \cdot \frac{P}{\left(\sqrt{k_{OK}} \cdot f^{0,25} \cdot \tau \cdot V_c \right)} \quad (3.3)$$

где $T_1=0,7$ - численное значение критерия для оптимальной геометрии трансформаторов; P – мощность трансформатора (Вт); V_c – объём магнитопровода ($см^3$); τ - допустимый перегрев ($^{\circ}C$); $k_{OK} = S_{об}/S_{ок} = wS_{np}/S_{ок}$ – коэффициент заполнения окна медью: - для тороидальных ТВ $k_{OK} = 0,25$, -для броневых и стержневых $k_{OK} = 0,22-0,37$ (при рядовой намотке доходит до 0,4).

Известно, что если построить в логарифмическом масштабе зависимость полных потерь $p_{y0}=f(B_m, f)$, то она окажется линейной. В связи с этим, можно записать формулу для определения удельных потерь (Вт/ $см^3$) в сердечнике

$$p_{y\delta} = P_0 \left(\frac{f}{f^*}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_m}{B_m^*}\right)^\beta = P_{01} f^\alpha B_m^\beta \quad (3.4)$$

В формуле приняты за базовые относительные значения частоты f^* и индукции B_m^* следующие: $f^* = 1000 \text{ Гц}$, $B_m^* = 1 \text{ Тл} = 1 \cdot 10^4 \text{ (В} \cdot \text{с/см}^2)$, f и B_m – текущие значения частоты и индукции; P_0 , α , β – коэффициенты, полученные из обработки экспериментальных зависимостей $p_{y\delta} = f(B_m, f)$; $P_{01} = P_0 / (f^*)^\alpha \cdot (B_m^*)^\beta$.

Формулы справедливы для частот до 30 кГц .

Из уравнения (3.3) нетрудно заметить, что при $T_1 = \text{const}$ с увеличением частоты объём сердечника снижается, но только до значения граничной (критической) частоты, которая рассчитывается по выражению: для трансформатора

$$f_{\text{кр}} = 3,98 \cdot 10^7 \cdot \frac{(\tau / P_{TP})^{0,5}}{A \cdot K_p}, \quad (3.5)$$

для реактора (дросселя)

$$f_{\text{кр}} = 1,13 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\tau}{W}\right)^{0,66} \cdot Q^2. \quad (3.5, a)$$

В уравнениях (3.3), (3.5) коэффициент потерь A представляет собой потери в единице объёма ($A \cdot \text{см} / (\text{В} \cdot \text{с}^{0,5})$) при синусоидальном напряжении

$$A = p_0 \cdot f^{(\alpha-1,5)} \cdot \frac{B^{(\beta-2)}}{(f^*)^\alpha (B_m^*)^\beta} \quad (3.6)$$

Коэффициент A получен при частоте $f = 1 \text{ Гц}$ и $B_m = 1 \text{ (В} \cdot \text{с/см}^2)$; $1 \text{ Тл} = 1 \cdot 10^4 \text{ (В} \cdot \text{с/см}^2)$, а его значения $A = f(B_m, f)$ приведены в таблице 3.2. Для импульсных напряжений коэффициент A рассчитывается по (3.6), а коэффициенты P_0 , α , β выбирают из табл 3.1.

Если $f > f_{\text{кр}}$, то объём V_c остаётся постоянным и в (3.3) следует подставлять $f_{\text{кр}}$.

Критерий подобия дросселей и реакторов с минимальными массой и габаритами определяется по выражениям: для энергоёмкости:

$$D_W = \sqrt{\frac{A \cdot \rho}{k_{OK}} \cdot \frac{W \cdot f^{0,75}}{\alpha_T \cdot \tau \cdot V_c}}, \quad (3.7)$$

для добротности

$$D_Q = \sqrt{\frac{A}{k_{OK}} \cdot \frac{Q}{f^{0,25} V_c^{0,333}}}, \quad (3.8)$$

где $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – удельное сопротивление медного провода; $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт/см}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); Q – добротность дросселя; W – энергоёмкость дросселя (Дж) – см. раздел 5.

Коэффициенты для расчёта удельной мощности потерь в магнитопроводах по формуле $P_0 \cdot (f/f^*)^{\alpha} \cdot (B_m/B_m^*)^{\beta}$ при частотах 1...30кГц. Таблица 3.1

Марка	Толщина ленты, мм	$P_0 \cdot 10^{-2}, \text{Вт/см}^3$	$P_0, \text{Вт/кг}$	α	β
Стали и сплавы:					
79НМ	0,1	4,6	5,5	1,6	2
	0,05	3,2	3,8	1,5	1,8
	0,02	2,9	3,5	1,4	2
79НМА	0,02	2,1	2,5	1,4	2,1
80НХС	0,05	3,1	3,7	1,5	2,0
34НКМП	0,1	8,4	10,0	1,6	1,7
	0,05	5,7	6,8	1,4	1,6
	0,02	4,3	5,1	1,3	1,7
40НКМПЛ	0,1	11,3	13,5	1,6	2,1
	0,02	8,3	9,9	1,1	2,3
50Н	0,08	12,4	14,8	1,5	1,9
	0,02	12,3	14,7	1,2	1,9
50НХС	0,02	8,9	10,6	1,1	1,8
50НП	0,05	12,6	15,0	1,5	2,0
	0,02	6,3	7,5	1,3	1,4
	0,01	7,6	9,0	1,2	1,5
68НМ	0,010	5,9	7,0	1,6	1,7
47НК	0,02	6,3	7,8	1,2	2,0
	0,05	16,6	19,7	1,4	2,0
3422(Э350)	0,08	21,0	27,4	1,3	1,6
3423(Э360)	0,08	19,0	24,8	1,3	1,8
3424(Э360А)	0,08	16,6	21,7	1,2	1,6
3425(Э360АА)	0,08	16,5	21,6	1,5	1,8
	0,05	15,4	20,1	1,4	1,6
3441	0,03	14,4	18,8	1,4	1,6
	0,01	20,4	26,6	1,1	1,6
Ферриты:					
2000НМ-А	-	14,2	35,5	1,2	2,4
2000НМ1-17	-	27,2	68,0	1,2	2,8
3000НМ-А	-	20,8	52,0	1,2	2,8
1500НМ3	-	9,3	23,2	1,2	2,2
2000НМ3	-	17,8	44,6	1,3	2,7
2500НМС2	-	5,3	11,5	1,3	1,7
2500НМС1	-	3,4	7,3	1,4	1,9
Магнитодиэлектрики:					
ТЧ-60	-	4540	7090	1,0	3,0
ВЧ-22	-	1050	1640	1,0	3,0
МП-140	-	290	453	1,3	2,9
МП-60	-	730	1140	1,1	2,9

Уравнения (3.7), (3.8) получены при $Q=\text{const}$ и $W=\text{const}$.

При естественном охлаждении с учётом подстановки значений α_T и ρ численные значения равны: $D_w=0,3$, $D_Q=100$ [4]. В диапазоне частот 3-30кГц связь частоты f с объёмом V_c определяется из уравнения (3.7).

Выразим коэффициент А, путём подстановки коэффициентов P_{01} , α и β , получим

$$\Pi_p = (f^3 f_1)^{0,25} \cdot \frac{B_m^{(1-0,5\beta)}}{\sqrt{P_{01} \cdot f^{0,5}}} \quad (3.9)$$

$$\Pi_w = \frac{B_m^{(1-0,5\beta)}}{\sqrt{P_{01} \cdot f^{0,5}}} \quad (3.10)$$

Значения коэффициентов А в функции частоты и индукции.

Таблица 3.2

Марка	Толщина ленты, мм	Частота f , Гц	индукция $B_m \cdot 10^{-4}$ $B \cdot c/cm^2$	A , $A \cdot cм / B \cdot c^{1/2}$	Марка	Толщина ленты, мм	Частота f , Гц	Индукция $B_m \cdot 10^{-4}$ $B \cdot c/cm^2$	A , $A \cdot cм / B \cdot c^{0.5}$
Сплавы:					79НМА	0,02	20000	0,1	32
79НМ	0,1	1000	0,8...1	146				0,2	35
	0,05			101				0,3	37
	0,02			93				0,4	40
79НМА	0,02			66				0,5	41
80НХС	0,05			98	80НХС	0,05		0,1...0,5	100
34НКМП	0,1			266	34НКМП	0,05		0,1	303
	0,05			181	Сплавы:				
	0,02			134	34НКМП	0,05	20000	0,2	238
40НКМПЛ	0,1			359				0,3	206
	0,02			263				0,4	187
50Н	0,05			393				0,5	173
	0,02			390	40НКМПЛ	0,1		0,1	311
50НХС	0,02			282				0,2	340
50НП	0,08			398				0,3	360
	0,02			199				0,4	373
	0,01			239				0,5	384
68НМ	0,05			186	50Н	0,02		0,1	250
47НК	0,1			523				0,2	226
	0,02			207				0,3	214
Стали:								0,4	206
3422(Э-350)	0,08	1000	0,8...1	663				0,5	200
3423(Э-360)	0,08			600	50НХС	0,02		0,1	155
3424	0,08			525				0,2	131
3425	0,08			522				0,3	119
	0,05			486				0,4	110
3441	0,03			455				0,5	105
	0,01			643	50НП	0,05		0,1...0,5	403
Сплавы:						0,02		0,1	440
79НМ	0,1	10000	0,1...0,5	209				0,2	290
	0,02			75				0,3	223
	0,05		0,1	158				0,4	192
			0,2	141				0,5	168
			0,3	131	Ферриты:				
			0,4	125	1500НМЗ		20000	0,1	82
			0,5	120				0,2	98
79ПМА	0,02		0,1	38				0,3	108
			0,2	41	2500НМС			0,1	92
			0,3	43				0,2	72
			0,4	44				0,3	63
			0,5	45				0,4	57
80НХС	0,05		0,1...0,5	100	2500НМС-1			0,1	112
34НКМП	0,05		0,1	325				0,2	106
			0,2	255				0,3	102
			0,3	221				0,4	99
			0,4	200	2500НМС-1			0,1	128
			0,5	185				0,2	101
40НКМПЛ	0,1		0,1	300				0,3	88
			0,2	330				0,4	80
			0,3	347	Магнитодиэлектрики:				
			0,4	360	ТЧ-60		20000	0,1	3210
			0,5	371				0,2	6420
50Н	0,02		0,1	300	ВЧ-22			0,1	743

			0,2	272			0,2	1490
			0,3	257	МП-140		0,1	634
			0,4	247			0,2	1180
			0,5	239	МП-60		0,1	1600
Сплавы:							0,2	2990
79НМ	0,1	20000	0,1...0,5	232				
	0,05		0,1	160				
			0,2	143				
			0,3	133				
			0,4	127				
			0,5	122				
	0,02		0,1...0,5	70				

Следует заметить, что все *расчёты* здесь и далее *ведутся в см.*

Обычный оптимальный ФМЭ имеет объём магнитопровода, составляющий 1/3 от всего объёма. Кроме того установлено, что при прочих равных условиях потери в сердечнике P_c равны потерям в обмотке, т.е. $\Delta P = 2P_c$ [1;3;5]. Полагая, что теплоотдача происходит по закону Ньютона полные потери равны

$$\Delta P = 2 \Delta P_c = \Pi_{охл} \cdot \tau \cdot \alpha_m . \quad (3.11)$$

$$\text{Площадь охлаждения ФМЭ равна : } \Pi_{охл} = 0,13 V_c^{0,66} \quad (3.12)$$

Из уравнения (3.12) найдём объём сердечника с учётом, что $p_{y\partial} = \Delta P_c / V_c$

$$V_c = \left(\frac{6,5 \alpha_T \tau}{P_{01} f^\alpha B_m^\beta} \right)^3 \quad (3.13)$$

Из уравнения (3.13) с учётом закона электромагнитной индукции $U = 4K_\phi \cdot f \cdot B_m S_c k_{3C}$ – для трансформатора и $U = \omega \cdot L \cdot I$ и $P_{y\partial} = \Delta P_c / V_c$ – для дросселя находим оптимальную индукцию через параметры ФМЭ и его сердечника: для трансформатора

$$B_{m \text{ опт}} = \frac{0,114 \sqrt{P}}{f^{0,875} A^{0,25} V_c^{0,66}} , \quad (3.14)$$

для дросселя

$$B_{m \text{ опт}} = \frac{0,203 W}{f^{0,375} A^{0,25} V_c^{0,66}} . \quad (3.15)$$

По уравнениям (3.9),(3.10) с учётом (3.14) и (3.15) можно найти удельный показатель материала Π_p и Π_w .

Для некоторых магнитных материалов, работающих на частоте $f = 20 \text{ кГц}$, для трансформаторов $P = 1000 \text{ Вт}$ и $\tau = 50^\circ \text{С}$ и реакторов энергоёмкости $W = 10 \text{ ВА}$, $f = 20 \text{ кГц}$ и $\tau = 50^\circ \text{С}$ приведены в таблице 3.3.

Выбор магнитных материалов, приведённых выше, пригоден для синусоидального и несинусоидального периодического возмущения. Для упрощения при отношении $T_u / t_u \leq 3$ материал можно выбирать по первой гармонике напря-

жения или тока при частоте $f = 1/T_u$. Если отношение $T_u / t_u > 3$, то воздействие считается как импульсное, при этом $f \approx 0,5/t_u$.

Значения показателей магнитных материалов.

Таблица 3.3.

Марка материала	δ (мм)	$\Pi_p (Bm/cm^3)^{-0,5}$	$\Pi_w \cdot 10^5 (B \cdot A \cdot c/cm^3)^{-0,5}$
79НМ	0,02	1,44	7,2
50Н	0,02	0,86	4,1
2500НМС1	-	1,24	5,8
3441	0,01	0,49	2,0
3425	0,05	0,27	1,3
МП-140	-	0,5	2,6
МП-250	-	0,6	2,8
ГЧ-60		0,23	1,6

Глава 4. Мощность потерь в ТММ и дросселях

Общие потери ФМЭ складываются, в основном, из потерь в магнитопроводе и в обмотках.

Естественно, потери при воздействии на ФМЭ синусоидального, одно- или двухполярного напряжения прямоугольной формы, а также импульсной несинусоидальной формы будут различны. Рассмотрим, как определяются потери в ФМЭ, либо теоретически, либо на основе практических примеров и задач.

4.1. Мощность потерь в магнитопроводе ФМЭ при синусоидальном напряжении

Как отмечалось выше, потери мощности в магнитопроводе складываются из потерь на гистерезис, вихревые токи и магнитную вязкость. Расчет потерь достаточно сложный. Авторами [4,5] отмечается, что более рациональным является метод определения полных потерь по экспериментальным данным, полученным при синусоидальном воздействии.

Удельные потери (Вт/см^3) в сердечнике рассчитывается по формуле(3.4). Коэффициенты p_0, α, β , полученные из экспериментальных зависимостей $p_{уд} = f(B_m, f)$, приведены в табл. 3.1.

Формулу (3.4) и табл. 3.1 можно использовать для определения удельных потерь в магнитопроводах для частоты до 30 кГц при синусоидальном напряжении или токе. При частотах $f > 30 \text{ кГц}$ удельные потери в ферритах следует считать, используя коэффициенты табл. 3.1, а в магнитодиэлектриках – по уравнениям (3.1),(3.2) и таблицам 1.1...1.4.

Затем расчет потерь используется при определении перегрева τ ФМЭ по [3,4,5].

Известно, что при повышенных и высоких частотах потери в витых и шихтованных сердечниках, в основном, определяются потерями на вихревые токи.

Учитывая значения \sin и \cos при малых и больших значениях аргумента для низкой частоты ($k \cdot \delta_l < 1$) получим уравнение для определения мощности потерь в ленте сердечника:

$$p_{уд} = \frac{4}{3} \cdot B_m^2 \cdot k_\phi^2 \cdot \delta_l^2 \cdot \gamma_c \quad (4.1)$$

где δ_l – толщина ленты (мм); B_m – среднее, по толщине ленты, амплитудное значение индукции; γ_c – удельная проводимость материала (стали); k_ϕ – коэффициент формы (для синусоиды $k_\phi = 1,11$); $k = \sqrt{\omega \mu_a \gamma / 2}$ - для высокой частоты ($k \cdot \delta_l > 1$) удельные потери определяются по выражению:

$$p_{уд} = \frac{\pi \sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{\gamma_c}{\mu_a}} \cdot \delta_l \cdot f^{1,5} \cdot B_m^2 = A \cdot f^{1,5} B_m^2 \quad (4.2)$$

Уравнение (4.2) учитывает только потери на вихревые токи, а в ферритах их практически нет.

4.2. Мощность *потерь при импульсном напряжении или токе*

ФМЭ ИВЭП подвергаются, в основном, несинусоидальным воздействиям (напряжения – в трансформаторе, тока – в обмотке дросселя или реактора) различным по форме и скважности $q = \frac{T_{и}}{t_{и}}$, где $T_{и}$ – период, $t_{и}$ – длительность импульса, $\gamma_{и} = \frac{t_{и}}{T_{и}} = \frac{1}{q}$ – длительность импульса.

Воздействие может называться периодическим, при котором вихревые токи не затухают к моменту появления следующего воздействия, и импульсным, при котором вихревые токи в сердечнике затухают к моменту появления нового воздействия. Указанное разделение справедливо для листовых магнитных материалов (электротехнической стали и сплавов), поскольку потери в них, в основном, определяются вихревыми токами. В ферритах вихревые токи несущественны и потери могут быть определены любым способом.

Более подробно по расчету мощности импульсных потерь изложено в разделе *расчет трансформаторов* (§ 6.3) и в примере (4.1 и 6.7) [4;5].

Следует заметить, что произвольная (реальная) форма импульса заменяется в прямоугольной эквивалентной площади [4;5].

В случае единичного прямоугольного импульса длительностью t_0 (где t_0 – длительность прямоугольного импульса при замене реального импульса эквивалентным по потерям прямоугольным импульсом). Около 90% энергии сосредоточено в полосе частот от 0 до $\omega_0 = 2\pi/t_0$, т.е. в основной полосе частот.

Это позволяет сделать вывод, что если два импульса разной формы в основной полосе частот имеют одинаковые амплитудные спектры, то и энергии всех импульсов будут примерно одинаковы. Вследствие этого с достаточно хорошей точностью можно заменить реальный импульс, например треугольный прямоугольным, как это показано на рис. 4.1.

Треугольный импульс со сторонами a и b заменен прямоугольным со сторонами c и h и при этом их площади примерно одинаковы. Найдем параметры прямоугольного импульса с амплитудой $U_0=h$; $0,5t_0=c$, а в треугольном: $U_m=a$, $0,5t_u=b$. Сумма несовпадающих площадей равна $\Delta S=S_p - S_n$ (S_n , S_p – площади прямоугольного и реального импульса)

$$\Delta S = \frac{1}{2} \left[\frac{b}{a} (a - h)^2 + \frac{a}{b} (b - c)^2 + \frac{(ac - ab - bh)^2}{ab} \right].$$

Установлено [5], что ширина импульса $c = b \cdot a/h = 0,707b$, а отношение высоты прямоугольника к его ширине $h/a = 0,707$

$$\Delta S = \frac{ab}{2} \left(\frac{a}{h} \right)^2 \cdot \left[2 \left(\frac{h}{4} \right)^4 \cdot 4 \left(\frac{h}{a} \right)^3 + 4 \left(\frac{h}{a} \right)^2 - 2 \frac{h}{a} + \frac{1}{2} \right]$$

После подстановки в предыдущее уравнение значений, получаем, что несовпадающая

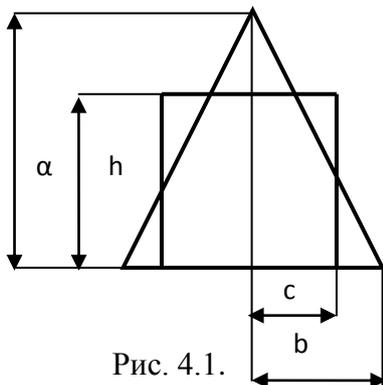


Рис. 4.1.

площадь равна ΔS . Если форма реального импульса довольно сложная, то находят площадь этого импульса графически. Для этого на заменяемый импульс накладывают несколько прямоугольных импульсов такой же площади, но с разными длительностями и амплитудами (рис. 4.2, а и б — где τ — длительность прямоугольного импульса t_n).

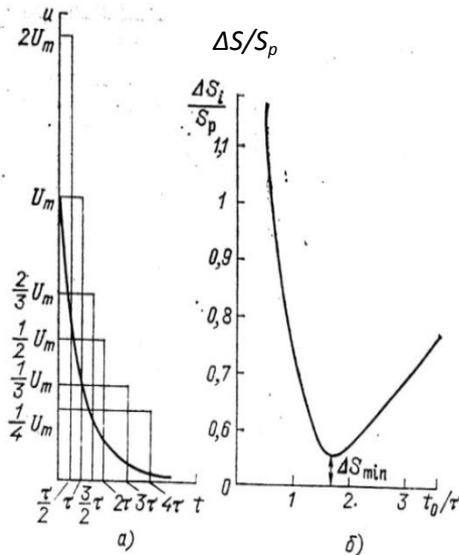


Рис. 4.2. Замена экспоненциального импульса, эквивалентным ему по потерям прямоугольным

Графически определяют для каждого случая суммы несовпадающих площадей. По графику зависимости $\Delta S/S_p = f(t_0/t_n)$ — рис. 4.2 определяется длительность импульса, равная сумме несовпадающих площадей. Затем находят

$U_0 = \int_0^{t_u} U \cdot dt/t_0$ (индекс t_0 — реальный,

$t_{II} = \tau$ — прямоугольный).

В табл. 4.1 приведены для некоторых форм реальных импульсов параметры прямоугольных импульсов.

При длительности прямоугольного импульса $t_0 \geq 10 \theta_B$ потери мощности на вихревые токи в шихтованном магнитопроводе при $\mu = const$ и импульсах напряжения прямоугольной формы (табл. 4.1) приближенно равны [5]

$$\Delta P_c \approx \frac{\Delta B_{cp}^2 \delta_l^2 \gamma_c V_c}{(12t_0^2)}, \quad (4.3)$$

где $\theta_B = \mu_a \gamma_c \delta_l^2 / (2\pi)^2$ — постоянная времени установления вихревых токов. (4.4)
 Формула (4.3) получена из уравнения

$$P_{уд} \approx \frac{\Delta B_{cp}^2}{2\mu_a T_{II}} + \frac{\Delta B_{cp}^2 \delta_l^2 \gamma_c}{12t_0 T_{II}} \quad \text{при } t_0 \geq 10 \theta_B. \quad (4.5)$$

Уравнение (4.3) определяет среднюю мощность потерь за время действия импульса t_0 . Длительность импульса t_0 может быть определена (табл. 4.1) по коэффициенту перехода к эквивалентному прямоугольному импульсу ξ . Для большинства случаев выполняется условие, что $t_0 \geq 10 \cdot \theta_B$. Если последнее условие не выполняется, то следует пользоваться уравнением потерь в магнитопроводе, заменив T_u на t_0 .

$$P_{уд} \approx \frac{\Delta B_{cp}^2}{2\mu_a T_{II}} + \frac{\Delta B_{cp}^2 \delta_l^2 \gamma_c}{12t_0 T_{II}} \left(1 - \frac{\pi^2 \theta_B}{15t_0}\right). \quad (4.6)$$

Потери мощности в обмотках ТВ при импульсном питании:

$$\Delta P_{об} = 2\rho \cdot I_{01}^2 \cdot k_{доб} \cdot k_t \cdot w_1 \cdot L_{об} / S_{пр}, \quad (4.7)$$

где $I_{0I} = P_u / U_0$ – ток обмотки w_1 при прямоугольном импульсе напряжения, $k_t = 1 + 0,004(t_{oc} + \tau - 20^\circ)$ – коэффициент увеличения сопротивления провода при его нагреве; $k_{доб} = \Delta P_{доб} / \Delta P_{об0}$ – коэффициент добавочных потерь.

Параметры прямоугольного импульса, эквивалентного реальным. Таблица 4.1

Форма импульса	Коэффициенты перехода к эквивалентному импульсу			
	прямоугольному		экспоненциальному	
	$\xi_{\Pi} = t_0 / t_{\Pi}$	$\lambda_{\Pi} = U_0 / U_m$	$\xi_{\text{exp}} = t_{\text{exp}} / t_{\Pi}$	$\lambda_{\text{exp}} = U_{\text{exp}} / U_m$
	1	1	1,82	1,67
	0,707	0,707	1,28	1,18
	0,74	0,86	1,35	1,43
	0,84	0,81	1,56	1,35
	0,55	0,6	1	1

Выразим мощность потерь в обмотках через среднее значение индукции B_{cp} за время действия импульса $\Delta B_{cp} = \frac{U_0 \cdot t_0}{w_1 \cdot S_c}$,

откуда
$$I_{0I} = P_u \cdot t_0 / (w_1 S_c \Delta B_{cp}) \quad (4.8)$$

с учетом, что $w_1 \cdot S_{пр} = 0,5 k_{ок} S_{ок}$, $S_c = V_c / L_c$, а $S_c \cdot S_{ок} / L_c \cdot L_{об} = 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot V_c^{0,666}$ получим [5]

$$\Delta P_{об} = 2\rho \frac{w_1 l_{об}}{S_{пр}} \left(\frac{P_u \cdot t_0}{w_1 \Delta B_{cp} S_c} \right)^2 \cdot k_{доб} k_t = \frac{4\rho \cdot k_{доб} \cdot k_t}{K_{ок} \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} V_c^{1,666}} \left(\frac{P_u \cdot t_0}{w_1 \cdot \Delta B_{cp}} \right)^2 \quad (4.9)$$

или приблизительно

$$\Delta P_{об} \cong \frac{9 \cdot 10^{-3}}{V_c^{1,666}} \left(\frac{P_u t_0}{\Delta B_{cp}} \right)^2 \quad (4.10)$$

Уравнение (4.10) получено из (4.3) путем подстановки наиболее употребляемых значений: $k_{ок} = 0,25$, $k_{дон} = 2$, $k_t = 1,4$, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см (для медных проводов).

Из совместного решения уравнений (4.3) и (4.10) определим оптимальную индукцию ($\text{В}\cdot\text{с}/\text{см}^2$) [5]

$$\Delta B_{cp} = \frac{0,68 t_0 \sqrt{P_{и}}}{\delta_l^{0,5} \gamma_c^{0,25} V_c^{0,666}} \quad (4.11)$$

где δ_l – толщина ленты сердечника (см); γ_c – удельная проводимость стали или сплава ($1/\text{Ом}\cdot\text{см}$). Так как потери мощности в этом разделе определяются как средние за время действия импульса t_0 , то при выполнении теплового расчета (здесь не приводится) их нужно разделить на скважность q , вследствие чего получим потери мощности, средние за период. В остальном методика расчета трансформатора не отличается от приведенной при питании его синусоидальным напряжением.

Пример 4.1. Определение мощности потерь в магнитопроводе

Определить мощность потерь в сердечнике из стали 3425 с толщиной ленты $\delta_l=0,08$ мм. Параметры магнитопровода: $wS_c=10^{-3}\text{ м}^2$ при воздействии прямоугольных (однополярных) импульсов (рис. 5.3) длительностью t_0 (при замене реального импульса (например треугольного) эквивалентным ему по потерям прямоугольным) (рис.4.1) с амплитудой $U_0=20\text{В}$ и периодом $T_u=10^{-4}\text{ с}$.

а). задаемся отношением $t_0/\theta_B=3$; $\theta_B=\gamma_{nc}\cdot\mu_a\cdot\delta_l^2/4\pi^2$ – постоянная времени

(γ_{nc} – удельная проводимость стали $\gamma_{nc}=1/\rho_{nc}$) [11].

$$\theta_B = \frac{2\cdot 10^4 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot (8\cdot 10^{-3})^2}{4\pi^2} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ сек}; t_0=3\theta_B=12\cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

Тогда приращение индукции за время действия прямоугольного импульса равно:

$$\Delta B_{cp} = \frac{1}{wS_c} \int_0^{t_0} U(t) dt = \frac{U_0 \cdot t_0}{w \cdot S_c} = \frac{20 \cdot 12 \cdot 10^{-7}}{10} = 0,24 \cdot 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{с}/\text{см}^2 \quad (4.12)$$

Удельные потери мощности определим из отношения потерь в стали к объему:

$$P_{уд} = \Delta P_c / V_c = \frac{\Delta B_{cp}^2 \delta_l^2 \gamma_c}{T_u \cdot 12 t_0} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{15} \cdot \frac{\theta_B}{t_0} \right] = \frac{(0,024 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2 \cdot 10^4}{10^{-4} \cdot 12 \cdot 12 \cdot 10^{-7}} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{15} \cdot \frac{1}{3} \right]$$

$$= 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}$$

б). при отношении $t_0/\theta_B=15$; $t_0=15\theta_B=60\cdot 10^{-7}$ сек. приращения индукции за время действия импульса: $\Delta B_{cp1} = \frac{20 \cdot 60 \cdot 10^{-7}}{10} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{с}/\text{см}^2 = 0,12 \text{ Тл}$.

Потери мощности: $P_{уд} = \Delta P_c / V_c = \frac{(1,2 \cdot 10^{-5})^2 (8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2 \cdot 10^4}{10^{-4} \cdot 12 \cdot 12 \cdot 10^{-7}} = 0,128 \text{ Вт}/\text{см}^3$.

Из примера видно, что с увеличением отношения t_0/θ_B удельные потери в магнитопроводе возрастают.

4.3. Мощность потерь при периодическом несинусоидальном напряжении

Расчет потерь при несинусоидальном напряжении проводится путем разложения напряжения в ряд Фурье.

Магнитная индукция и потери мощности по этому методу находятся для каждой гармоники

$$P_{(n)уд} = p_{01} f_{(n)}^\alpha B_{(n)}^\beta, \quad (4.13)$$

потери от заданного напряжения

$$P_{уд} = \sum_{n=1}^{\infty} p_{01} \cdot f_{(n)}^\alpha \cdot B_{(n)}^\beta = p_{01} \cdot f_{(1)}^\alpha \cdot B_{m(1)}^\beta \left(\frac{f_{(n)}}{f_{(1)}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_{m(n)}}{B_{m(1)}}\right)^\beta = P_{\text{син}(1)} \gamma_n, \quad (4.14)$$

где $P_{\text{син}(1)}$ - потери, рассчитанные по первой (основной) гармонике синусоидальной индукции; n – номер гармоники; γ_n – коэффициент несинусоидальности (см. пример); α и β – показатели степени - (табл. 3.1).

Коэффициенты p_0 , α , β , определяются в рассматриваемом диапазоне частот и индукций и полные потери.

Применение метода разложения однополярной кривой напряжения прямоугольной формы в ряд Фурье [4] рассмотрим на примере.

Пример 4.2. Расчет трансформатора при прямоугольном напряжении

На первичную обмотку трансформатора подается прямоугольное напряжение, симметричное относительно оси ординат: $U_m = 10 \text{ В}$; $wS = 10^{-2} \text{ м}^2$; $f = 1/T = 1 \text{ кГц}$; $\gamma_u = t_u / T_u = 0,8$, магнитопровод из стали 3422 толщиной $\delta_\pi = 0,08 \text{ мм}$. (рис. 4.3).

Поскольку напряжение ассиметрично относительно оси ординат, то при разложении в ряд имеются постоянная составляющая и четные гармоники.

Раскладываем в ряд Фурье прямоугольную форму напряжения [9]-табл. П.15.

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos n\omega t = U_m \gamma_u + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2U_m}{\pi} \cdot \frac{\sin n\pi\gamma_u}{n^2} \cdot \cos n\omega t \quad (4.15)$$

Переменная составляющая ряда

$$b(t) = \frac{1}{w \cdot S_C} \int U_m \cdot dt = \frac{2U_m}{\pi \cdot \omega \cdot w \cdot S_C} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin n\pi \cdot \gamma_u}{n^2} \cdot \sin n \cdot \omega t = B_{m(1)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n \cdot \pi \cdot \gamma_u}{\sin \pi \gamma_u} \cdot \frac{1}{n^2} = \sin n \cdot \omega t. \quad (4.16)$$

После подстановки значений имеем

$$B_{m(1)} = \frac{U_m T_u}{w S_C \pi^2} \sin n \gamma_u = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10^{-2}} \sin 0,8\pi = 0,059 \text{ Тл},$$

потери $p_{уд} = p_{01} f_{(1)}^\alpha B_{m(1)}^\beta \cdot \sum_n \left(\frac{\sin n \cdot \pi \cdot \gamma_u}{\sin n^2 \cdot \pi \cdot \gamma_u} \right)^\beta \cdot \left(\frac{f(n)}{f(1)} \right)^\alpha = p_{01} \cdot f_{(1)}^\alpha \cdot B_{m(1)}^\beta \cdot \gamma_H$, (4.17)

где $\gamma_H = \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\sin n \pi \gamma_u}{\sin n^2 \pi \gamma_u} \right|^\beta \cdot n^{(\alpha-2\beta)} = 3,2$. (4.18)

Находим удельную мощность потерь

$$p_{уд} = 21 \cdot 10^{-2} \cdot 1^{1,3} \cdot (0,059)^{1,6} \cdot 3,2 = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^3 .$$

Для формы напряжения ШИМ - регулирование паузы

$$B_{m(1)} = \frac{2U_m}{\pi^2 f \omega S_c} (\gamma_u)^2 \frac{\cos \pi \frac{\gamma_u}{2}}{1 - \gamma_u^2}, \quad \text{где } f = 1/2 \cdot T_u . \quad (4.19)$$

Для прямоугольного двухполярного импульса с ШИМ (рис. 4.4,б)

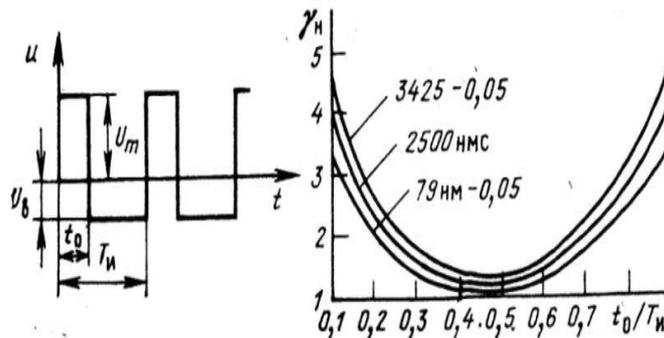


Рис.4.3. Зависимость коэффициента несинусоидальности γ_H от t_0/T_u прямоугольных импульсов;

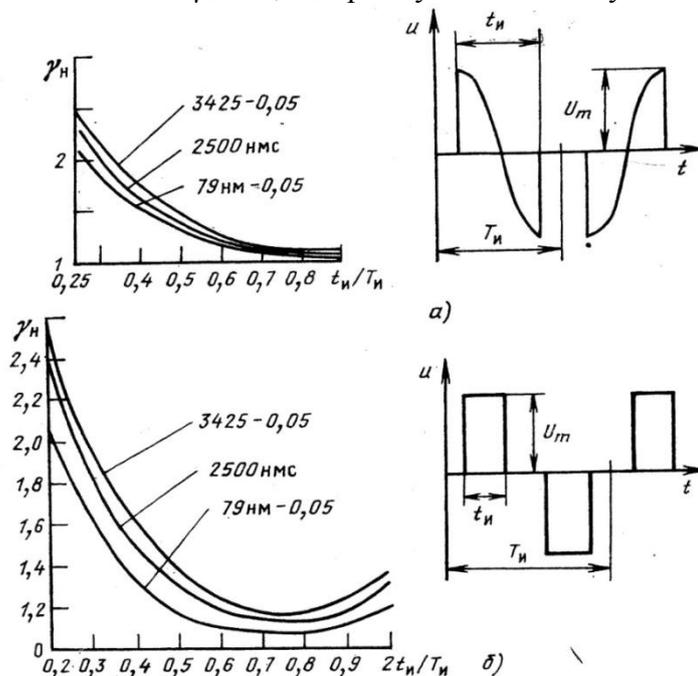


Рис. 4.4. Зависимость коэффициента несинусоидальности γ_H от t_u/T_u для некоторых форм кривых напряжения.

$$B_{m(1)} = \frac{U_m \sin \pi \gamma_u \cdot 2}{\pi^2 f \omega S_c}; \quad \text{где } f = 1/T_u, \gamma_u = t_u/T_u ; \quad (4.20)$$

$$B_{1m} = \frac{U_m + U_B}{\pi^2 f \omega S_c} \sin \pi \frac{t_0}{T_u} \quad (4.21).$$

Подобные вычисления можно выполнить для любой скважности $q=1/\gamma_u$ воздействующего напряжения заданной формы. Зависимость $\gamma_n=f(\gamma_u)$ для прямоугольного импульса приведена на рис. 4.3.

На рис. 4.4 показаны зависимости $\gamma_n=f(\gamma_u)$ для двух других форм напряжения, имеющих место в ИВЭП.

4.4. Добавочные потери в обмотках ФМЭ

Известно, что сопротивление усредненного проводника на переменном токе больше, чем омическое сопротивление на постоянном токе.

Вследствие поверхностного эффекта вытеснения тока на периферийной области уменьшается эффективное сечение проводника, а сопротивление и потери возрастают на величину добавочных потерь: $P_{\sim} = I^2 R_{\sim} = I^2 R_{доб} \cdot R_0$.

Добавочные потери учитываются коэффициентом добавочных потерь: $k_{доб} = P_{об\sim}/P_{об0}$, где $R_{об\sim}$; $R_{об0}$ - сопротивление обмотки на переменном и постоянном токе. В общем случае добавочные потери в обмотках ФМЭ обусловлены следующими явлениями: поверхностным эффектом, от тока протекающего по проводнику, при этом вытеснение происходит в радиальном направлении; вытеснение тока магнитным полем соседних проводов обмотки.

В ФМЭ считают, что вытеснение тока преимущественно происходит только в одном радиальном направлении.

К добавочным потерям в обмотке, связанным со скин-эффектом, следует отнести также потери, вызванные уравнительными токами. Последние возникают в параллельных проводах, которыми может быть намотана обмотка при больших значениях тока.

Добавочные потери для цилиндрической обмотки, для случая $0 \leq X \leq 1$, наиболее распространенном на практике, намотанной прямоугольным проводом, определяется по формуле:

$$k_{доб} \approx 1 + (m^2/9)x^4, \quad (4.22)$$

где $x = b_n \sqrt{\mu_a \omega \gamma / 2}$; b_n - ширина проводника в радиальном направлении; m - число слоев обмотки (число проводников обмотки в радиальном направлении), если в окне сердечника намотано две обмотки (у трансформатора - первичная и вторичная обмотки, у реактора - две полуобмотки (в последнем случае m - число проводников одной полуобмотки)).

Для обмотки, выполненной проводом круглого сечения для случая $0 \leq x \leq 1$:

$$k_{доб} \approx 1 + (m^2/15)x^4, \quad (4.23)$$

где
$$x = \frac{d_0}{2} \sqrt{\mu_a \omega \gamma}, \quad (4.24)$$

d_0 - диаметр провода без изоляции; для медного провода:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-6}} = 5,88 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}} \right); \quad \mu_a = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\text{Гн}}{\text{см}} \quad (4.25)$$

Если ток в обмотке ФМЭ несинусоидален, то для расчета добавочных потерь можно воспользоваться уравнениями для синусоидального тока, разложив несинусоидальную функцию в ряд Фурье [4]. При этом коэффициент добавочных потерь будет определяться:

$$k_{\text{доб}} = \frac{\sum_n I_{(n)}^2 k_{\text{доб}(n)}}{I^2}, \quad (n=1,2,3\dots) - \text{номер гармоники}, \quad (4.26)$$

где $I, I_{(n)}$ – действующее значение тока и действующий ток на n -ой гармонике; $k_{\text{доб}(n)}$ – коэффициент добавочных потерь, определяемый при синусоидальном воздействии частоты $n \cdot \omega$; $\omega = 2\pi/T_u$ – основная гармоника несинусоидального тока. Коэффициент добавочных потерь однослойных цилиндрических реакторов, намотанных сплошным круглым проводом [4;5]

$$k_{\text{доб}} = \frac{R_{\sim}}{R_0} = H + u \left(\frac{d_0}{c} \right)^2 \cdot G, \quad (4.27)$$

где H и G – коэффициенты из табл. 4.2; $u = u_1 + u_2$ – из табл. 4.3; d_0/c – отношение диаметра неизолированного провода к расстояниям между центрами соседних витков; l – длина реактора; D – диаметр реактора; u_1 – коэффициент, учитывающий влияние радиальной составляющей поля; u_2 – коэффициент, учитывающий влияние основной составляющей магнитного поля; R_0 – сопротивление обмотки на постоянном токе.

Для однослойных реакторов с плотной намоткой круглым сплошным проводом коэффициент $k_{\text{доб}}$ определяется по уравнению

$$k_{\text{доб}} = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \alpha_1 H + (\beta_1 u_1 + \gamma_1 u_2) \frac{d_0}{c} \cdot G \quad (4.28)$$

Значения коэффициентов $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ зависят от отношения d_0/c и приведены в табл.4.4, остальные обозначения те же.

Коэффициент добавочных потерь литцендрата (многожильного провода)

$$k_{\text{доб}} = \frac{R_{\sim}}{R_0} = H + \left[S + u \left(\frac{d_0}{c} \right)^2 \right] \frac{d_s}{d_0} \cdot n_{\text{ж}}^2 \cdot G \quad (4.29)$$

Значения коэффициентов Н и G

Таблица 4.2

$x = \frac{d_0}{2} \cdot \sqrt{\omega \mu_a \gamma}$	H	G	$x = \frac{d_0}{2} \cdot \sqrt{\omega \mu_a \gamma}$	H	G
0,0...0,4	1,000	X ⁴ /64	1,6	1,033	0,0863
0,5	1,000	0,00097	1,8	1,052	0,1265
0,6	1,001	0,00202	2,0	1,078	0,1724
0,7	1,001	0,00373	2,5	1,175	0,2949
0,8	1,002	0,00632	3,0	1,318	0,4049
0,9	1,003	0,01006	3,5	1,492	0,4987
1,0	1,005	0,01519	4,0	1,678	0,5842
1,2	1,011	0,03059	4,5	1,863	0,669
1,4	1,020	0,541	5,0	2,043	0,755

Значения коэффициентов u₁ и u₂

Таблица 4.3

l/D	u ₁	u ₂	u=u ₁ +u ₂	l/D	u ₁	u ₂	u=u ₁ +u ₂
0,0	3,29	0,00	3,29	2	1,11	5,47	6,58
0,2	3,13	0,50	3,36	4	0,51	7,23	7,74
0,4	2,83	1,23	4,06	6	0,31	8,07	8,38
0,6	2,51	1,99	4,50	8	0,21	8,52	8,73
0,8	2,22	2,71	4,93	10	0,17	8,73	8,90
1,0	1,94	3,85	5,29	∞	0,00	9,87	9,87

Значения коэффициентов α₁, β₁, γ₁ для различных значениях x

Таблица 4.4

$\frac{d_0}{c}$	x=1			x=2			x=3			x=4			x=5		
	α ₁	β ₁	γ ₁	α ₁	β ₁	γ ₁	α ₁	β ₁	γ ₁	α ₁	β ₁	γ ₁	α ₁	β ₁	γ ₁
1,0	1,01	1,2	0,96	1,09	1,34	0,67	1,31	2,29	0,49	1,43	3,61	0,43	1,50	4,91	0,41
0,9	1,00	1,02	0,97	1,06	1,29	0,72	1,20	1,99	0,55	1,30	2,75	0,49	1,37	3,39	0,46
0,8	-	1,02	0,98	1,04	1,23	0,78	1,13	1,73	0,62	1,21	2,12	0,55	1,25	2,48	0,53
0,7	-	1,02	0,98	1,02	1,18	0,83	1,08	1,52	0,68	1,12	1,71	0,62	1,15	1,94	0,60
0,6	-	1,01	0,99	1,00	1,13	0,87	1,04	1,36	0,75	1,07	1,51	0,70	1,09	1,60	0,68
0,5	-	1,01	0,99	-	1,09	0,91	1,02	1,24	0,82	1,03	1,32	0,78	1,04	1,37	0,76
0,4	-	1,01	0,99	-	1,06	0,94	1,01	1,14	0,88	1,02	1,19	0,85	1,02	1,22	0,84
0,3	-	1,00	1,00	-	1,04	0,97	1,00	1,06	0,93	1,00	1,10	0,91	1,00	1,11	0,90
0,2	-	-	-	-	1,01	0,99	-	1,03	0,97	-	1,04	0,96	-	1,05	0,96
0,1	-	-	-	-	1,00	1,00	-	1,01	0,99	-	1,01	0,99	-	1,01	0,99

где d_0 – общий диаметр многожильного провода (литцендрата); c – расстояние между центрами соседних витков; d_s – диаметр отдельной жилы литцендрата; $n_{жс}$ – число жил; s – постоянная зависящая от $n_{жс}$ (см. табл. 4.5);

$$G \text{ и } H - \text{ из табл. 4.2 для } x = \left(\frac{d_s}{2}\right) \sqrt{\mu_a \omega \gamma} \quad (4.30)$$

Значения коэффициента S от числа жил

Таблица 4.5.

n _ж	3	9	27	∞
s	1,55	1,84	1,92	2

Для многослойных реакторов, намотанным сплошным круглым проводом коэффициент $k_{доб}$ равен:

$$k_{доб} = \frac{R_{\sim}}{R_0} = H + \frac{1}{4} \left(\frac{klm}{D} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{c} \right)^2 \cdot G \quad (4.31)$$

где k – постоянная, зависящая от типа намотки – определяется по кривым (рис. 4.5) $k \cdot l/D = f(D/l)$; G и H – из табл. 4.2.

Для многожильного провода уравнение (4.31) принимает вид:

$$k_{доб} = H + \left[S + 0,25 \left(\frac{klm}{D} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{c} \right)^2 \right] \left(\frac{d_s}{d_0} \right)^2 \cdot n_{ж}^2 \cdot G \quad (4.32)$$

Для тороидальных реакторов $k_{доб}$ определяется по уравнениям (4.31) и (4.32). Они применимы ко всем многослойным реакторам: для соленоидов (при $t/D \rightarrow 0$, см. рис.4.5), для дисковых (при $D/l \rightarrow \infty$). При этом учитываются следующие изменения в обозначениях: D – наружный диаметр тороида; $l = \pi D$ – внешний периметр сечения намотки; c – расстояние между центрами прилегающих витков одного слоя по наружному краю; k – постоянная, зависящая от отношений, приведенных в табл. 4.6, а, б.

Табл.4.6,а.Значение коэффициента **K** при круглом поперечном сечении тороида

Отношение диаметра намотки к наружному диаметру	K	Отношение диаметра намотки к “ D ”	K
0,05	2,110	0,30	3,327
0,1	2,243	0,35	3,978
0,15	2,409	0,40	5,180
0,2	2,602	0,45	8,341
0,25	2,913		

Табл.4.6,б.Значения коэффициента **K** при прямоугольном поперечном сечении тороида

Отношение радиальной глубины намотки к “ D ”	Отношение l/D (аксиальной длины) к наружному диаметру			
	0,125	0,25	0,375	0,5
0,1	2,25	2,25	2,26	2,26
0,2	2,65	2,67	2,69	2,70
0,3	3,37	3,47	3,54	3,58
0,4	5,25	5,68	5,96	6,14

Применение многожильного провода (литцендрата) на высоких частотах выгодно тем, что снижается коэффициент добавочных потерь $k_{доб}$, провод становится более гибким и технологичнее осуществлять намотку, чем сплошным проводом того же сечения. Многожильные провода изготавливаются из изолированных проводников круглого сечения. Число проводников в радиальном направлении “ n_p ” в одном проводе определяется по эквивалентному квадратному $n_p = \sqrt{n_{ж}}$, где $n_{ж}$ – число жил в литцендрате.

В [4] указано, что отношение сопротивления литцендрата ($n_{ж}=100$) диаметром 1мм на $f=500\text{кГц}$ к сопротивлению сплошного провода одинакового сечения при той же частоте составляет $0,706$.

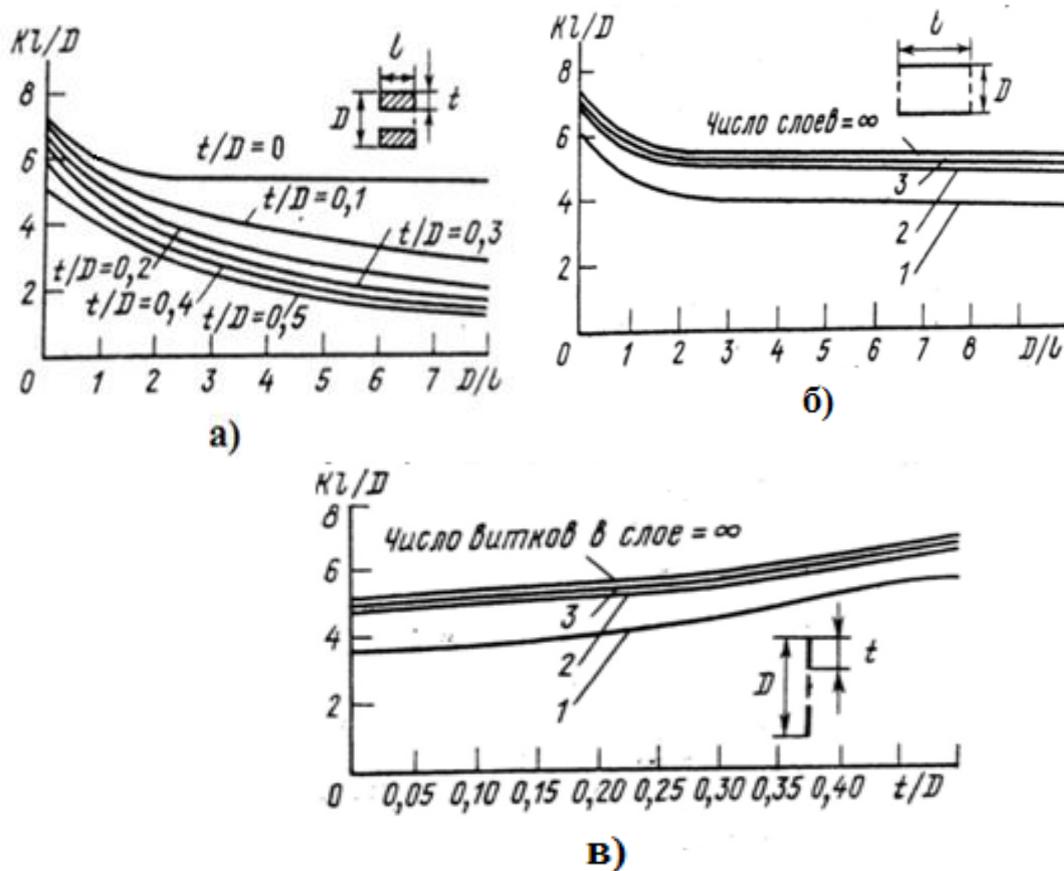


Рис. 4.5. Значения постоянной K для многослойных катушек:

На рис.4.5 показаны значения коэффициентов α, β и γ для различных значений x . На этом рисунке показаны:

- а) – катушки многослойные с большим числом витков в слое;
- б) - соленоиды с большим числом витков и N слоями);
- в) - многослойные галетные (дисковые) катушки с малым числом витков в слое. **Примечание:** цифрами обозначено число слоёв в катушке.

Малые сечения проводников литцендрата или медной фольги толщиной 0,1...0,2 мм исключают эффект вытеснения тока к поверхности проводника, т.е. не меняется его удельное сопротивление. Вид изоляции влияет на стоимость обмоточных проводов и на коэффициент заполнения окна K_{OK} магнитопровода. Материал обмоточных проводов (медь или алюминий) выбирается с учётом величины напряжения и частоты, температуры нагрева катушек и магнитопровода, а следовательно и токов обмоток.

Глава 5. Расчет реакторов и дросселей повышенной частоты

5.1. Параметры дросселей и реакторов

В ИВЭП реактор (дроссель) предназначен для накопления магнитной энергии с последующим возвращением ее в электрическую цепь. Основным параметром является его индуктивность (или коэффициент самоиндукции), определяемая по формуле

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{w\Phi}{i} = \frac{w^2}{R_M} = \frac{\mu_\alpha w^2 S_C}{L_c}, \quad (5.1)$$

где ψ – потокосцепление; i – ток в реакторе.

Магнитное сопротивление дросселя R_M представляет собой сумму магнитного сопротивления сердечника R_C и магнитного сопротивления воздушного зазора R_3 , т.е.

$$R_M = R_C + R_3 = \frac{L_c}{\mu_\alpha S_C} + \frac{\delta}{\mu_0 S_C} \quad (5.2)$$

При отсутствии зазора δ в сердечнике $R_M = R_C$, а $R_3 = 0$.

Из уравнений (5.1) и (5.2) видно, что индуктивность дросселя зависит от квадрата числа витков и магнитного сопротивления, которое в свою очередь зависит от магнитной проницаемости μ , где $\mu_\alpha = \mu_0 \cdot \mu = \mu \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \text{ Гн/см}$. Реактор (дроссель), кроме индуктивности, ещё обладает и емкостью.

Эквивалентная схема реактора приведена на рис. 5.1.

Эквивалентная емкость C (рис. 5.1) обусловлена емкостью обмотки относительно магнитопровода и корпуса, емкостями между отдельными слоями обмотки и емкостями между витками. Расчет емкостей обмоток аналогичен расчету для трансформатора. На высокой частоте в магнитопроводе дросселя появляются существенные потери мощности в стали P_C . Метод расчета потерь рассмотрен выше в главе 3. В эквивалентной схеме дросселя (реактора) эти потери учитываются сопротивлением $R_{\Pi} = U^2/P_C$,

(U – действующее значение напряжения на дросселе). На высокой частоте за счёт вытеснения тока к поверхности, сечение проводника уменьшается, а его сопротивление должно

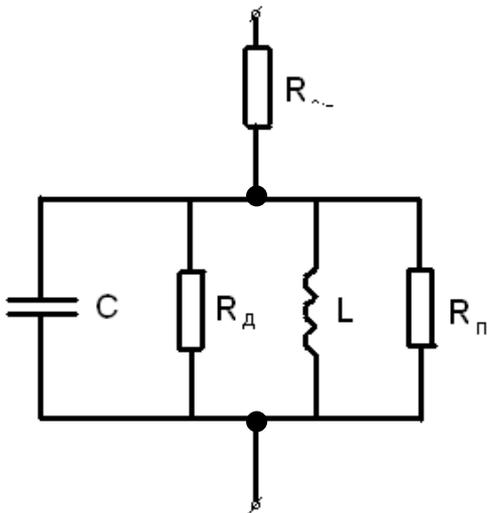


Рис.5.1. Эквивалентная схема дросселя

увеличиваться (сопротивление обмотки на реактора

повышенной частоте повышается и на рис.5.1 обозначено как R_n), а на постоянном токе, как R_0 (омическое), при этом уменьшается индуктивность дросселя. Уменьшение последней зависит от конструкции обмотки и от выбранного провода (круглого или прямоугольного сечения, либо выполненного в виде медной или алюминиевой фольги, либо ленты).

В однослойных и одновитковых обмотках дросселей, выполненных круглым или прямоугольным проводом, уменьшение индуктивности незначительно зависит от роста частоты. Это связано с тем, что перераспределение тока по сечению проводника практически не меняет картину магнитного поля во внешнем, относительно провода, пространстве. Это поле, в основном, и определяет индуктивность.

В многослойных обмотках размагничивающее действие вихревых токов, возникающих в обмотке на повышенной частоте, весьма заметно уменьшает магнитный поток, проходящий через область обмотки, а следовательно, согласно (5.1) уменьшает индуктивность.

Изменение индуктивности при различных частотах определяется по уравнениям [3...5] для низкой частоты ($\lambda > r_{np}$)

$$L_n = L_o [1 - 1/15 (r_{np}/\lambda)^4]$$

для высокой частоты ($\lambda < r_{np}$)

$$L_g = L_o \lambda / 2r_{np} \cdot (1 + 1/2 \cdot m^2)$$

где L_o – индуктивность многослойной обмотки на частоте $f=0$;

$\lambda = 2 \cdot \sqrt{\pi / f \cdot \mu_a \cdot \gamma}$ – длина электромагнитной волны при синусоидальном токе;
 r_{np} – радиус провода; m – число слоев обмотки; для меди $\gamma = 1/\rho = 5,88 \cdot 10^5$ – удельная проводимость; $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см.

Запасенная дросселем энергия определяется из формулы [6,9]

$$W_{max} = L \cdot I_{max}^2 / 2 = L \cdot I^2,$$

где I_m, I – амплитудное и действующее значение переменного тока.

Если по обмотке дросселя протекает переменный ток I и постоянный ток I_o , то энергоемкость реактора

$$W = L \cdot (I_o^2 + I^2). \quad (5.3)$$

Добротности обмотки $Q_{об}$, магнитопровода Q_c и диэлектрика Q_d определяются по формулам соответственно

$$Q_{об} = \omega L / R_{\sim}; \quad Q_c = R_n / \omega L; \quad Q_d = R_d / \omega L,$$

где $R_{об} \approx R_n, R_d$ – сопротивление обмотки; сопротивление, учитывающее потери в стали сердечника; сопротивление изоляции (диэлектрика).

При проектировании дросселя следует учитывать, что рабочая частота $\omega^2 LC \gg 1$ должна быть существенно ниже резонансной частоты. С учетом этого, пренебрегая слагаемыми второго порядка, получим, что добротность равна

$$Q = (1/Q_{об} + 1/Q_c + 1/Q_d)^{-1} \approx (1/Q_{об} + 1/Q_c)^{-1} \quad (5.4)$$

Из уравнения (5.4) вытекает:

на добротность реактора сильно влияет качество магнитопровода и изоляции;

для увеличения добротности Q_d необходимо использовать изоляционные материалы с низкими значениями относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $tg \delta$;

для увеличения Q_c следует применять ферриты и магнитоэлектрики, либо использовать воздушные реакторы. Индуктивность последнего не зависит от величины протекающего по нему тока.

Для увеличения добротности дросселей в магнитопровод вводят немагнитный зазор в виде электрокартона, текстолита или пластины из цветного металла, у которых $\mu \approx 1$.

Дроссель (реактор) имеет 9 основных параметров:

1. V_c – объем магнитопровода ($см^3$);
2. W – энергоемкость ($Вт \cdot с$);
3. Q – добротность (безразмерная величина);
4. τ – температура перегрева ($^{\circ}C$);
5. μ_a – магнитная проницаемость сердечника ($Гн/м$);
6. ρ – удельное сопротивление провода ($Ом \cdot см$);
7. f – частота ($Гц$);
8. A – параметр, характеризующий потери в сердечнике ($А \cdot см/В \cdot с^{0.5}$);
9. α_T – коэффициент теплоотдачи ($Вт/см^2 \cdot ^{\circ}C$).

Размерностей- 5. Полная система критериев подобия состоит из:

$$\Pi_1 = 1/\mu_a \cdot A \cdot \sqrt{f}; \quad \Pi_2 = f \cdot \mu_a \cdot k_{OK} \cdot V_c^{0,666}/\rho; \quad \Pi_3 = f \cdot w/\alpha_T \cdot \tau \cdot V_c^{0,666};$$

$$\Pi_4 = \sqrt{A \cdot \rho/k_{OK}} \cdot Q/f^{0,25} \cdot V_c^{0,333}.$$

Как указано выше из критериев $\Pi_1 - \Pi_3$ можно образовать обобщенный критерий $D = \Pi_3/\sqrt{\Pi_1 \cdot \Pi_2}$. С учетом, что $\rho^{0.5}/\alpha_T \approx 1$, получим критериальный комплекс по энергоемкости и добротности:

$$D_w = \sqrt{\frac{A}{k_{OK}}} \cdot \frac{W \cdot f^{0.75}}{\tau \cdot V_c} \approx 0.3, \quad (5.5)$$

$$D_Q = \sqrt{\frac{A}{k_{OK}}} \cdot \frac{Q}{f^{0.25} V_c^{0.333}} \approx 100. \quad (5.6)$$

Влияние немагнитного зазора на ФМЭ

Введение немагнитного зазора преследует несколько целей:

1) получить из нелинейной вебер–амперной характеристики зависимость $B=f(H)$ близкую к линейной, что позволяет в дросселе фильтра уменьшить намагничивающее влияние постоянной составляющей тока I_0 . Если к дросселю приложено напряжение, содержащее переменную U_{\sim} и постоянную составляющие

$$u = u_0 + u_{\sim} = u_0 + u_m \sin \omega t, \quad (5.7)$$

то вызываемый U_o магнитный поток Φ_o сильно зависит от величины зазора. Это видно из закона Ома для магнитной цепи с зазором.

$$\Phi_o = \frac{I_o w}{R_c + R_3}, \quad R_3 = \frac{\delta}{\mu_o \cdot S_c}, \quad (5.8)$$

где δ - зазор, L_c - длина средней силовой линии сердечника, S_c - площадь сердечника, μ_o - постоянная магнитная проницаемость. Ток I_o в обмотке W дросселя определяется только ее активным сопротивлением. На переменную составляющую потока Φ_{\sim} зазор оказывает меньшее влияние $\frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{u_{\sim}}{w}$;

2) при прямоугольной или другой симметричной, относительно оси абсцисс, форме напряжения, в силу неидентичности выходного каскада или из-за неодинакового числа витков вторичной обмотки схемы со средней точкой возникает несбалансированная постоянная составляющая тока I_o , вызывающая постоянную Φ_o . Последняя гасится немагнитным зазором. Величина зазора выбирается такой, чтобы: а) сопротивление $R_3 = (0,7-0,9) R_m$; б) индуктивность намагничивания при $\delta \neq 0$ в сердечнике должна быть такой, чтобы: $R_3 > R_c$; $L_{In} = (5-10) R'_n$, где L_{In} - индуктивность намагничивания; R'_n - приведенное сопротивление нагрузки;

3) индуктивность дросселя с зазором с малой индуктивностью на большие токи рассчитывается по уравнению

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{I w^2}{\frac{L_c}{\mu_a S_c} + \frac{\delta}{\mu_o S_c}} = \frac{w^2 S_c}{L_c} \cdot \mu_{\text{ЭК}}, \quad (5.9)$$

где $\mu_{\text{ЭК}} = \frac{\mu_a}{1 + \mu \cdot \delta / L_c}$ - эквивалентная абсолютная магнитная проницаемость.

Формула (5.9) получена в предположении, что относительная $\mu = \text{const}$;

4) при приложении напряжения U (уравнение(5.7)) можно увеличить μ . При $\Phi_{\sim} = \text{const}$ постоянную составляющую потока Φ_o можно менять (см. (5.8));

5) Объем магнитопровода дросселя можно уменьшить путем подбора величины зазора. Энергоемкость дросселя

$$L \cdot I^2 = \frac{\mu_{\text{ЭК}} \cdot S_c \cdot w^2}{L_c} \cdot \frac{H^2 \cdot L_c}{w^2} = \mu_{\text{ЭК}} \cdot H^2 \cdot V_c \quad (5.10)$$

Откуда объем равен $V_c = LI^2 / (\mu_{\text{ЭК}} H^2)$. Ток I находим по закону полного тока $I = H \cdot l / w$, где H - напряженность магнитного поля. Индуктивность дросселя с зазором на эквивалентной схеме можно представить параллельным соединением L_c и L_3 и рассчитать по формуле [3,4,6]

$$L = \frac{w^2}{\frac{L_c}{\mu_a \cdot S_c} + \frac{\delta}{\mu_o \cdot S_c}} \quad (5.11)$$

Критическое значение немагнитного зазора определяется из уравнения.

$$\delta_{KP} = \frac{L_c}{\mu} \left(\sqrt{\frac{Q_{OB}}{Q_c}} - 1 \right) \approx \frac{L_c}{\mu} \sqrt{\frac{Q_{OB}}{Q_c}} . \quad (5.12)$$

На повышенных частотах в сердечнике вблизи зазора возникают дополнительные потери мощности. Поэтому, чтобы обеспечить допустимый перегрев ФМЭ, следует увеличить поверхность охлаждения, т.е. объем ФМЭ.

5.2. Расчет дросселя фильтра

1) Если в дросселях фильтров постоянная составляющая тока $I_o \gg I$, то поверхностный эффект вытеснения тока незначителен и поэтому $K_{\delta ob} \approx 1$. При работе дросселя с заданной скважностью $q = T_u/t_w$, объем магнитопровода определяется по уравнению:

$$V_c = \sqrt{\frac{A \cdot \gamma_H \cdot K_3 \cdot K_{DOB} \cdot K_t}{k_{OK}}} \cdot \frac{W \cdot f^{0.75}}{0,3 \cdot \Delta T} \left[\frac{1 + 3e^{+(1-q)}}{4} \right] \quad (5.13)$$

По объему сердечника из справочника или по (табл.П.1-8) определяются все геометрические размеры.

2) В дросселях фильтров с зазором выбор немагнитного зазора состоит в том, чтобы энергоемкость и добротность дросселя при прочих равных условиях должны быть максимальными.

Для дросселей фильтров, у которых $I_o \gg I$ потери в магнитопроводе и добавочные потери в обмотке незначительны. Основные потери в обмотке, определяемые омическим сопротивлением, равны

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{ob} \approx \Delta P_{ob} = j^2 \cdot k_{OK} \cdot \rho \cdot V_{ob} \quad (5.14)$$

или по перегреву

$$\Delta P = \alpha_T \cdot \tau \cdot S_{охл} \approx 13 \cdot \alpha_T \cdot \tau \cdot V_c^{0,666} \quad (5.15)$$

коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ (Вт/см}^2 \cdot ^\circ\text{C)} . \quad (5.16)$$

Полная поверхность охлаждения дросселя

$$S_{охл} \approx 13 V_c^{0,666} .$$

При наличии зазора $\mu_{ЭК}$ равна $\mu_{ЭК} \approx \frac{L_c}{\delta}$

поскольку для применяемых магнитопроводов и магнитных материалов $\mu \delta_3 \gg 1$.

Согласно (5.10) индуктивность равна

$$L = \mu_o \cdot \mu_{ЭК} \cdot k_{OK} \cdot S_{OK}^2 \cdot S_c \cdot j^2 / (I_{эф}^2 \cdot L_c) \quad (5.17)$$

Число витков определено из условия полного заполнения площади окна S_{OK}

обмоткой $w = \frac{k_{OK} \cdot S_{OK} \cdot j}{I_{\Delta\phi}}$, где $I_{\Delta\phi} = \sqrt{I_0^2 + I^2}$

С учетом (5.17) индуктивность определяется по формуле

$$L = \mu_0 \mu_{\text{эк}} k_{OK}^2 j^2 \cdot V_C^{1,666} \cdot 1,69 \cdot 10^{-2} / I_{\Delta\phi}^2. \quad (5.18)$$

Величина $\mu_{\text{эк}}$ может быть получена из (5.14), (5.15) и (5.17) с учетом, что $W = LI_{\Delta\phi}^2$

$$\mu_{\text{эк}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot W}{1,69 \cdot 10^{-2} \cdot 13 \cdot \mu_0 \cdot k_{OK} \cdot \alpha_T \cdot \tau \cdot V_C^{1,333}} \quad [\text{в (5.19 и 5.21) } \mathbf{W}\text{-энергия}] \quad (5.19)$$

Заменив $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\Gamma_H}{\text{см}}$, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $k_{OK} = 0,25$ окончательно получим

$$\mu_{\text{эк}} = \frac{5 \cdot 10^3}{\alpha_T \cdot \tau \cdot V_C^{1,333}} \cdot W, \quad (5.20)$$

Из уравнений (5.16) и (5.20) определим оптимальное значение немагнитного зазора

$$\delta = \frac{L_C}{\mu_{\text{эк}}} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\alpha_T \cdot \tau \cdot L_C V_C^{1,333}}{W} \quad (5.21)$$

3) По расчетной индуктивности из уравнения (5.17) находим число витков

$$w = \sqrt{\frac{L \cdot L_C}{\mu_0 \cdot \mu_{\text{эк}} \cdot S_C}} \quad (5.22)$$

По площади S_{OK} с учетом k_0 и (5.22) определим сечение провода

$$S_{np} = \frac{k_{OK} \cdot S_{OK}}{w} \quad (5.23)$$

По справочнику находим марку провода -П.9.

Пример 5.1. Расчет ФМЭ с зазором для фильтра

Определить параметры дросселя фильтра.

Исходные данные: индуктивность $L = 3 \text{ мГн}$, ток $I_0 = 10 \text{ А}$, ток $I = 1 \text{ А}$, $f = 1 \text{ кГц}$, температуры: $t_{OC} = 50^\circ \text{ C}$, перегрева $\tau = 70^\circ \text{ C}$.

1. Для такой частоты можно использовать магнитопровод из электротехнической стали (ЭТС), например 3423, толщиной 0,08 мм. По табл. 3.1 для этой стали находим $A = 580$, коэффициент резки $k_p = 1,5$ - по табл.1.1. Следовательно, $A = 580 \cdot 1,5 = 870$.

2. Объем магнитопровода находим по (5.13) (W -энергия дросселя)

$$V_C = \sqrt{\frac{A \cdot k_t}{k_{OK}} \cdot \frac{W \cdot f^{0,75}}{0,3 \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{870 \cdot 1,4}{0,25} \cdot \frac{0,303 \cdot 1000^{0,75}}{0,3 \cdot 70}} = 178,6 \text{ см}^3$$

Энергоемкость дросселя согласно (5.3) равна

$$W = L(I_0^2 + I^2) = 3 \cdot 10^{-3} (100 + 1) = 0,303$$

В формуле (5.13) принято $k_{ок} = 0,25$, $K_t = 1,4$, $\gamma_H = 1$, $K_{дооб} = 1$, $K_3 = 1$, скважность $q = 0$, поскольку мала переменная составляющая тока.

3. По табл. ПЗ выбираем магнитопровод типа ШЛ25×40 со следующими параметрами: объем $V_c = 187,4 \text{ см}^3$, $S_c = 8,8 \text{ см}^2$, $S_{ок} = 15,6 \text{ см}^2$, длина силовой линии l_c .

4. По (5.21) определяем величину зазора

$$\delta = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\alpha_T \cdot \tau \cdot L_c \cdot V_c^{1,333}}{W} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 21,3 \cdot 187,4^{1,333}}{0,303} = 1,26 \text{ см},$$

где $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{°С}}$ - при естественной конвекции.

5. Определяем $\mu_{эк} = \frac{L_c}{\delta} = \frac{21,3}{1,26} = 16,9$

6. По формуле (5.22) находим число витков дросселя

$$w_{dp} = \sqrt{\frac{L \cdot L_c}{\mu_0 \cdot \mu_{эк} \cdot S_c}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 21,3}{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 16,9 \cdot 12,5}} = 155 \text{ ВИТКОВ}$$

7. определяем (5.23) сечение провода обмотки

$$S_{np} = \frac{k_{ок} \cdot S_{ок}}{w_{dp}} = \frac{0,25 \cdot 15,6}{155} = 2,5 \text{ мм}$$

что соответствует проводнику диаметром 1,8 мм. Выбираем по ГОСТ 7262-98 провод ПЭВ-2 $\varnothing 1,8$ мм или по П.10-П.12.

5.3. Порядок расчета коммутирующих дросселей преобразователей с принудительной коммутацией

1. Для надежного запираания тиристоров в автономных инверторах, тиристорных регуляторах переменного напряжения и конверторах дроссели должны обладать высокой добротностью Q . В связи с этим объемом магнитопровода, определенный по (5.5) позволяет реализовать энергоемкость W и не может обеспечить добротность Q .

Воспользовавшись уравнением (5.6), который с учетом дополнительных факторов равен

$$D_Q = \sqrt{\frac{A \cdot \gamma_H \cdot k_3 \cdot k_{дооб} \cdot k_t}{k_{ок}}} \cdot \frac{Q}{f^{0,25} \cdot V^{0,333}} = 100 \quad (5.24)$$

Определяем объем магнитопровода V_c и сравниваем его с объёмом V_c , рассчитанным по (5.13), после чего выбираем наибольший объем, а по табл. П.1-П.8 определяем остальные геометрические параметры.

2. Затем определяется оптимальное значение индукции B_m . Для этого следует учесть мощность потерь в магнитопроводе ΔP_c и в обмотках $\Delta P_{об}$, которые рассчитываются по уравнениям

$$\Delta P_{об} = j^2 \cdot \rho \cdot V_{об} \cdot k_{ок} \cdot k_{дооб} \cdot k_t \approx 2 \cdot j^2 \cdot \rho \cdot k_{ок} \cdot k_t \cdot k_{дооб} \cdot V_c$$

где $V_{об} k_{ок} = 2V_c k_{ок}$ – объем занимаемый активным материалом обмотки.

3. При высокой добротности синусоидальное напряжение на дросселе определяется $U = wLI$. По закону электромагнитной индукции B_m определяется

$$B_m = \frac{U}{k_\phi \cdot f \cdot w \cdot S_c} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot I}{4,44 \cdot w \cdot f \cdot S_c} \quad (5.25)$$

Из (5.25) число витков обмотки дросселя $w_{оп} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot I}{4,44 \cdot B_m \cdot S_c}$. Мощность потерь обмотки с учетом (5.25) определяется по выражению

$$\Delta P_{об} = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot w_{оп}^2 \cdot k_{дооб} \cdot k_t \cdot \ell_{об}}{k_{ок} \cdot S_{ок}}$$

С учетом того, что $L \cdot I^2 = W$, $S_{ок} \cdot \ell_{об} = V_{об} = 2V_c$, а $S_{ок} S_c = 0,13 \cdot V_c^{1,333}$, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ (Ом · см), $K_{ок} = 0,25$ из последнего уравнения получим

$$\Delta P_{об} \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{W}{B_m} \right)^2 \cdot \frac{k_{дооб} \cdot k_t}{V_c^{1,666}} \quad (5.26)$$

Полные потери дросселя равны

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{об} = A \cdot f^{1,5} \cdot B_m^2 \cdot V_c + 1,7 \cdot 10^{-6} \left(\frac{W}{B_m} \right)^2 \cdot \frac{k_{дооб} \cdot k_t}{V_c^{1,666}} \quad (5.27)$$

Из (5.27) определяем оптимальную индукцию, при которой достигается минимум потерь

$$B_{m_{опт}} = \frac{0,203 \cdot \sqrt{W} \cdot \sqrt[4]{k_{дооб} \cdot k_t}}{V_c^{0,666} \cdot f^{0,875}} \quad (5.28)$$

4. При оптимальной индукции $B_{m_{опт}}$ мощности потерь будут равны, т.е. $P_c = P_{об}$. Уточняем число витков обмотки дросселя

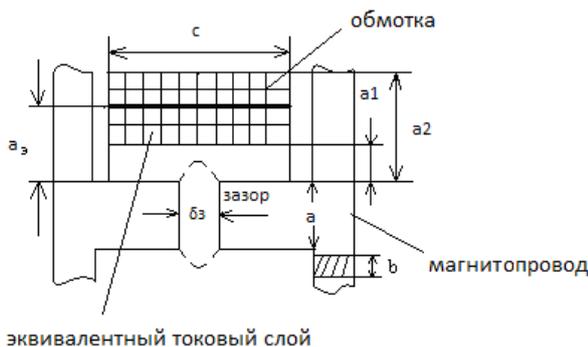
$$w_{оп} = \frac{2\pi \cdot L \cdot I}{4 \cdot k_\phi \cdot S_c \cdot B_m}$$

Оптимальный магнитный зазор находится из уравнения

$$\delta = \frac{L_c}{\mu} \left(\frac{\mu}{\mu_{эж}} - 1 \right) \approx \frac{L_c}{\mu_{эж}}, \quad \text{откуда} \quad \mu_{эж} = \frac{L \cdot L_c}{\mu_0 \cdot w_{оп}^2 \cdot S_c}$$

5. Добротность реактора определяется по формуле

$$Q = \frac{I^2 \cdot W \cdot L}{I^2 \cdot R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot W}{\Delta P} = 76,2 \cdot V_c^{0,333} \cdot f^{0,25} \cdot \sqrt{(A \cdot k_3 \cdot k_{дооб} \cdot k_t)^{-1}} \quad (5.29)$$



где R - сопротивление в последовательной схеме реактора, обусловленное полными потерями;

$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{об} = 2\Delta P_{об}$. Уравнение (5.26) с учетом (5.28) примет вид

$$\Delta P = 8,24 \cdot 10^{-2} \cdot V_c^{-0,333} W \cdot f^{0,75} \sqrt{A \cdot k_3 \cdot k_{дооб} \cdot k_t} \quad (5.30)$$

Рис. 5.2. Параметры катушки и магнитопровода

В (5.30) потери мощности вблизи зазора учтены коэффициентом зазора $k_3 = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_{C1}}$, где $\Delta P_C = \Delta P_{C1} + \Delta P_{C2}$ – полные потери в магнитопроводе; потери в

массе магнитопровода $\Delta P_{C1} = P_{y\delta} \cdot V_C = P_0 \left(\frac{f}{f^*} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_m}{B_m^*} \right)^\beta V_C$. Потери вблизи зазора

$\Delta P_{C2} = \Delta P_g \cdot k_G^2$, где k_G – коэффициент уменьшения магнитной проводимости за-

зор G_{M3} , закрытого обмоткой $k_G = \frac{\ln \frac{2 \cdot c_3}{\delta} + \frac{\pi \cdot a_3}{4 \cdot c} - \frac{3 \cdot a_3}{8 \cdot c^2}}{\ln \left(\frac{4c}{\delta} \right) + \ln 2}$, или

$$k_G = \frac{\ln \frac{2 \cdot h_{ок}}{\delta} + \frac{\pi \cdot c_0}{4 \cdot h_{ок}} - \frac{3 \cdot \left(\frac{c_0}{2} \right)^2}{8 \cdot h_{ок}}}{\ln \cdot \left(\frac{4h_{ок}}{\delta_3} \right) + \ln 2}. \quad (5.31)$$

Мощность потерь выпучивания определяется по формуле, которая выведена при условии, что магнитное напряжение U_{Mm} приблизительно равно МДС $F = H_{Mm} \cdot \delta$ [5]

$$\Delta P_b = \frac{1}{2\pi} \ln \cdot \left(2\sqrt{\frac{b}{\delta}} + 1 \right) \cdot (f \cdot w_{DP} \cdot I_m \cdot b \cdot \mu_0)^2 \gamma \cdot \delta \cdot F_b \quad (5.32)$$

Формула (5.32) справедлива для синусоидального тока. При несинусоидальном периодическом токе P_b находится

$$\Delta P_b = \frac{1}{2\pi} \ln \left(2\sqrt{\frac{b}{\delta}} + 1 \right) (w_{DP} \cdot b \cdot \mu_0)^2, \\ \gamma \cdot \delta \cdot F_b \cdot \sum (I_{m(n)} \cdot f_{(n)})^2,$$

(5.33)

где n – число учитываемых гармоник; γ – удельная проводимость материала сердечника; δ – зазор (см).

Параметры катушки и магнитопровода иллюстрирует рис. 5.2, где a и b – ширина стержня и ширина ленты; $S_c = ab$ – площадь стержня; $a_3 = (a_1 + a_2) \cdot 0,5$ – эквивалентный токовый слой; $c = h_k$ – высота обмотки (катушки), (см) – размер.

Амплитуда магнитного напряжения U_{Mm} в зазоре определяется по уравнению

$$U_{Mm} = H_{Mm} \delta = \frac{B_m \delta}{\mu_0} \quad (5.34)$$

Функция геометрических параметров F_b определяется

$$F_b = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{L_c}{b} + 1 \right) \ln \left[\left(\frac{L_c}{b} + 1 \right) \frac{4b^2}{\delta_3^2} \right] + \left(\frac{1}{L_c/b} - 1 \right) + \frac{1}{2^2} \left[\left(\frac{1}{L_c/b} + 1 \right)^2 - 1 \right] + \dots \quad (5.35)$$

Потери мощности вблизи открытого зазора (не закрыт обмоткой) определяется по (5.32), но вместо $I_m w_{др}$ подставляется U_{Mm} . При одном зазоре $L = \frac{L_0}{2}$, где L_0 - длина средней силовой линии сердечника.

6. Сечение провода подбирается из уравнения мощности потерь в обмотке

$$\Delta P_{об} = 2 \cdot V_C \cdot k_{ок} \cdot \rho \cdot j^2 \cdot k_{доб} \cdot k_t \quad (5.36)$$

В этой формуле при заданном перегреве неизвестными являются плотность тока j и $K_{доб}$. Мощность потерь в обмотке $\Delta P_{об} = \Delta P_C = A \cdot f^{1.5} \cdot B_m^2 \cdot V_C$ известна, т.к. B_m определяется по (5.28). Задаваясь приближенным (оценочным) значением находим плотность тока

$$j = \sqrt{\frac{\Delta P_C}{2 \cdot V_C \cdot k_{ок} \cdot \rho \cdot k_{доб} \cdot k_t}} \quad (5.37)$$

Выбираем сечение провода $S_{np} = \frac{1}{j}$. Если выбрать литцендрат, например

ЛЭТЛО, при этом можно увеличить плотность тока и уменьшить расход меди. Наружный диаметр проволок литцендрата следует подставлять с учетом изоляции.

В этом случае число слоев в радиальном направлении равно

$$m = \frac{w_{др}}{h_{ок} / d_{np}} \quad (5.38)$$

где число витков дросселя определяется по формуле

$$w_{др} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot I}{4,44 \cdot S_C \cdot B_m} = \frac{L \cdot I_m}{S_C \cdot B_m} \quad (5.39)$$

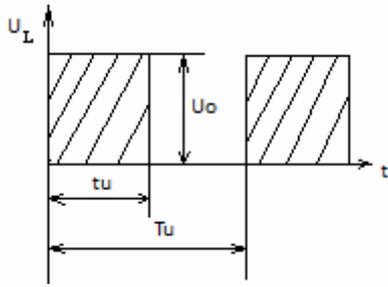
Эквивалентное число проводников в радиальном направлении в каждом проводе $n_p = \sqrt{n_{жс}}$, где $n_{жс}$ - число жил (проводников) в многожильном проводе.

7. Коэффициент добавочных потерь согласно (4.23) равен

$$k_{доб} = 1 + \frac{(m \cdot n_p)^2}{15} \cdot x^4 \quad (5.40)$$

где $x = d_B \sqrt{w \cdot \mu_a \cdot \frac{\gamma}{2}}$, $\gamma = 5,88 \cdot 10^5$ - для меди; $\omega = 2\pi \cdot f$.

8. Потери мощности в обмотке дросселя $\Delta P_{об} = R_0 \cdot I^2 \cdot k_{доб} \cdot k_t$,



где $R_0 = \frac{L_{об} \cdot w}{\gamma \cdot S_{np}}$ - омическое сопротивление обмотки при $f=0$.

Общие потери мощности $\Delta P = \Delta P_{OB} + \Delta P_C$

Рис. 5.3. Однополярные импульсы напряжения

5.4. Особенности расчета дросселей при импульсных напряжениях (с большой скважностью)

При однополярных импульсах напряжения (рис. 5.3) процессы в магнитопроводе ФМЭ определяются теми же физическими явлениями, что и при периодическом напряжении. В магнитопроводе с зазором зависимость $B_m = f(H_m)$ близка к линейной или линейная, вследствие чего сердечник не входит в насыщение. Особенности расчета дросселей при импульсном однополярном напряжении, применяемых в импульсных стабилизаторах напряжения, следующие:

1. Рассчитывается или задается индуктивность, приложенное значение напряжения U_0 , частота $f = \frac{1}{T_u}$, длительность действия импульса t_u , температура окружающей среды и перегрева;
2. Выбирается материал магнитопровода;
3. Определяется оценочное (приближенное) значение объема сердечника

по формуле
$$V_C = \sqrt{\frac{A \cdot k_3 \cdot k_{об} \cdot k_t}{k_{OK}}} \cdot \frac{W_u \cdot f_u^{0,75}}{0,3 \cdot \tau} \cdot \frac{1 + 3e^{1-q}}{4}, \quad (5.41)$$

где $W_{II} = L \cdot I^2$ — энергоемкость дросселя при импульсном напряжении; I — действующее значение тока за время t_u ; A -коэффициент удельных потерь магнитопровода определяется по (3.5) для частоты f_u и предварительного значения B_m ;

$q = \frac{T_u}{t_u}$ -скважность.

После расчета B_m значение A корректируется (с учетом коэффициента резки). Энергия дросселя определяется по уравнению

$$W_{II} = \frac{(U_0 \cdot t_u)^2}{2 \cdot L} \quad (5.42)$$

По расчетному значению V_C выбирается тип магнитопровода и его размеры.

4. Установлено в [4;5], что время действия импульса t_{II} среднее по значению магнитной индукции получит приращение $\Delta B_{CP} = \frac{1}{w_{ДР} \cdot S_C} \int_0^t u_1(t) dt = \frac{U_0 \cdot t_u}{w \cdot S_C}$, при этом $B_m = 4\Delta B_{CP}$, где u_1 - мгновенное напряжение на обмотке. Оптимальное значение приращения индукции дросселя равно

$$\Delta B_{CP} = \frac{7,3\sqrt{W_u \cdot t_0}}{\delta_{л}^{0,5} \cdot V_c^{0,666}} \sqrt[4]{\frac{\rho \cdot k_{дооб} \cdot k_t}{\gamma_{лс} \cdot k_{ок}}} \quad (5.43)$$

После подстановки $\rho_0 = 1,7 \cdot 10^{-6}$ (Ом·см) для медного провода, $\gamma_c = 2 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ для стали, $k_{дооб} = 2$, $k_{ок} = 0,25$ и $k_t = 1,4$, уравнение (5.43) принимает вид

$$\Delta B_{cp} = \frac{4,1 \cdot 10^{-2} \sqrt{W_u \cdot t_0}}{\delta_{л}^{0,5} V_c^{0,666}} (B \cdot c / \text{см}^2) \quad (5.44)$$

5. Максимум КПД, минимум потерь и габаритов дросселя будут при $P_c = P_{об}$. Мощность потерь в стали определяется по выражению для удельных потерь, поглощаемых сердечником

$$P_{y0} = \frac{8\mu_a \cdot f \cdot H_0^2}{\pi} \left[\frac{\pi^2}{8} - \exp\left(-\frac{\pi^2 t_0^1}{\delta_{л}^2 \cdot \gamma \cdot \mu_a}\right) \right] \left(\frac{Bm}{\text{см}^3} \right) \quad (5.45)$$

В этом уравнении, как и в уравнении (4.5)

$$P_{y0} \approx \frac{\Delta B_{cp}^2}{2 \cdot \mu_a \cdot T_u} + \frac{\Delta B_{cp}^2 \cdot \delta_{л} \cdot \gamma_c}{12 \cdot t_0 \cdot T_u} \quad \text{при } t_0 \geq 10 \cdot \theta_e \quad (5.46)$$

Первое слагаемое в (5.46) – удельная мощность потерь намагничивания за время действия импульса t_0 ($\mu_a H_0^2 / T_u$), второе – потери на вихревые токи за время действия импульса; где $\delta_{л}$ – толщина листа магнитопровода, γ_c – удельная проводимость стали, θ_B – постоянная времени, определяемая по выражению: $\theta_B = \gamma_c \mu_a \delta_{л}^2 / (4\pi)$, H_0 – напряженность поля на поверхности проводящей среды за время действия t_0 прямоугольного импульса тока I_0 .

Мощность намагничивания зависит лишь от приращения ΔB_{cp} , а ток паузы, спадающий по экспоненте – от параметров нагрузки.

6. От формы напряжения зависят потери на вихревые токи. Для того, чтобы пользоваться уравнением (5.46) необходимо найти напряжение на обмотке дросселя $U_L \approx L di / dt$ и перейти по таблице (3.3) от действительного импульса $U_L(t)$ к прямоугольному со значениями U_0 , t_0 .

Для большинства случаев $t_0 \geq 10\theta_B$ поэтому потери в стали равны

$$P_c = \Delta B_{cp}^2 \delta_{л}^2 \gamma_c V_c / (12 t_0^2), \quad (5.47)$$

где
$$\Delta B_{cp} = U_0 t_0 / W_{оп} S_c \quad (5.48)$$

7. Напряжение U_0 можно связать с энергоемкостью W и индуктивностью L дросселя.

За время действия напряжения U_0 ток нарастает до величины

$I_m = \frac{1}{L} \int_0^{t_0} U_0 \cdot dt = \frac{U_0 \cdot t_0}{L}$, при этом будет накоплена энергия $W_u = LI_m^2/2$, а $U_0 = \sqrt{2W_u \cdot L}/t_0$, откуда определяется число витков обмотки дросселя

$$w_{\partial p} = \frac{U_0 \cdot t_0}{\Delta B_{cp} \cdot S_c} = \frac{\sqrt{2W_u \cdot L}}{\Delta B_{cp} \cdot S_c} \quad (5.49)$$

8. Потери в обмотке находятся по формуле

$$P_{об} = j^2 \cdot \rho \cdot w_{\partial p}^2 \cdot l_{об} \cdot K_{\partial об} \cdot K_t / (k_{ок} \cdot S_{ок}) \quad (5.50)$$

С учетом, что $LI^2 = W_u$, $S_{ок} L_{об} = V_{об} \approx 2V_c$, $S_c \cdot S_{ок} = 0,13V^{1,33}$ получим

$$P_{об} = \frac{2,36 \cdot 10^2 \cdot W_u \cdot \rho \cdot k_{\partial об} \cdot k_t}{k_{ок} \cdot V_c^{1,666} \cdot \Delta B_{cp}^2} \quad (5.51)$$

При выполнении дросселя на феррите или магнитодиэлектрике потери в сердечнике находятся по уравнению:

$$P_c = \frac{\pi \cdot \Delta B_{cp}^2 \cdot tg \delta}{8 \cdot t_0 \cdot \mu_a} \cdot V_c \quad (5.52)$$

где $tg \delta = \delta_B / t_0 + \delta_r H + \delta_n$ (см.2.1,а) тангенс полных потерь.

Для лучшего понимания темы рассмотрим пример при действии однополярного напряжения по рис. 5.3.

Пример5.2. Определение приращения индукции

Дано: индуктивность дросселя $L=50$ мкГн, напряжение $U_0 = 100V$, частота $f = \frac{1}{T_u} = 20$ кГц, $t_u = 0,2T_u$, $\tau = 70^0 C$, $t_{o,cp} = 50^0 C$, магнитопровод из сплава 50Н и из прессперма МП-140 (Мо-пермаллой), толщина листа $\delta_{л} = 0,02$ мм.

Рассчитать приращение ΔB_{cp} за время действия импульса напряжения $U_L(t)$. Амплитуда $B_m \approx 4\Delta B_{cp}$ [4].

Определяем вспомогательные параметры: $f_u = 1/t_u = 1/0,2T_u = 2 \cdot 10^4 / 0,2 = 100$ кГц,

скважность $q = \frac{T_u}{t_u} = 5$

а) Для сплава 50Н – 0,02 по таблице $p_0 = 0,123(Bm / cM^3)$; $\alpha = 1,2$; $\beta = 1,9$

При неизвестном значении индукции коэффициент потерь в единице объема равен

$$A = p_0 f^{(\alpha-1..5)} B_m^{(\beta-2)} \cdot (f^*)^{-\alpha} (B_m^*)^{-\beta} = 0,123 \cdot (1 \cdot 10^5)^{-0,3} \cdot (10^{-5})^{-0,1} \cdot 10^{(4\beta-3\alpha)} = 123$$

По таблице 1.1 находим коэффициент резки k_p . С учетом k_p коэффициент А равен

$$A = A \cdot K_p = 123 \cdot 2 = 246 \frac{A \cdot \text{см}}{B \cdot \text{с}^{0,5}}$$

Согласно таблице 3.2 для 50Н-0,02 при $B_m = 0,1 - 0,5 \text{мл}$ параметр А меняется от 300 до 239. Чаще всего предварительно принимают $K_{доо} = 2$, а $K_{ок} = 0,25$ и $K_3 = 1$. Определяем по (5.42) энергоемкость дросселя за время действия импульса

$$W_u = \frac{(U_0 \cdot t_u)^2}{2 \cdot L} = \frac{(100 \cdot 10^{-5})^2}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-4}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} \quad (5.53)$$

Рассчитываем объем сердечника дросселя по (5.41)

$$V_c = \sqrt{\frac{246 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,4}{0,25} \cdot \left[\frac{10^{-2} \cdot (10^5)^{0,75}}{0,3 \cdot 70} \cdot \frac{1}{4} \right]} = 35,2 \text{ см}^3$$

Этому объему соответствует ШЛ 16x20 с параметрами $V_c = 38,1 \text{ см}^3$, $S_c = 2,84 \text{ см}^2$, $l_c = 13,6 \text{ см}$, $S_c \cdot S_{ок} = 20,5 \text{ см}^4$, $S_{ок} = c \cdot h = 1,6 \cdot 4 = 6,4 \text{ см}^2$.

Определяем оптимальное значение индукции ΔB_{cp} за время действия одного импульса t_u

$$\Delta B_{cp} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{10^{-2} \cdot 10^{-5}}}{(2 \cdot 10^{-3})^{0,5} \cdot 38,1^{0,666}} = 0,256 \cdot 10^{-4} (B \cdot \text{сек}/\text{см}^2) = 0,256 \text{ Тл}$$

б). Для сплава МП-140, который часто применяется для дросселей по табл. для МП-140 $A = 634$ при $B_m = 0,1 \text{ Тл}$.

Объем магнитопровода находим по (5.41). С целью сокращения расчета

$$V_c = 3,81 \sqrt{634/246} = 61,2 \text{ см}^3$$

По табл. 2 новых сплавов выбираем сердечник 44x28-10,3 $S_c = 0,824 \text{ см}^2$, $l_c = 11,3 \text{ см}$, $V_c = 9,31 \text{ см}^3$, $S_{ок} = 6,51 \text{ см}^2$, $S_c \cdot S_{ок} = 5,071 \text{ см}^4$. Для реализации объема $V_c \approx 61,1 \text{ см}^3$ требуется семь колец, при этом площадь $S_c = 5,77 \text{ см}^2$, а объем $V_c = 65,1 \text{ см}^3$. Находим

$$\Delta B_{cp} = \frac{0,2 W_n^{0,5}}{V_c^{0,666}} \sqrt[4]{\frac{t_u \mu_a}{\text{tg} \delta}} = \frac{0,2 \sqrt{1 \cdot 10^{-2}}}{65,1^{0,666}} \sqrt[4]{\frac{10^{-5} \cdot 140 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9}}{0,066}} = 0,23 \cdot 10^{-4} \frac{B \cdot \text{с}}{\text{см}^2},$$

где $\text{tg} \delta = \frac{\delta_B}{t_u} + \delta_r H + \delta_n = \frac{0,45 \cdot 10^{-6}}{10^{-5}} + 0,625 \cdot 10^{-4} \cdot 300 + 2 \cdot 10^{-3} = 0,666$; $\delta_{вт}, \delta_r, \delta_n$ для

МП-140 по табл. 2.6. При $B_m \approx 0,05 \text{мл}$ ориентировочное значение $H = 300 \text{ А/м}$; $\mu_a = 140 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Гн/см}$.

Перегрев рассчитывается по мощности потерь ΔP и объему магнитопровода V_c за время t

$$\tau = 0,13 \cdot \Delta P \cdot t / V_c \quad (5.54)$$

Нагрев ФМЭ без отвода теплоты в окружающую среду находим по формуле

$$\tau_{\text{б/о}} \approx \Delta P \cdot t / (\alpha_T \cdot S_{\text{охл}} \cdot \tau) = \Delta P \cdot t / c, \quad (5.55)$$

где $\tau = 500 V_c^{0,333}$, $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-3} (B \text{ м}/(\text{см}^2 \cdot ^\circ \text{C}))$, $S_{\text{охл}} \approx 13 V_c^{0,666}$, $c = \alpha_T \cdot \tau \cdot S_{\text{охл}} = 7,8 \cdot V_c$ - эквивалентная теплопроводность.

Время перегрева t с погрешностью 2% может быть определено при

$$t \leq 0,18 \cdot T. \text{ Время перегрузки будет } t \leq 0,18T = 90 V_c^{0,333} \quad (5.56)$$

Пример 5.3. Расчёт перегрева ФМЭ

Определить перегрев ФМЭ объемом $V_c = 50 \text{ см}^3$ при кратковременной перегрузке $t = 240 \text{ с}$ при мощности потерь $\Delta P = 250 \text{ Вт}$.

При соблюдении условия (5.56) $0,18 \tau = 90 \cdot 50^{0,333} = 332$ перегрев будет

$$\tau = 0,13 \cdot \Delta P \cdot t / V_c = 0,13 \cdot 250 \cdot 240 / 50 = 156^\circ \text{ C}.$$

5.5. Расчет реакторов

Реакторы (без магнитопровода) проектируются для реализации больших энергоемкостей, когда недопустим большой шум и требуется максимальная добротность. Реакторы изготавливаются цилиндрическими и тороидальными. Цилиндрические реакторы при одинаковых объемах с тороидальными имеют наибольшую индуктивность, но и наибольшее поле рассеяния в окружающее пространство. Преимущество реактора перед дросселем – постоянное значение индуктивности при изменении протекающего по нему тока, т.к. $\mu = 1$, а $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Гн/см}$.

Расчет воздушных цилиндрических реакторов производится так. При известном токе по плотности тока $j = 200-800 \text{ А/мм}^2$ определяется сечение и выбирается марка провода (П.10).

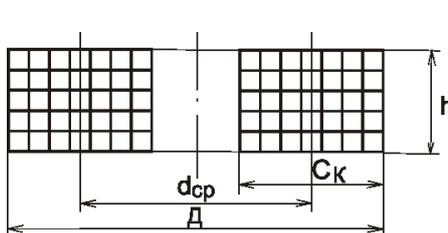
По заданной добротности Q определим необходимый объем цилиндрического реактора по допустимому значению его сопротивления.

$$R_{\sim} = V_Q \cdot K_{\text{доб}} \cdot K_t \cdot k_{OK} / (\gamma \cdot S_{np}^2) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L / Q \quad (5.57)$$

$$\text{Из (5.57) объем по добротности } V_Q = \omega \cdot L \cdot \gamma \cdot S_{np}^2 / (Q \cdot k_{OK} \cdot K_{\text{доб}} \cdot K_t) \quad (5.58)$$

На рис.5.4. показан цилиндрический реактор (катушка индуктивности) и его размеры: d_{cp} , C_k , h , D – средний диаметр обмотки, толщина катушки и ее высота, внешний диаметр.

Для медного проводника $\gamma = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, коэффициент заполнения медью



$k_{OK} = 0,5$, K_t определяется по (2.5.3.), $K_{\text{доб}}$ находится по параграфу 4.4

и часто $K_{\text{доб}} = 1$. Индуктивность катушки определяется по выражению [4]

$$L = 20 \mu_0 w_{dp}^2 d_{cp}^2 / [d_{cp} + 3(h + C_k)] \cdot 3\pi$$

Рис.5.4. Реактор

С учетом, что число витков $w_{dp} = k_{OK} C_k h / S_{np}$, получим уравнение (5.59)

$$L = 20 \cdot \mu_0 (d_{cp} \cdot h \cdot k_{OK} \cdot C_k)^2 / [d_{cp} + 3(h + C_k)] \cdot 3\pi \cdot S_{np}^2 = 20 \cdot \mu_0 \cdot k_{OK} \cdot V_L / [d_{cp} + 3(h + C_k)] \cdot 3\pi^3 \cdot S_{np}^2$$

где V_L – объем реактора по заданной индуктивности

$$V_L = \left(\frac{27 \cdot \pi^3 \cdot S_{np}^2 \cdot L}{20 \cdot \mu_0 \cdot k_{0K}^2 \cdot \sqrt[3]{3\pi}} \right)^{0.6} \quad (5.60)$$

Установлено, что максимальная индуктивность будет при $d_{cp}/h=3$ [4]

$$L_{max} = \frac{20 \cdot \mu_0 \cdot k_{0K}^2 \cdot V_L^2}{27 \cdot \pi^3 \cdot h \cdot S_{np}} = \frac{20 \cdot \mu_0 \cdot k_{0K}^2}{27 \cdot \pi^3 \cdot S_{np}^2} \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \pi \cdot V_L^5} \quad (5.61)$$

Если $V_Q > V_L$ (из уравнений (5.58) и (5.60)), то система может быть реализована по V_Q при математическом соотношении параметров h , d_{cp} и C_k .

Если же $V_L > V_Q$, то следует повторить расчет при другом сечении S_{np} . Если V_Q соответствует V_L (при заданной добротности Q и индуктивности L) реактор необходимо проверить на перегрев

$$\tau = \Delta P / (\alpha_T \cdot S_{охл}) = w \cdot W / (\alpha_T \cdot S_{охл} \cdot Q), \text{ при этом } d_{cp} = 3h \quad S_{охл} = 4 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \pi \cdot V^2},$$

откуда
$$\tau = f \cdot W \cdot \sqrt[3]{9 \cdot \pi} / (6 \cdot \alpha_T \cdot Q \cdot V^{0.666}) \quad (5.62)$$

Если расчетный по (5.62) перегрев не выше заданного, расчет можно закончить. При большом расхождении между ними следует провести новый расчет при большей плотности тока, т.е. при меньшем сечении проводника.

Тороидальная катушка представляет собой круглый провод большого сечения диаметром d свернутый кольцом с расстоянием между центрами кольца D , при этом кольцо имеет внутренний и наружный диаметры $D_{вн}$ и $D_{нар}$.

Установлено [4], что минимальный объем имеет тороидальная катушка при отношении $d/D=0,25$, а минимальную массу и длину провода при отношении $d/D=0,6$.

Индуктивность тороидальной катушки определяется

$$L = \frac{\mu_0 \cdot w_{dp}^2}{2} \cdot \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}} \quad (5.63)$$

$$\text{Искомая граничная частота равна } f_{cp} = 1,13 \cdot 10^{-4} \left(\frac{A \cdot \tau}{W} \right)^{0.666} \cdot Q^2 \quad (5.64)$$

Пример 5.4. Расчет цилиндрического реактора

Заданы: индуктивность $L=20$ мГн, синусоидальный ток $I=10$ А, $f=1000$ Гц, добротность $Q=80$, $t_{oc} = 50^\circ C$, перегрев $\tau = 70^\circ C$ [5].

1. Определим объемы реактора по добротности V_Q , по индуктивности V_L и по температуре V_T :

$$V_Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot \gamma \cdot S_{np}^2}{k_{OK} \cdot K_{доб} \cdot K_t \cdot Q} = \frac{2\pi \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 5.88 \cdot 10^5 \cdot 10^{-4}}{0.5 \cdot 1 \cdot 1.4 \cdot 80} = 2958 \text{ см}^3;$$

По (5.60):

$$V_L = \left(\frac{27\pi^3 \cdot 9 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{20 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 0.5^2 \sqrt[3]{3\pi}} \right)^{0.6} = 1079 \text{ см}^3;$$

$$V_T = \left(\frac{f \cdot W \cdot \sqrt[3]{9 \cdot \pi^2}}{6 \cdot Q \cdot \alpha_T \cdot \tau} \right)^{1.5} = \left(\frac{10^3 \cdot 2 \cdot 10^2 \cdot 10^2}{6 \cdot 80 \cdot 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot 70} \right)^{1.5} \cdot 3\pi = 3293 \text{ см}^3$$

В формулах: $\alpha_T = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{C})$; $\gamma = 5.88 \cdot 10^5 (1/\text{Омсм})$; $k_{OK} = 0.5$; $K_{доб} = 1$; $K_t = 1.4$. При плотности тока $j = 3.33 \text{ А}/\text{мм}^2$ сечение провода $S_{np} = 3 \text{ мм}^2$.

Расчеты показали, что только по V_T можно реализовать все требования, предъявленные к реактору.

2. Определяем геометрические размеры и число витков обмотки

$$h = \sqrt[3]{V_T / 3\pi} = \sqrt[3]{3293 / 3\pi} = 7 \text{ см}, \text{ при этом } d_{cp} = 3h = 21 \text{ см}, c_k = h = 7 \text{ см}$$

По (5.59) определяем индуктивность и находим число витков

$$w_{dp} = \sqrt{\frac{3\pi \cdot L}{20 \cdot \mu_0 \cdot h}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 3.14 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-9} \cdot 7}} = 327 \text{ вит.}$$

Принимаем $w_{dp} = 324 \text{ вит}$ для обеспечения полных рядов.

3. Определяем потери в обмотке ΔP , перегрев ΔT и $S_{охл}$

$$\Delta P = \tau \cdot \alpha_T \cdot S_{охл} = 70 \cdot 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot 1859 = 223 \text{ Вт}$$

$$S_{охл} = 4 \cdot \sqrt[3]{3\pi \cdot V^2} = 4 \cdot \sqrt[3]{3\pi \cdot 3293^2} = 1859 \text{ см}$$

Сопротивление переменному току $R \sim \Delta P / I^2 = 223 / 10^2 = 2.23 \text{ Ом}$

Сопротивление, определяемое через добротность, равно

$$R = \omega L / Q = 2\pi \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} / 80 \approx 1.57 \text{ Ом}$$

Следовательно, исходя из заданного перегрева и добротности, имеем:

$$R \sim K_t \cdot K_{доб} \cdot R_0 = 1.57 \text{ Ом}. \text{ При } S_{np} = 3 \text{ мм}^2, K_{доб} = 1 \text{ (из расчета).}$$

При указанных параметрах температуры $K_t = 1.4$, поэтому омическое сопротивление будет

$$R_0 = \frac{I}{\gamma} w_{dp} \frac{\pi \cdot d_{cp}}{S_{np}} = \frac{R}{K_t} = \frac{1.57}{1.4} = 1.12 \text{ Ом}$$

4. Сечение провода

$$S_{np} = \frac{w_{dp} \cdot \pi \cdot d_{cp}}{\gamma \cdot R_0} = \frac{324 \cdot 3.14 \cdot 21}{5.88 \cdot 10^5 \cdot 1.22} \approx 3.3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 = 3.3 \text{ мм}^2.$$

Примечание: диаметр жилки литцендрата зависит от частоты- при частоте

$f \leq 4\text{кГц}$ $d_s=0,51\text{мм}$, при $f \leq 10\text{кГц}$ $d_s=0,31\text{мм}$, при $f \leq 22\text{кГц}$ $d_s=0,23\text{мм}$ [5].
Количество жилок в проводе зависит от сечения.

По справочнику (или табл. П.11) выбираем провод ЛЭТЛО-4 (20 x 0,51) сечением $S_{np}=4\text{мм}^2$, диаметр неизолированного провода $d_0=3,2\text{мм}$, диаметр изолированного провода $d_s=3,6\text{мм}$, $d_s=0,51\text{мм}$.

Находим действительное значение $k_{ок}=wS_{np}/S_{об}=wS_{np}/h^2=324 \cdot 0,04/49 = 0,27$.

5. Определим реальный коэффициент добавочных потерь по формуле (4.32) – все размеры здесь в мм

$$K_{доб} = H + \left[S + \frac{1}{4} \left(\frac{K \cdot L \cdot m}{D} \right)^2 \left(\frac{d_o}{c} \right)^2 \left(\frac{d_s}{d_o} \right)^2 n^2 G \right] = 1 + [1,9 + 0,25(2,8 \cdot 18)^2 0,52^2] \cdot \left(\frac{0,5}{3,2} \right)^2 20^2 0,52 \cdot 10^{-4} \approx 1$$

Здесь: $H=1$, $G=x^4/64$ для

$$x = d_s \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \gamma / 2} = 0,05 \sqrt{6,28 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-9} \cdot 5,88 \cdot 10^5 / 2} = 0,24 \text{ по табл.4.2};$$

$S=1,9$ по табл.4,5 для $n=20$; отношение $\frac{K \cdot L}{D} = 2,8$ (из рис.4.4,а) для $L/D=0,25$ и $D/L=4$, $d_0/c = \sqrt{k_{ок}} = \sqrt{0,27} = 0,52$; $D = d + t = 21 + 7 = 28\text{см}$, число слоев при квадратном сечении обмотки (рис. 5.4) $m = \sqrt{\omega_{оп}} = \sqrt{324} = 18$.

Пример 5.5. Определение граничной частоты дросселя

Дано: индуктивность $L=10^{-2}\text{Гн}$, ток $I=3\text{А}$, перегрев $\Delta T = 60^\circ\text{С}$, $Q=15$.
Материал магнитопровода – ЭТС толщиной $\delta_l = 0,35\text{мм}$, для которой с учетом коэффициента резки коэффициент $A=1780$.

Сравним полученный объем с объемом дросселя на $f=1\text{кГц}$.

Решение.

Энергоемкость дросселя равна $W = LI^2 = 9 \cdot 10^{-2}\text{Дж}$.

По уравнению (5.64) граничная частота будет

$$f_{кр} = 1,13 \cdot 10^{-4} (\tau \cdot A / W)^{0,666} \cdot Q^2 = 1,13 \cdot 10^{-4} (60 \cdot 1780 / 9 \cdot 10^{-2})^{0,666} \cdot 10^2 = 125,5\text{Гц}.$$

Определим минимальный объем

$$V_{\min} = 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot Q^{1,5} \sqrt{W/\tau} = 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1780 \cdot 15^{1,5} \sqrt{9 \cdot 10^{-2} / 60} = 29,2\text{см}^3.$$

При тех же параметрах объем дросселя на $f=1000\text{Гц}$ будет

$$V_{cw} = 6,7 \cdot \sqrt{A} \cdot f^{0,75} \cdot W / \tau = 6,7 \cdot \sqrt{1780} \cdot 1000^{0,75} \cdot 9 \cdot 10^{-2} / 60 = 74,75\text{см}^3,$$

$$V_{CQ} = 8 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{A^3} \cdot Q^3 / f^{0,75} = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 1780^{1,5} \cdot 15^3 / 1000^{0,75} = 11,4\text{см}^3.$$

Расчет показывает, что объем дросселя с заданными параметрами следует выбирать по энергоемкости V_{cw} .

ГЛАВА 6. Расчёт трансформаторов повышенной частоты

6.1. Электромагнитные процессы в ТММ. Расчёт индуктивности рассеяния

В зависимости от требований нагрузки ИВЭП могут формировать жесткие, пологопадающие, крутопадающие и даже многозонные вольт-амперные характеристики (ВАХ).

Жесткие ВАХ характерны для согласующих трансформаторов с минимальным потоком рассеяния Φ_s , который не превышает 0,25% от основного потока $\Phi_0 = I_0 W_1 / R_M$, создаваемого током намагничивания, где $I_0 W_1 = F_0$ – намагничивающая сила (МДС); $R_M = L_c / \mu_a S_c$ – магнитное сопротивление сердечника сечением S_c и длина силовой линии L_c . Крутопадающие ВАХ, ограничения токов короткого замыкания в пределах до $2I_{ном}$, регулирование выходного тока и напряжения можно обеспечить за счёт изменения индуктивности рассеяния [3...5].

В трансформаторе согласно второму закону Кирхгофа для напряжений первичной W_1 и вторичной W_2 обмоток можно записать

$$u_1 = -e_1 - e_{s1} + i_1 r_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (6.1)$$

$$u_2 = -e_2 - e_{s2} + i_2 r_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} - i_2 r_2 \quad (6.2)$$

где e, u, i – мгновенные значения ЭДС самоиндукции, напряжения и тока обмоток; e_s – ЭДС рассеяния; $L_1 = L_{11} + L_{s1}$, $L_2 = L_{22} + L_{s2}$ – индуктивности, соответствующие сцеплению полных потоков $\Phi_1 = \Phi_0 + \Phi_{s1}$ и $\Phi_2 = \Phi_0 + \Phi_{s2}$ с обмотками W_1 и W_2 ; $M = M_{21} = M_{12} = L_1 / K_{тр}$ – взаимоиндуктивность между обмотками; r – активное сопротивление обмоток [9]. Индекс **1** относится к первичной обмотке W_1 , а индекс **2** – к вторичной; коэффициент трансформации $K_{тр} = W_1 / W_2$. Основной намагничивающий поток $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$ определяющий индуктивности $L_{11} = \Phi_0 \frac{W_1}{i_1}$ и $L_{22} = L_{11} \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2$ обмоток W_1 и W_2 замыкается по магнитопроводу, а его зависимость $\Phi_0 = f(i_0)$ представляет собой кривую намагничивания. Магнитное сопротивление R_M сердечника зависит от МДС относительной магнитной проницаемости и длины силовой линии L_c .

Одним из параметров, определяющих, качество работы трансформатора, является индуктивность рассеяния L_s как параметр схемы замещения трансформатора. При этом в качестве коэффициента приведения индуктивности рас-

сеяния вторичной обмотки к первичной используется коэффициент трансформации.

Потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} , определяющие индуктивности рассеяния

$$L_{s2} = L_1 - M \frac{W_1}{W_2} \text{ и } L_{s1} = L_2 - M \frac{W_2}{W_1} \text{ обмоток, в основном замыкаются вне}$$

магнитопровода по воздуху и каждый из них сцеплен только со своей обмоткой. ЭДС рассеяния e_s зависит от индуктивности рассеяния

$$e_s = -W \frac{d\Phi_s}{dt} = -L_s \frac{di}{dt}. \quad (6.3)$$

Следует заметить, что потоки рассеяния Φ_s соответствуют существующему потоку в трансформаторе только тогда, когда в обмотках создаются равные и противоположно направленные МДС $F_1=I_1W_1$ и $F_2=I_2W_2$ [4;13].

Естественно, что с увеличением тока нагрузки растёт величина индуктивного падения напряжения в обмотках. Поскольку ЭДС рассеяния e_s направлена встречно основной ЭДС- e , то для обеспечения жесткой ВАХ необходимо иметь минимальные потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} .

Трансформатор, в котором $r_1=0$, $r_2=0$, $L_{s1}=0$, $L_{s2}=0$, называют идеальным. В этом случае $L_1=L_2 \cdot K_{тр}^2$, $i_1=i_2 / K_{тр}$; $M = \sqrt{L_1 L_2} = \frac{L_1}{K_{тр}}$. Схема замещения трансформатора показана на рис 6.1 [4].

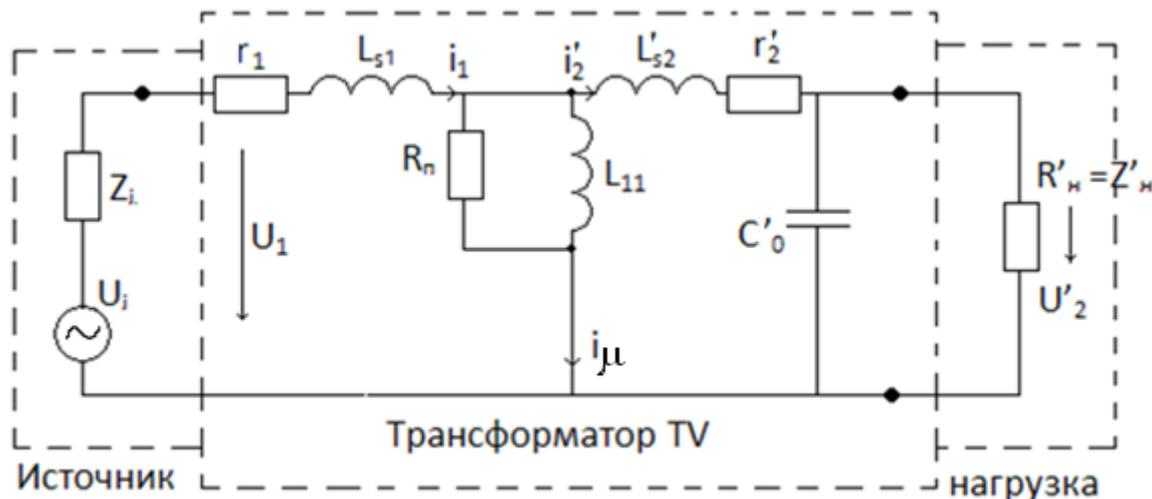


Рис. 6.1. Схема замещения трансформатора

Полная эквивалентная схема трансформатора с учётом параметров источника и нагрузки (R'_n соответствует Z'_n). Параметр со штрихом – приведенное значение этого параметра к первичной обмотке.

Здесь $i_\mu = i_1 - i'_2$ – ток намагничивания; R_n – сопротивление, учитывающее в эквивалентной схеме трансформатора потери в магнитопроводе. L_{11} – индук-

тивность обмотки W_1 трансформатора, обусловленная основным магнитным потоком Φ_0 ; C'_0 – ёмкость трансформатора, приведённая по виткам к одной из его обмоток.

Приведённые к первичной обмотке параметры TV:

$i'_2 = i_2 / K_{тр}$; $U'_2 = U_2 \cdot K_{тр}$; $r'_2 = r_2 \cdot K_{тр}^2$; $L'_2 = L_2 \cdot K_{тр}^2$; C'_0 – эквивалентная ёмкость (см. §6.7). Способов расчёта индуктивности рассеяния достаточно: метод Роговского, метод среднегеометрических расстояний (см. Расчёт индуктивностей/Л.А.Калантаров и Л.А.Цейтлин. –Л.: Энергия, 1970.-415с.) и др.

Метод Роговского В. основан на построении идеализированной картины магнитного поля обмоток трансформатора TV. Влияние искривления хода магнитных силовых линий на величину индуктивности L_S учитывается коэффициентом Роговского

$$K_R = 1 - \frac{C_{K1} + C_{K2} + C_{12}}{\pi h}, \quad (6.4)$$

где C_{K1} , C_{K2} , C_{12} – толщина катушек первичной и вторичной обмоток и расстояние (зазор) между ними; h – высота обмотки, (см). Значение индуктивности L_S двухобмоточного TV с учётом (6.4) по этому методу определяется по формуле

$$L_S = K_R \frac{\mu_0}{h} W_1^2 L_{об} \left(C_{12} + \frac{C_{K1} + C_{K2}}{3} \right), \quad (6.5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/см – магнитная постоянная; W_1 – число витков первичной обмотки; $L_{об}$ – средняя длина витка обмоток. По методу среднегеометрических расстояний индуктивность L_S рассчитывается по уравнению

$$L_S = \frac{\mu_0}{2\pi} W_1^2 L_{об} \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 \cdot g_2}, \quad (6.6)$$

где g_{12} – среднегеометрическое расстояние между сечениями обмоток; g_1 , g_2 – среднегеометрические расстояния сечений обмоток самих от себя. Учитывая возможные отклонения геометрических параметров обмоток от расчётных, а также малочувствительной к отклонениям логарифмической функции, в качестве g_1 и g_2 можно принять упрощённые выражения $g_1 = 0,223(h + C_{K1})$, $g_2 = 0,223(h + C_{K2})$, $g_{12} = 0,223h + 0,78(C_{12} + \frac{C_{K1} + C_{K2}}{2})$. Чаще всего в трансформаторах толщина катушек $C_{K1} = C_{K2} = C_K$, а $C_{12} \ll C_K$, то уравнения (6.5) и (6.6) принимают

вид
$$L_S \approx K_R \frac{2}{3h} \mu_0 W_1^2 L_{об} \approx \frac{2\mu_0}{3h} W_1^2 L_{об} C_K \quad (6.7)$$

$$L_S \approx \frac{2,5\mu_0 W_1^2 L_{об} C_K}{\pi h} \quad (6.8)$$

Уравнения (6.7) и (6.8) дают достаточно близкие значения L_S , что позволяет определять индуктивность L_S по любой из этих формул.

6.2. Параметры и геометрические соотношения в ТММ

Исходными данными для расчёта ТММ являются: мощность трансформатора, напряжение, частота сети, коэффициент трансформации и число вторичных обмоток, рабочая температура и перегрев. В результате расчёта должны быть определены геометрические размеры сердечника, выбран магнитный материал и найдены оптимальные значения индукции и плотности тока в обмотках, при которых может быть получена максимальная мощность ТММ.

Приближенно мощность ТММ можно определить по уравнению [5]

$$P = U \cdot I = K \cdot f \cdot k_{OK} k_{ЗС} \cdot B_m \cdot j \cdot S_C \cdot S_{OK} = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot S_C \cdot S_{OK} k_{OK} B_m \cdot j,$$

где K – коэффициент пропорциональности. Остальные коэффициенты как в (1.7). Выбирать высокие значения индукции B_m и плотности тока не всегда оправдано. В частности с увеличением индукции возрастают потери в магнитопроводе, а с увеличением плотности тока растут потери в обмотках.

В табл. 6.1 и 6.2 приведены значения B_m и j в функции мощности P , полученные в результате экспериментальных исследований для частот 50 и 400 Гц.

Зависимость магнитной индукции от мощности трансформатора Таблица 6.1

Конструкция магнитопровода	Марка стали, толщина, (мм)	Частота, Гц	Магнитная индукция B_m , Тл, при $\sum P_i$ (ВА)					
			5...15	5...50	50...150	150...300	300...1000	1000-2500
Бронева (пластинная)	1512 $\delta=0,35$	50	1,1...1,3	1,3	1,35-1,3	1,35	1,2...1,35	-
Бронева (ленточная)	3411 $\delta=0,35$	50	1,55	1,65	1,65	1,65	1,65	-
Стержневая (ленточная)	3411 $\delta=0,35$	50	1,5...1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7
Бронева (пластичная)	1521 $\delta=0,2$	400	1,1	1,2	1,2-1,15	1,15...1,0	1,0...0,8	0,8-0,65
Бронева (ленточная)	3421 $\delta=0,15$	400	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	-
Стержневая (ленточная)	3421 $\delta=0,15$	400	1,6	1,6	1,6-1,55	1,5-1,3	1,3-0,96	0,96-0,8

Приведенные значения B_m и j можно использовать как рекомендуемые для ТММ с двумя обмотками при $U \leq 500$ В. В связи с появлением новых магнитных

материалов (сплавов АМС и изготовленных по нанотехнологиям) таких сведений какие есть в табл 6.1 и 6.2 пока нет.

Зависимость плотности тока j от мощности трансформатора

Таблица 6.2

Конструкция магнитопровода	Марка стали, толщина, (мм)	Частота, Гц	Плотность тока, A/mm^2 , при $\sum P_i$ (ВА)					
			5-15	15-50	50-150	150-300	300-1000	1000-2500
Бронева (пластинчатая)	1512 $\delta=0,35$	50	3,9...3,0	3,0-2,4	2,4...2,0	2,0...1,7	1,7...1,4	-
Бронева (ленточная)	3411 $\delta=0,35$	50	3,8...3,5	3,5-2,7	2,7...2,4	2,4...2,3	2,3...1,8	-
Стержневая (ленточная)	3411 $\delta=0,35$	50	7...5,2	5,2-3,8	3,8...3,0	3,0...2,4	2,4...1,7	1,7...1,4
Бронева (пластинчатая)	1521 $\delta=0,2$	400	6,0	5,5-5,0	5,0...4,0	4,0...2,8	2,8...1,6	1,6...1,1
Бронева (ленточная)	1421 $\delta=0,1$	400	7,8-9,4	9,4-6,5	6,5...4,0	4,0...2,7	2,7...1,5	-
Стержневая (ленточная)	3421 $\delta=0,15$	400	11-9,6	9,6-5,6	5,6-3,5	3,5...2,8	2,8...1,8	1,8...1,4

Новые магнитные сплавы позволяют принимать значение индукции B_m на повышенных частотах выше, чем приведенные в табл 6.1.

ТММ, мощностью примерно до 4 кВА с естественным охлаждением при напряжении до 1кВ должны обладать определёнными соотношениями, устанавливающими связь геометрических параметров с мощностью P , частотой f , перегревом ΔT . Эти соотношения могут быть получены с помощью теории подобия. Последняя позволяет составить систему безразмерных критериальных зависимостей. Список основных параметров ТВ, как и у дросселей, насчитывает 9 величин:

1) объём V_c ($см^3$); 2) мощность P ($Вт$); 3) f – частота ($Гц$); 4) температура перегрева ΔT ($^{\circ}C$); 5) B_m – амплитуда магнитной индукции ($В \cdot с / см^2$); 6) μ_a – абсолютная магнитная проницаемость $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-9}$ ($Гн / см$ или $В \cdot с / А \cdot см$); 7) ρ – удельное электрическое сопротивление ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ $Ом \cdot см$ – для медного провода); 8) A – коэффициент, учитывающий свойства материала магнитопровода ($А \cdot см / В \cdot с^{0,5}$); 9) $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-3}$ ($Вт / (см^3 \cdot ^{\circ}C)$) – коэффициент теплоотдачи. Число основных размеров равно 5: ($см, ^{\circ}C, В, А, сек$). Как указано в [4,5], число критериев подобия должно быть равно разности основных величин и основных размерностей, т.е равно 4

$$P_1 = \frac{1}{A \cdot \mu_a \cdot \sqrt{f}}; P_2 = \frac{P \mu_a}{V_c \cdot B_m^2 \cdot f}; P_3 = \frac{\alpha_T \cdot \tau \cdot V_c^{0,666}}{P}; P_4 = V_c^{0,666} \cdot \frac{\mu_a \cdot k_{OK} f}{\rho} \quad (6.9)$$

Критерий подобия P_4 связывает мощность потерь в обмотке с её объёмом. Из-за сложности работы с четырьмя критериями подобия введены критериаль-

ные комплексы, являющиеся так же критериями подобия [4,5]

$$T_1 = \frac{1}{\Pi_3 \sqrt{\Pi_1 \Pi_4}}, \quad T = \frac{T_1}{\Pi_2}.$$

Воспользовавшись уравнениями (6.9) находим

$$T_1 = \sqrt{\frac{A}{k_{OK}}} \cdot \frac{P \cdot \rho^{0,5}}{\tau \cdot f^{0,25} \cdot V_c \cdot \alpha_m}; \quad T = \sqrt{\frac{A}{k_{OK}}} \cdot \frac{f^{0,75} B_m^2 \cdot \rho^{0,5}}{\mu_a \cdot \tau \cdot \alpha_m} \quad (6.10)$$

Видно, что для трансформаторов мощностей приведённых в табл 6.1 критерии подобия $T=0,01 \pm 0,001$, а $T_1=0,53-0,96$. Для расчётов принимают $T_1=0,7$ [4,5]. С учётом значений ρ и α_t для естественного охлаждения расчёт производится по формулам

$$T_1 \approx 0,7 = 1,1P \cdot \left(\frac{A}{k_{OK}}\right)^{0,5} / \tau \cdot f^{0,25} V_c, \quad (6.11)$$

$$T \approx 0,01 = 1,1 \cdot B_m^2 \cdot f^{0,75} \cdot \left(\frac{A}{k_{OK}}\right)^{0,5} / \tau \cdot \mu_a, \quad (6.12)$$

где k_{OK} – коэффициент заполнения окна проводом (табл. 1.4).

Последние уравнения (6.10) и (6.11) позволяют по исходным данным определить основные расчётные параметры: объём V_c и индукцию B_m . Поскольку в выражение для T входит абсолютная магнитная проницаемость μ_a материала, которая заранее неизвестна при нелинейной вебер-амперной характеристике, то B_m будет определяться по уравнению (6.19) и (6.20).

В табл 6.3 приведены значения критериев подобия оптимальных трансформаторов на частоте 50 Гц при перегреве $\Delta T=50^\circ \text{C}$ с максимальным КПД.

Индуктивность рассеяния L_s трансформатора может быть рассчитана с учётом размеров окна магнитопровода $C=C_{OK}$, $h=h_{OK}$

$$L_s = \frac{\mu_0 W_1^2 L_{об}}{2h_{OK}} \left(C_{12} + \frac{C_{K1} + C_{K2}}{3} \right) \approx \frac{\mu_0 W_1^2 L_{об} C_{OK}}{6h_{OK}}, \quad (6.13)$$

где $L_{об}$ – средняя длина витка обмотки.

Для геометрических размеров сердечника ТММ справедливы следующие соотношения

$$C_o = 0,52 V_c^{0,333}; \quad S_{OK} S_c / (L_{об} L_c) \approx 8,5 \cdot 10^{-3} V_c^{0,666} \quad (6.14)$$

Площади окна и сечения магнитопровода равны

$$S_{OK} = C_{OK} h_{OK}, \quad S_c = a \cdot b \cdot K_c \quad (6.15)$$

Критерии подбора оптимальных трансформаторов.

Таблица 6.3

Данные трансформатора	$\Pi_1 \cdot 10^9$	Π_2	Π_3	$\Pi_4 \cdot 10^{-5}$	T_1	$T \cdot 10^2$
ПЛ 12,5x16-25 P=16 Вт, V=23 см ³	8	55	25	7,2	0,53	1,0
ПЛ 12,5x20-30 P=39 Вт, V=39 см ³	8	67	14	11	0,76	1,12
ПЛ 20x40-50 P=180 Вт, V=153 см ³		79	8	36	0,74	0,92
ОЛ 20x40-10 P=6,1 Вт, V=6,9 см ³	8	67	30	32	0,66	1,0
ОЛ 80/128-40 P=440 Вт, V=280 см ³	8	88	5	54	0,96	1,1
ШЛ 16x16-25 P=24 Вт, V=31 см ³	8	54	20	10	0,56	1,03
ШЛ 40x80 P=1200 Вт, V=10 ³ см ³	8	80	4,2	165	0,67	0,89

Учитывая соотношения между геометрическими параметрами сердечника, а также между режимными параметрами, получаем

$$L_s = 3,37 \cdot 10^{-9} [U_1 / (f \cdot B_m)]^2 / V_c \quad (6.16)$$

где B_m – индукция в сердечнике, f – рабочая частота, V_c – объём стали магнитопровода, U_1 – напряжение первичной обмотки (В).

В (6.16) значения $K_{\text{доб}}=1$; $K_t=1$; где $K_t=1+0,004(T_p-20^0)$ (6.17) – коэффициент увеличения сопротивления медного проводника вследствие его нагрева. Для часто встречающихся случаев температура окружающей среды $t_{oc}=50^0C$ [1,3], температура перегрева $\tau=50^0-70^0C$, а рабочая (допустимая) температура достигает $t_p=t_{oc}+\tau=50^0+70^0=120^0C$, поэтому $K_t=1,4$.

Потери в магнитопроводе и обмотках находятся по уравнениям

$$P_c = A \cdot f^{1,5} \cdot B_m^2 \cdot V_c \quad (6.18)$$

$$P_{об} = 2\rho \cdot \frac{I^2 \cdot k_{доб} \cdot k_t \cdot W_1 \cdot L_{об}}{S_{np}} = \frac{1,62 \cdot 10^{-4} \cdot k_{доб} \cdot K_t}{V_c^{1,666}} \cdot \left(\frac{P}{f \cdot B_m} \right)^2 \quad (6.19)$$

Установлено, что минимальные потери в ТММ будут при равенстве $P_c=P_{об}$ [1,3,4]. На основании (6.19), (6.18) определяем оптимальное значение индукции B_m , соответствующей минимальным потерям [5]

$$\begin{aligned} B_m &= 0,113 \cdot P^{0,5} (k_{доб} \cdot k_t)^{0,25} / (A^{0,25} \cdot f^{0,875} \cdot V_c^{0,666}) = \\ &= \left[\frac{371 (\alpha_T \cdot \tau)^2 (K_{доб} \cdot K_t)^{0,25}}{(K_p \cdot P_{01} \cdot f^\alpha)^{1,75}} \sqrt{\frac{f}{P}} \right]^{(1,75\beta-0,5)^{-1}} \end{aligned} \quad (6.20)$$

Эта формула является основой для расчёта B_m ТММ. Обычно коэффициент $K_{\text{дооб}}=2-3$, а $K_t=1,4$ при $T_{o.c}=50^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T=70^{\circ}\text{C}$. Подставим эти значения в (6.20) и получим

$$B_m = \frac{0,146 \cdot P^{0,5}}{A^{0,25} f^{0,875} V_c^{0,666}} \cdot \quad (6.21)$$

При такой индукции в магнитопроводе при прочих равных условиях ТММ имеет минимальные массу и габариты.

При выбранном значении B_m плотность тока j является функцией геометрических расчётов ТММ

$$j = \frac{P}{\sqrt{2\pi} \cdot f \cdot S_{ok} \cdot S_c \cdot k_{ok} \cdot B_m} = \frac{P_{об}}{\left(2V_c \cdot \rho \cdot k_{ok} \cdot K_{\text{дооб}} \cdot K_t\right)^{0,5}} \cdot \quad (6.22)$$

С учётом плотности тока обмотках, мощность потерь в катушке находится по уравнению

$$P_{об} = 2V_c \cdot j^2 \cdot \rho \cdot k_{ok} \cdot K_{\text{дооб}} \cdot K_t = I^2 \rho \left(\frac{L_{np}}{S_{np}}\right) K_{\text{дооб}} \cdot K_t, \quad (6.22, a)$$

где $2V_c \cdot k_{ok} = V_{об} \cdot k_{ok}$ – объём, занимаемый материалом обмоток, т.к. $V_{об}=2V_c$;

ρ – удельное сопротивление обмоточного провода; L_{np} – средняя длина проводника обмотки. При условии $P_{об}=P_c$ из (6.22) определяется плотность тока $j^2 K_{\text{дооб}}$. Исходя из минимума потерь мощности в обмотке коэффициент $K_{\text{дооб}}=1,5-2$ [5]. Из (6.22) можно определить сечение провода $S_{np}=I/j$ или длину провода L_{np} .

При значении индукции B_m по (6.20), соответствующему максимальному КПД, т.е. минимальным потерям и максимальному объёму ТММ

$$L_s = \frac{3,62 \cdot 10^{-7} U_1^2 \cdot A^{0,5} V_c^{0,333}}{P \cdot f^{0,25}}, \quad (6.23)$$

где P – номинальная мощность трансформатора.

Индуктивное сопротивление рассеяния будет (с учётом(6.23))

$$\omega L_s = 2\pi f L_s = 2,28 \cdot 10^{-6} A^{0,5} f^{0,75} V_c^{0,333} R'_H \quad (6.24)$$

где $R'_H = U_1^2 / P$ – приведённое к первичной обмотке ТММ сопротивление нагрузки.

Индуктивность рассеяния можно определить через заданные для расчёта параметры трансформатора

$$L_s = 5,22 \cdot 10^{-7} \cdot U_1^2 \cdot A^{0,666} / (P^{1,5} \cdot f^{0,333} \cdot \tau^{0,5})$$

Итак, наименьшая индуктивность рассеяния трансформатора (пример 6.3) при прочих равных условиях будет при секционировании обмоток, при этом L_s уменьшается обратно пропорционально квадрату числа секций.

Обозначим $n = R'_n / \omega L_s$. Тогда, задаваясь определённой долей уменьшения мощности в нагрузке, определим $n = \sqrt{m / (1 - m)}$, где m – отношение выделяемой в нагрузке мощности, рассчитанной с учётом L_s , к мощности без учёта L_s . Задаваясь $m=0,7-0,98$ получим значения n , проведенные в табл.6.4.

Таблица 6.4

m	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,98
n	1,53	1,73	2,0	2,38	3,0	4,36	7,0

Например, на практике часто используется $m=0,9$, при котором $n=3$.

Тогда из уравнения (6.22) получим, что при $m=0,9$

$$\frac{R'_n}{\omega L_s} = 3 = \frac{4,4 \cdot 10^5}{\sqrt{A \cdot f^{0,75} V_c^{0,333}}} \cdot \quad (6.25)$$

Из последнего уравнения находим объём магнитопровода с учётом ωL_s

$$V_c = \frac{3,16 \cdot 10^{15}}{A^{1,5} f^{2,25}} \cdot \quad (6.26)$$

Объём магнитопровода трансформатора V_c , на котором может быть реализована мощность P при заданной частоте f с учётом добавочных потерь и перегрева (для упрощения принято $K_t=1$, $K_{доб}=1$)

$$V_c = \frac{1,5 \sqrt{A \cdot K_{доб} K_t / k_{ок}} \cdot P}{\tau \cdot f^{0,25}} \cdot \quad (6.27)$$

Уравнение (6.27) позволяет найти объём сердечника с учётом перегрева обмоток, при условии что $\omega L_s = X_s = 0$, а это справедливо для ограниченного диапазона частот. Формула (6.26) учитывает влияние ωL_s на параметры трансформатора без учёта перегрева. Из совместного решения (6.26) и (6.27) определяется значение критической (граничной) частоты

$$f_{cp} = \frac{3,98 \cdot 10^7 \sqrt{\tau / P}}{AK_p}. \quad (6.28)$$

Из уравнения (6.26) с учётом (6.28) находим минимальный объём трансформатора на критической частоте

$$V_{min} = 2,5 \cdot 10^{-2} A^{0,75} \left(\frac{P}{\tau}\right)^{1,125}. \quad (6.29)$$

Увеличение значения $f_{кр}$ по (6.28) для трансформаторов обычного исполнения может быть осуществлено: за счёт использования магнитных материалов с меньшими $P_{уд}$; уменьшением числа витков обмотки W_1 ; секционирования обмоток; изменения геометрии сердечника и т.п. Если $f > f_{cp}$, то объём ТММ перестаёт уменьшаться с ростом частоты; при $f > f_{cp}$ – подставляют в формулы $f_{cp} = f$.

По данным магнитопроводов, приведённых в ГОСТах, могут быть определены приближенные соотношения геометрических параметров сердечников и обмоток для трансформаторов с минимальными массой и габаритами (с учётом (6.13))

$$S_c S_{ок} = 0,13 \cdot V_c^{1,333}, \quad (6.30)$$

$$V_{об} = 2V_c; \quad V_{тр} = V_{об} + V_c \approx 3V_c \quad (6.31)$$

При известном объёме стали магнитопровода площадь охлаждения определяется из уравнения

$$S_{охл} = 13V_c^{0,666} \quad (6.32)$$

Соотношения (6.13), (6.30-6.32) справедливы для сердечников типа Ш, ШЛ, П, ПЛ нормального исполнения.

Пример 6.1 Расчет индуктивности рассеяния стержневого ТММ

Рассмотрим для сравнения расчёт индуктивности рассеяния трансформатора, выполненного на сердечнике ПЛ 25x50-80 с первичной W_1 и вторичной обмотками: 1 случай – (рис. 6.2,а) – полуобмотки размещены на обоих стержнях коаксиально (одна над другой) и соединены последовательно; 2 случай – первичная находится на одном стержне, а вторичная на другом (рис. 6.2,б).

Исходные данные: число витков обмотки $W_1=400$ вит, средняя длина витка $L_{об}=23$ см, высота обмотки $h=10$ см, толщина катушек (рис 6.2, а) $C_k=0,8$ см, расстояние между катушками $C_{12}=0,4$ см; для рис 6.2,б – $C_k=1,6$ см. Во втором

случае: толщина обмоток будет в два раза больше, чем в первом случае, поскольку на каждом стержне располагается первичная и вторичная полуобмотки.

Если обмотка $W1$ и обмотка $W2$ размещены на разных стержнях (рис. 6.2,б), то структура поля рассеяния в пределах каждой обмотки приблизительно сохраняется, поэтому остаётся неизменными L_{s1} и L_{s2} . Что же касается поля рассеяния вне обмотки, то оно в отличие от случая 1 (рис 6.2,а) существует во всём окружающем пространстве. Это эквивалентно увеличению параметра C_{12} . Эквивалентная величина C_{12} , обозначенная как C'_{12} , определяется по выражению $C'_{12} = R_{\vartheta} - R_{\text{вн}}$ (рис. 2.15).

Определим недостающие геометрические параметры:

$$R_{cp} = \frac{L_{o\delta}}{2\pi} = \frac{23}{6,28} = 3,66 \text{ см.}$$

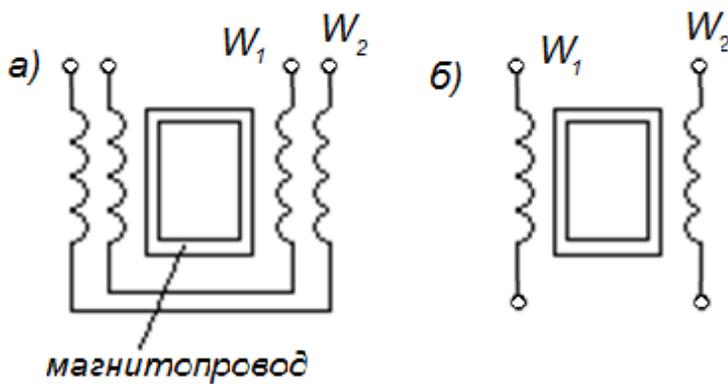


Рис.6.2. Размещение обмоток на магнитопроводе

Внутренний радиус $R_{\text{вн}} = R_{cp} + 0,5C'_k = 3,66 + 0,5 \cdot 1,8 = 4,46 \text{ см}$

$$R_{\vartheta} = \sqrt{3R_{\text{вн}}^2 + 2h^2} = \sqrt{3 \cdot 4,46^2 + 2 \cdot 10^2} = 13,33 \text{ см.}$$

Находим $C'_{12} = R_{\vartheta} - R_{\text{вн}} = 13,33 - 4,46 = 8,67 \text{ см}$

Поскольку на каждом стержне (рис 6.3,а) размещены полуобмотки $W1$ и $W2$, то для получения полной индуктивности L_S индуктивности каждого стержня суммируются. Будем иметь L_S

$$L_{s1} = 2 \frac{\left(\frac{w1}{2}\right)^2 \mu_o \cdot L_{o\delta}}{h} \left(C_{12} + \frac{2}{3} C_k \right) = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Для второго случая (рис 6.2,б) имеем

$$L_{s2} = \frac{\mu_o W_1^2 L_{o\delta}}{h} \left(\frac{2}{3} C'_k + C'_{12} \right) = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Гн.}$$

Пример 6.2. Расчет индуктивности рассеяния тороидального ТММ

Расчёт индуктивности рассеяния тороидального трансформатора с чередующимися секциями (рис. 6.3). Индуктивность рассеяния с чередующимися секциями находится по формуле [6]

$$L_S = 1,2\mu_0 W_1^2 l_{об} \frac{1}{N^{1,33}} \left[1 + \ln \sqrt{1 + \frac{l}{R} + \frac{A}{3h}} \right], \quad (6.34)$$

где N – число секций обмоток W_1 и W_2 ; A – средняя толщина намотки секции (в направлении, перпендикулярном срезной линии кольцевого магнитопровода, равная $(A_1+A_2)0,5$; A_1 и A_2 – толщина секций W_1 и W_2 соответственно; l – расстояние между соседними секциями (см. рис. 6.3), измеренное вдоль средней силовой линией, радиусом R .

Высота тороида h (на рис.1.1-размер b) определяется по уравнению

$$h = \frac{2 \cdot \pi \cdot R - N \cdot l}{N}.$$

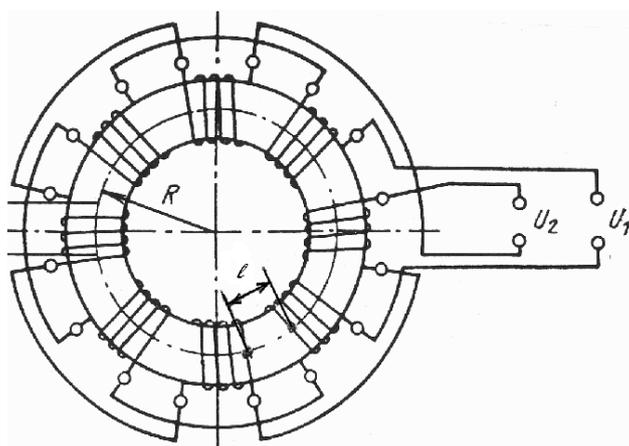


Рис. 6.3. Тороидальный трансформатор с чередующимися секциями.

Исходные данные:

$l_{об}=31,6$ см; $R=5,2$ см; $W_1=560$ вит; $N=6$; $L_C=0,5$ см; $A_1=1$ см; $A_2=1,5$ см, откуда $A=1,25$ см. В соответствии с последней формулой и (6.34) высота h и индуктивность L_S будут равны:

$$h = \frac{6,28 \cdot 5,2 - 6 \cdot 0,5}{6} = 4,95 \text{ см},$$

$$L_S = 1,2 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-9} \cdot 560^2 \cdot 31,6 \cdot \frac{1}{6^{1,33}} \left[1 + \ln \sqrt{1 + \frac{0,5}{5,2} + \frac{1,25}{3 \cdot 4,95}} \right] = 1,36 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}.$$

Пример 6.3. Расчет индуктивности тороидального ТММ

Воспользовавшись формулой (6.7) для бронированного трансформатора на

ШЛ 40x40 с параметрами: $w_1=560\text{вит}$, $b=10\text{см}$, $C_K=1,6\text{см}$, $C_{I2}=0,4\text{см}$, $L_{o\sigma}=32\text{см}$, найдём индуктивность $L_S = \frac{2\mu_o \cdot L_{o\sigma} \cdot w_1^2 \cdot C_k}{3 \cdot h} = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 32 \cdot 560^2 \cdot 2 \cdot 1,6}{3 \cdot 10} = 1,34 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$.

Из приведённых примеров видно, что тороидальный трансформатор (при значительном числе секций) и и броневого трансформатор (без секционирования обмоток) имеют одинаковую индуктивность рассеяния, т.е. $1,36 \cdot 10^{-2} \approx 1,34 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$, тороидальных трансформаторов при размещении обмоток W_1 и W_2 по всей поверхности сердечника одна на другой (рис 6.4) определяется по формуле

$$L_S = \frac{\mu_o}{2\pi} w_1^2 a \cdot \ln \cdot \left[1 + \frac{16D \cdot r \cdot \Delta^2}{(D^2 - r^2)^2} \right], \quad (6.35)$$

где $a=0,5(a_1+a_2)$; $r=0,5(r_1+r_2)$ – радиальные размеры средний витков; D – средних диаметр кольцевого магнитопровода; $\Delta=(r_1-r) \cdot 0,5=(r-r_1) \cdot 0,5$. В случае размещения обмоток W_1 и W_2 на поверхности тороида одна над другой индук-

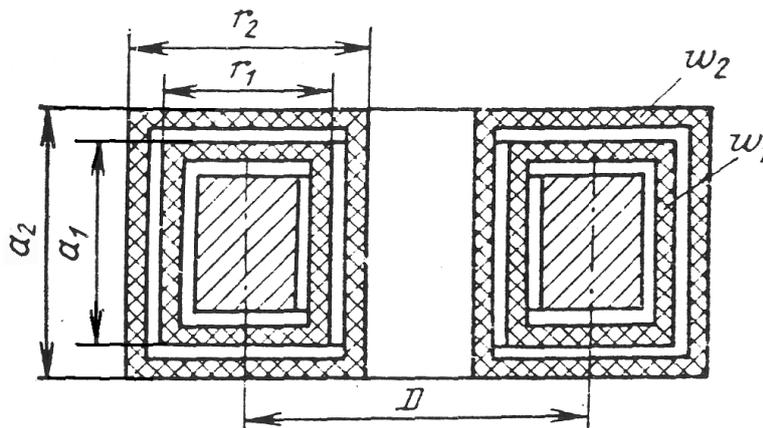


Рис. 6.4. Тороидальный трансформатор с обмотками, расположенными по всей поверхности магнитопровода.

тивность рассеяния L_S определяется по другой формуле

$$L_S = \frac{\mu_o w_1^2 L_{o\sigma} K_R}{h_d} \left(C_{K1} + \frac{C_{K1} + C_{K2}}{3} \right), \quad (6.36)$$

где h_d – длина части средней силовой линии сердечника, закрытая обмотками (аксиальный размер обмотки).

Пример 6.4. Расчёт трансформатора (по рис. 6.2)

На стержневой сердечник *примера 6.1* равномерно намотаны первичная и вторичная обмотки, одна поверх другой. Параметры трансформатора: $a=7\text{см}$; $r=3,5\text{см}$; $D=10,4\text{см}$; $W_1=560\text{вит}$; $\Delta=0,5\text{см}$.

После подстановки в уравнение (6.35), получим

$$L_S = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 560^2 \cdot 7 \cdot \ln \left[1 + \frac{16 \cdot 10,4 \cdot 3,5 \cdot 0,5^2}{(10,4^2 - 0,5^2)^2} \right] = 6,89 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

Итак, на индуктивность L_S практически не оказывает влияния немагнитный зазор в сердечнике, а так же степень плотности укладки проводов обмотки, о чём упоминалось в разделе 1.

6.3. Расчёт ТММ повышенной частоты при питании синусоидальным напряжением

Однофазные и трёхфазные трансформаторы находят широкое применение в частотном электроприводе, в ИВЭП, в индукционных установках и др. Расчёт трёхфазных трансформаторов осуществляется по одной фазе точно так же как в стержневых, так и в броневого порядка расчёта трансформатора следующий [4,5].

1. Выбирается магнитный материал сердечника, при этом учитываются: коэффициент удельной передаваемой мощности

$$P_p = P_{01}^{-0,5} f^{-0,5\alpha} \cdot B_m^{(1-0,5\beta)} (f_1 \cdot f^3)^{0,25},$$

дефицитность и стоимость материала, технологию изготовления. Определяется предварительно индукция по второй части формулы (6.20) с учётом, что $K_{\text{доо}}=1,5-2$, а $K_t=1,4$ (при $t_{oc}=50^\circ\text{C}$ и $\tau=70^\circ\text{C}$).

2. Объём сердечника V_C определяют по (6.27), при этом пока неизвестны коэффициенты $k_{OK}=0,25-0,3$ и $K_{\text{доо}}=1,5-2$, подставляют $K_{\text{доо}}=2$, $k_{OK}=0,25$. Граничная (критическая) частота рассчитывается по (6.28) и подставляется в (6.27).

3. По расчётному объёму по табл. П.1-П.5 выбирают необходимого типа магнитопровод и выписывают его основные размеры, при этом следует учитывать конкретные условия.

4. Рассчитывают электромагнитные параметры трансформатора. По известным мощности и напряжению обмоток определяют токи $I_1=P/U_1$, $I_2=P/U_2$ и коэффициент трансформации $K_{\text{тр}}=U_1/U_2=W_1/W_2$.

КПД трансформаторов мощностью $P < 4$ кВт достаточно высокий.

5. Уточняется значение индукции B_m по формуле

$$B_m = 0,113(K_{\text{доб}} \cdot K_t)^{0,25} \cdot P^{0,5} / (A \cdot K_p)^{0,25} \cdot f^{0,875} \cdot V_c^{0,666}$$

Возможно использование таблицы 6.1.

6. По закону электромагнитной индукции рассчитывают число витков первичной W_1 и вторичной обмоток. $W_1 = U_1 / (4 \cdot k_\phi \cdot f \cdot B_m \cdot S_C \cdot k_{3C})$, $W_2 = W_1 / K_{\text{тр}}$ где $k_\phi = 1,11$ – коэффициент формы для синусоиды.

7. С учетом коэффициента резки K_p определяют мощность потерь в сердечнике

$$\Delta P_c = P_{01} \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta \cdot V_c \cdot K_p = P_k \cdot V_c \cdot K_p \quad (6.38)$$

8. Выбор сечения проводов может быть выполнен по двум критериям: исходя из расчётного значения плотности j (А/мм²) при условии, что $P_{\text{об}} = P_c$ из уравнения (6.22), или исходя из минимума потерь в обмотке:

$$S_{np} = \left(\frac{15\pi}{140,8 \cdot \mu_0^2 \cdot \gamma^2} \right)^{0,333} \cdot h_{ок} / (W \cdot f)^{0,666}$$

или для литцендрата (многожильного провода)

$$S_{np} = \frac{\left(\frac{15}{32 \cdot \mu_0^2 \cdot \gamma^2} \right)^{0,5} \cdot h_{ок}}{W \cdot f \cdot d_s} \quad (6.39)$$

По справочным данным или по таблицам приложения выбирается марка и сечение обмоточного провода соответствующего класса изоляции. При одинаковой плотности тока в обмотках можно приблизительно считать, что $S_{np2} = S_{np1} \cdot K_{\text{тр}}$. Отсюда находят, что

$$S_{np1} = S_{ок} \cdot k_{OK} / 2W_1, \quad (6.40)$$

где $k_{OK} = W_1 S_{np} / S_{ок}$ [3,6].

После определения действительного значения коэффициента добавочных потерь (глава 4) уточняют сечения проводов.

9. Рассчитывают мощность потерь в обмотках W_1 и W_2 $P_{\text{об}} = P_{\text{об1}} + P_{\text{об2}}$. Потери в обмотках определяют по формулам

$$\Delta P_{\text{об}} = I^2 \cdot R_0 \cdot K_{\text{доб}} \cdot K_t, \quad (6.41)$$

где $R_0 = \rho \frac{L_{об} \cdot W}{S_{пр}}$ - омическое сопротивление провода на постоянном токе;

$L_{об}$ - средняя длина обмотки (см). Коэффициент $K_{дооб}$ определяют по формулам § 4.1-4.2.

10. Находят суммарные потери в трансформаторе, его КПД и ток холостого хода:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{об}; \quad \eta = (P - \Delta P) / P; \quad I_{xx} = \Delta P_c / U_1. \quad (6.42)$$

11. Индуктивность рассеяния находят по формулам § 4.1.4.2. Индуктивность намагничивания сердечника

$$L_{11} = W_{12} \cdot \mu_{эф} \cdot S_c / L_c, \quad (6.43)$$

где $\mu_{эф} = \mu_a / (1 + \mu \cdot \delta / L_c)$ - эквивалентная магнитная проницаемость с учётом технологического зазора в сердечнике. Длина зазора в каждом стержне составляет $3 \cdot 10^{-3}$ см. Величины L_{11} и P_n (потери в сердечнике - см. рис. 6.1) влияют на КПД трансформатора.

Если отношение $\omega L_{11} / Z_n^1 \geq 5-10$, то влияние параметров L_{11} и R_n на КПД незначительно, поэтому можно считать, что ток намагничивания $i_\mu = 0$, а $i_1 \approx i_2$. Влияние индуктивности L_s на КПД незначительно при условии, что

$$\omega \cdot L_s = \omega \cdot (L_{s1} + L_{s2}^1) \leq \frac{1}{3} Z_n^1, \quad (6.44)$$

где $Z_n^1 = Z_n \cdot K_{тр}^2$.

Следовательно, значения, определяемые по (6.44), являются ограничениями, на которые необходимо проверять параметры эквивалентной схемы трансформатора при его расчёте. Кроме индуктивных связей, в ТММ следует учитывать и ёмкостные связи. Относительно магнитопровода существует ёмкость первичной обмотки C_1 , ёмкость C_2^1 - обмотки W_2 и ёмкость C_{12} между обмотками приводятся к одной эквивалентной ёмкости C_0^1 . При работе ТММ на повышенных и высоких частотах, в том числе и при импульсных воздействиях следует считаться с большой крутизной фронтов. Совместно с индуктивностями L_s ёмкости обмоток определяют искажения при передаче напряжения несинусоидальной формы, а так же собственные колебания в обмотках.

Необходимо заметить, что абсолютная магнитная проницаемость $\mu_a = \mu_0 \mu$ магнитного материала определяется по кривой намагничивания $B_m = f(H_m)$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Гн/см}$.

12. По [1,3,5 и 6) выполняется тепловой расчёт и определяется фактический перегрев.

Рассмотрим на примерах расчёт параметров ТММ при синусоидальном напряжении питания.

Пример 6.5. Расчет сечения литцендрата для обмоток ТММ

Для трансформатора, изготовленного на сердечнике ШЛ 25x25-62,5 с числом витков $Wl=42$ вит., работающего на $f=1000\text{Гц}$ при синусоидальном напряжении питания, необходимо выбрать многожильный провод (литцендрат) с диаметром одной жилки $d_s=0,23\text{мм}$. Здесь $h_{ок}=h_o=6,25\text{см}$.

Сечение литцендрата определяем по уравнению (6.39)

$$S_{np} = \left| \frac{15}{32 \cdot (4\pi \cdot 10^{-9})^2 \cdot (5,8 \cdot 10^5)^2} \right|^{0,5} \cdot \frac{6,25}{42 \cdot 1000 \cdot 0,023} = 6,07 \cdot 10^{-2} \text{см}^2$$

По ГОСТ 16886-74 (табл.П.11) выбираем провод ЛЭТЛО (144x0,23) сечением $S_{np}=5,98 \cdot 10^{-2}\text{см}^2$ с числом жилок $n_{жс}=144$ с наружным диаметром $d_0^1=0,47\text{см}$ (с изоляцией).

Коэффициент добавочных потерь будет

$$K_{доб} = 1 + \left[\frac{32}{15} \cdot \mu_0^2 \cdot \gamma^2 \right] \left(\frac{w \cdot f \cdot d_s}{h_{ок}} \right) \cdot S_{np}^2 =$$

$$= 1 + \left[\frac{32}{15} (4\pi \cdot 10^{-9})^2 \cdot (5,8 \cdot 10^5)^2 \right] \left(\frac{42 \cdot 1000 \cdot 0,023}{6,25} \right)^2 \cdot (5,98 \cdot 10^{-2})^2 = 2,47$$

Пример 6.6. Расчет ТММ при питании синусоидальным напряжением

Рассчитать трансформатор мощностью $P=1000\text{Вт}$, работающий на синусоидальном напряжении $U_1=U_2=110\text{В}$, частотой $f=1\text{кГц}$. Температурные условия: $t_{oc}=50^\circ\text{C}$, перегрев $\tau=70^\circ\text{C}$.

Вначале необходимо выбрать магнитный материал сердечника с учётом P_r и B_m . Для этого воспользуемся табл. 6.5 [5].

Из табл. 6.5 видно, что по передаваемой мощности лучшим является феррит 2500 НМС-1. Однако для такой мощности и частоты больше пригодна электротехническая сталь 3425 (даже при $f=400\text{Гц}$ ПЛ 20x40-80 имеет мощность $P=1220\text{Вт}$).

1. Определяем индукцию по (6.20) при $K_r=1,4$, $K_{доб}=1,5$

$$B_m = \left[\frac{371(\alpha_T \cdot \tau)^2 (K_{\text{доб}} K_t)^{0,25}}{(K_p P_{01} f^\alpha)^{1,75}} \sqrt{\frac{f}{p}} \right] (1,75\beta - 0,5)^{-1}$$

$$= \left[\frac{371 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 70)^2 \cdot (1,5 \cdot 1,4)^2}{(1,4 \cdot 82,7 \cdot 1000^{1,5})^{1,75}} \sqrt{\frac{1000}{1000}} \right] \left(\frac{1}{1,75 \cdot 1,8 - 0,5} \right) = 1,04 \cdot 10^{-4} \frac{B \cdot c}{\text{см}^2} = 1,04 \text{ Тл},$$

где $P_{01} = P_0 \cdot (f^*)^{-\alpha} \cdot (B_m)^{-\beta} = 1,165 \cdot (10^{-3})^{1,5} \cdot (10^{-4})^{-1,8} = 82,7$.

Из табл. 3.1 $P_0 = 0,165 \text{ Вт/см}^2$; $\alpha = 1,5$; $\beta = 1,8$

$$\Pi_p = (1 / (\sqrt{P_{01}}) B_m^{*(1-0,5\beta)} f^{1-0,5\alpha}) = (1 / \sqrt{0,165}) (1,04 \cdot 10^{-4})^{(1-0,9)} \cdot 1000^{(1-0,75)} = 5,54$$

2. Находим объём сердечника по (6.27), а в начале определим коэффициент А

$$A = P_{01} f^{(\alpha-1,5)} B_m^{(\beta-2)} = 82,7 \cdot 1000^{(1,5-1,5)} (1,04 \cdot 10^{-4})^{(1,8-2)} = 518 \frac{A \cdot \text{см}}{B \cdot \text{с}^{0,5}}$$

С учётом коэффициента резки объём равен

$$V_c = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot K_p \cdot K_t \cdot K_{\text{доб}}}{k_{\text{ок}}}} \cdot \frac{P}{f^{0,25} \Delta T} = 1,5 \sqrt{\frac{518 \cdot 1,5 \cdot 1,4 \cdot 1,5}{0,25}} \cdot \frac{1000}{1000^{0,25} \cdot 70} = 308 \text{ см}^3.$$

По табл. П.2 выбираем сердечник ПЛ 25x50x65. Объём $V_c = 320 \text{ см}^3$; $h_{\text{ок}} = h = 6,5 \text{ см}$; $C_{\text{ок}} = c = 4 \text{ см}$; $S_{ca} = 11,1 \text{ см}^2$; $l_c = 28,8 \text{ см}$; $S_{\text{ок}} = S_o = 26 \text{ см}^2$; $a = 2,5 \text{ см}$; $b = 5 \text{ см}$.

Показатель передаваемой мощности.

Таблица 6.5.

Магнитный материал	Толщина ленты (мм)	P_0 (Вт/см^3)	α	β	B_m ($\text{В} \cdot \text{с/см}^2$)	Π_p
Феррит 2500 НМС-1	-	0,034	1,4	1,9	$0,3 \cdot 10^{-4}$	24,6
Пермаллой 50 Н	0,08	0,124	1,5	1,9	$0,58 \cdot 10^{-4}$	9,8
ЭТС 3425	0,08	0,165	1,5	1,9	$0,53 \cdot 10^{-4}$	5,3

3. Уточняем значение индукции по (6.37)

$$B_m = 0,113 \sqrt[4]{\frac{1,5 \cdot 1,4}{518 \cdot 1,5}} \cdot \frac{\sqrt{1000}}{1000^{0,875} \cdot 320^{0,666}} = 0,47 \cdot 10^{-4} \frac{Bc}{\text{см}^2} = 0,47 \text{ тл}.$$

4. Токи в обмотках равны:

$$I_1 = 1000/110 = 9,09 \text{ А} \quad I_2 = I_1 \cdot K_{\text{тр}} = 9,09 \text{ А}.$$

Число витков обмоток будет $W_1=W_2=110/(4,44 \cdot 1000 \cdot 11,1 \cdot 0,47 \cdot 10^{-4})=48$ вит.

5. Мощность потерь в магнитопроводе из (6.38)

$$\Delta P_c = \rho_{\gamma\partial} \cdot V_c \cdot K_p = 82,7 \cdot (10^3)^{1,5} \cdot (0,47 \cdot 10^{-4})^{1,8} \cdot 1,5 \cdot 320 = 20,08 \text{ Вт.}$$

6. Выбираем сечение и марку провода

$$S_{np} = k_{OK} \cdot S_{OK} / 2 \cdot W_1 = 0,25 \cdot 26 / 2 \cdot 48 = 0,068 \text{ см}^2.$$

Выбираем провод ЛЭТЛО-6 (31x0,5), число жилок $n_{жс}=31$, диаметр одной жилки $d_s = 0,051 \text{ см}$, наружный диаметр провода $d_{np} = d'_0 = 4,2 \text{ мм}$. При частоте $f=1 \text{ кГц}$ можно выбрать одножильный провод $S_{np} = 2 \cdot 3,46 = 6,92 \text{ мм}^2$

7. Уточняем коэффициент добавочных потерь [5]

$$K_{доб} = 1 + \frac{(m \cdot n_p)^2}{15} X_s^4 = 1 + \frac{(1,55 \cdot 5,57)^2}{15} \cdot 0,244^4 = 1,00,$$

где
$$m = \frac{W_1/2}{h \cdot d_{np}} = \frac{48/2}{6,5/0,42} = 1,55,$$

$$n_p = \sqrt{31} = 5,57, \quad X_s = d_s \sqrt{\pi \cdot f \cdot \gamma \cdot \mu_0} = 0,051 \sqrt{3,14 \cdot 1000 \cdot 5,8 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}} = 0,244$$

8. Определяем мощность потерь в обмотке

$$\Delta P_{об} = 2 \cdot I^2 \cdot R_0 \cdot K_{доб} \cdot K_t = 2 \cdot 10^2 \cdot 2,14 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 1,4 = 6 \text{ Вт},$$

где
$$R_0 = \frac{L_{об} \cdot W}{\gamma \cdot S_{np}} = \frac{17,6 \cdot 48}{5,8 \cdot 10^5 \cdot 0,068} = 2,14 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$L_{об} = 2 (a + 2m \cdot d_{np} + b) = 2 (2,5 + 2 \cdot 1,55 \cdot 0,42 + 5) = 17,6 \text{ см.}$$

Мощность потерь в обмотке оказалась в 3,33 раза меньше мощности потерь в сердечнике. Отсюда следует, что расчет ТММ выполнен с большим запасом.

Если стоит задача спроектировать трансформатор меньшей массы и габаритов, то необходимо провести расчет, выбрав магнитопровод с меньшим объемом, например ШЛ 25x25 – 62,5 или ПЛ 20x40 – 100 с объемом стали $V_c = 232 \text{ см}^3$ и провести вновь расчет трансформатора.

6.4. Расчет ТММ при несинусоидальном напряжении питания

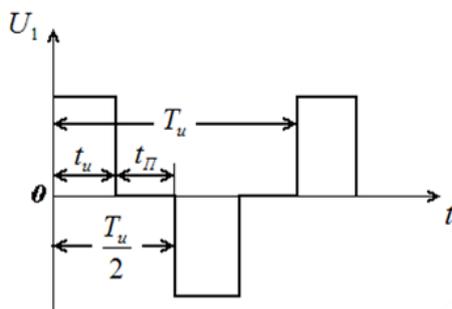


Рис. 6.5. Напряжение с ШИМ

Методика расчета отличается незначительно от методики § 6.3. В основу расчета положен метод разложения в ряд Фурье

$$u_1(t) = A_0 + \sum_1^n A_{(n)} \sin(n\omega t + \psi_{u(n)}), \quad (6.45)$$

где A_0 - постоянная составляющая функции $u_1(t)$; n – номер гармоники; $A_{(n)}$ - амплитуда n -ой гармоники; $\psi_{u(n)}$ - начальная фаза гармоники; $\omega = 2\pi/T_{(1)}$ - основная частота $u_1(t)$, $T_{(1)}$ - ее период. Функции для разных форм сигналов приведены в табл.4.7 и П.15. Форма напряжения - прямоугольная с широтно-импульсным регулированием-рис.6.5.

1. Для оценки магнитного материала в формуле B_m вместо мощности P следует подставлять $P_{(1)}$ - мощность ТММ, соответствующую первой гармонике напряжения; $P_{(1)} = U_{(1)}^2 / R'_H$, $U_{(1)} = A_{(1)} / \sqrt{2}$ - действующее значение первой гармоники напряжения; $R'_H = R_H \cdot K_{TP}^2$ - приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки.

2. Мощность потерь в сердечнике при несинусоидальном напряжении равна сумме мощностей на отдельных гармониках $P_{c(n)}$

$$\Delta P_c = \sum_1^n P_{c(n)} = P_{01} \cdot f_{(1)}^\alpha \cdot \beta_{m(1)}^\beta \cdot V_c \cdot K_p \cdot \sum_1^n \left(\frac{A_{(n)}}{A_{(1)}}\right)^\beta \cdot n^{(\alpha-\beta)} = P_{01} \cdot f_{(1)}^\alpha \cdot \beta_{m(1)}^\beta \cdot \gamma_B \cdot V_c \cdot K_p, \quad (6.45)$$

где $f_{(n)} = f_{(1)} \cdot n = \frac{n}{T_{(1)}}$ - частота n -ой гармоники; $B_{m(n)} = A_{(n)} / (w_1 \cdot S_c \cdot \omega \cdot n)$;

$$f_{(1)} - \text{частота 1-ой гармоники} \quad B_{m(1)} = A_{(1)} / (w_1 \cdot S_c \cdot \omega), \quad (6.46)$$

$\gamma_B = \sum_1^n \left(\frac{A_{(n)}}{A_{(1)}}\right)^\beta \cdot n^{(\alpha-\beta)}$ - коэффициент увеличения мощности потерь в сердечнике при несинусоидальном напряжении по сравнению с синусоидальным (при частоте) $\omega = 2\pi \cdot f_{(1)}$.

3. Мощность потерь в обмотках ТММ при несинусоидальном напряжении определяется суммой мощностей на отдельных гармониках $P_{об.(n)}$:

$$\Delta P_{об} = \sum_1^n P_{об(n)} = \sum_1^n 0,5 \cdot I_{m(n)}^2 \cdot R_0 \cdot K_{доб(n)} \cdot K_t. \quad (6.47)$$

где $I_{m(n)} \approx A_{(n)} / R'_H$ - амплитудное значение n -ой гармоники тока;

$K_{доб(n)}$ - коэффициент добавочных потерь на частоте $f_{(n)}$, который при оценочном выборе сечения проводов при синусоидальном напряжении может приниматься равным $K_{доб} = 1,5 - 2$.

$$\text{С учетом этого } \Delta P_{об} = 0,5 \cdot I_{m(1)} \cdot R_0 \cdot K_{доб} \cdot K_t \cdot \gamma_{(1)}, \quad \text{где } \gamma_{(1)} = \sum_1^n \left(\frac{A_{(n)}}{A_{(1)}}\right)^2$$

4. Объем магнитопровода при форме напряжения подобной рис. 6.5

$$V_c = 1,5 \cdot (A \cdot K_{\text{доб}} \cdot K_t \cdot K_p \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_{(1)} \cdot P)^{0,5} / (k_{\text{ок}}^{0,5} \cdot f^{0,25} \cdot \tau). \quad (6.48)$$

Значение коэффициента А рассчитывают на частоте 1-ой гармоники.

5. Определяют амплитуду индукции 1-ой гармоники.

$$B_{m(1)} = 0,113 \cdot (\gamma_{(1)} \cdot K_{\text{доб}} \cdot K_t \cdot P_{(1)})^{0,5} / (\gamma_B \cdot A \cdot K_p)^{0,5} \cdot f^{0,875} \cdot V_c^{0,666}, \quad (6.49)$$

где $P_{(1)} \approx A_{(1)}^2 / R_n'$ - мощность ТММ на первой гармонике. Число витков первичной

обмотки: $w_1 = A_{(1)} / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_c \cdot B_{m(1)})$, при этом $w_2 = w_1 / K_{\text{ТР}}$ (6.50)

6. Рассчитывают действующие значения токов обмоток

$$I_1 = P / U_1, \quad \text{а } I_2 = I_1 K_{\text{ТР}}, \quad \text{где } U_1 - \text{действующее значение напря-$$

жения.

7. Выбор сечения проводов и их укладка на стержне сердечника производится так же, как в §6.3 и в примерах 6.5, 6.6.

8. Затем производится тепловой расчет как изложено в [1,3,5,6].

Рассмотрим пример расчета трансформатора при питании его прямоугольным напряжением с широтно-импульсным регулированием по рис. 6.5.

Пример 6.7. Расчет ТММ при несинусоидальном напряжении на входе

Рассчитать двухобмоточный ТММ мощностью $P=350\text{Вт}$ при напряжении $U_{1m} = 310 \cdot \text{В}$ и вторичном напряжении $U_{2m} = 110\text{В}$. Другие данные: температура окружающей среды $t_{\text{ок}} = 50^\circ \text{С}$, максимальная температура перегрева $\tau = 70^\circ \text{С}$. Форма напряжения изображена на рис. 6.5. Длительность периода $T_{\text{и}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{с}$, длительность импульса $t_{\text{и}} / 4$.

Решение.

1. Выбираем для магнитопровода сплав 79НМ с толщиной ленты 0,05мм. Его данные $P_0 = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{Вм} / \text{см}^3$, $\alpha = 1,5$, $\beta = 1,8$, $A = 120$, для него коэффициент резки $K_p = 2,8$; $B_s = 0,75 \text{Тл}$. Коэффициент А с учетом K_p равен $A = 120 \cdot 2,8 = 336 \text{А} \cdot \text{см} / (\text{В} \cdot \text{с}^{0,5})$.

2. Находим граничную частоту по уравнению (6.28)

$$f_{\text{гр.}} = \frac{3,98 \cdot 10^7}{A} (\tau / P)^{0,5} = \frac{3,98 \cdot 10^7}{336} \cdot (70 / 350)^{0,5} = 52973 \text{Гц}.$$

3. Находим объем сердечника по (6.27)

где $f_l = 1 / T_{\text{и}} = 1 / 0,5 \cdot 10^{-3} = 2000 \text{Гц}$ $k_{\text{ок}} = 0,25$; $K_t = 1,4$, принят общеизвестный $K_{\text{доб}} = 2$.

4. По найденному объему по табл. п.1 выбираем сердечник ШЛ20х25-50; $V_c = 75,2 \text{см}^3$, $k_{3\text{С}} = 0,88$, $S_c = 4 \text{см}^3$, $S_{\text{ок}} = 10,00 \text{см}^2$, $L_c = 17,1 \text{см}$; $a_m = \sqrt{S_c} = 2,098 \text{см}$.

5. Коэффициент трансформации равен $K_{TP} = U_{1m}/U_{2m} = 310/110 = 2,82$

6. Действующее значение напряжения

$$U_1 = U_{1m} \sqrt{t_u / (0,5 \cdot T_u)} = 310 \sqrt{0,5} = 219,2 \text{ В}; \quad U_2 = 77,7 \text{ В}.$$

7. Определяем индукцию по (6.21)

$$B_{m(1)} = 0,146 \cdot P_{(1)}^{0,5} / (A^{0,25} \cdot f_1^{0,875} \cdot V_c^{0,666}) = 0,146 \cdot 326,7^{0,5} / (336^{0,25} \cdot 2000^{0,875} \cdot 75,2^{0,666}) = 0,45 \cdot 10^{-4} \text{ В} \cdot \text{с} / \text{см}^2$$

Из разложения кривой рис. 6.5 в ряд Фурье определяем амплитуду первой гармоники напряжения

$$U_{1m(1)} = \left(\frac{4}{\pi} \right) \cdot U_{1m} \cdot \cos \pi \cdot t_u / T_u = \frac{4}{\pi} \cdot 310 \cos \frac{4}{\pi} = 279,2 \text{ В}$$

$$U_{1(1)} = U_{1m(1)} / \sqrt{2} = 279,2 / 1,41 = 198 \text{ В. номер гармоники приведен в скобках}$$

$$P_{(1)} = U_{1(1)}^2 / R_H = 198^2 / 120 = 326,7 \text{ Вт.}, \text{ где } R_H = U_1^2 / P = 219,2^2 / 350 = 137,3 \text{ Ом}.$$

8. Число витков обмоток будет

$$w_1 = U_{1(1)} / 4 \cdot f_1 \cdot S_c \cdot B_m = 198 / (4 \cdot 2000 \cdot 4,23 \cdot 0,476 \cdot 10^{-4}) = 123 \text{ Вит.}$$

$$w_2 = 125 / 2,82 = 44,3 \text{ Вит. Число слоев (рядов) } m_1 = 3; m_2 \approx 2,5$$

Принимаем $W_2 = 44$ витка

9. Потери мощности в сердечнике в соответствии с уравнением

$$\Delta P_c = P_{\text{уд.син}} \cdot \gamma_n \cdot V_c \cdot K_p = 2,38 \cdot 10^{-2} \cdot 1,18 \cdot 68,9 \cdot 2,8 = 5,42 \text{ Вт},$$

где $P_{\text{уд.син}} = P_0 \left(\frac{f_{(1)}}{f^*} \right)^\alpha \cdot (B_{m(1)} / B_m^*)^\beta = 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 2^{1,5} \cdot (0,476)^{1,8} = 2,38 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} / \text{см}^2$.

Коэффициент несинусоидальности, учитывающий увеличение потерь в магнитопроводе из-за наличия высших гармоник, равен

$$\gamma_n = 1 + \sum_n n^{(\alpha-2\beta)} \left| \frac{\cos n \cdot t_u / T_u}{\cos t_u / T_u} \right|^\beta = 1,18 \text{ - получен из рис. 3.6 для } 2t_u / T = 0,5 \text{ для}$$

сердечника 79НМ-0,05; здесь $n=3, 5$ и 7 -ая гармоники.

10. Плотность тока в первичной обмотке находим по формуле (6.22) при условии, что $\Delta P_c = \Delta P_{об}$.

$$j = \sqrt{\frac{\Delta P_c}{2V_c \cdot \rho \cdot k_{0K} \cdot K_{ооб} \cdot K_t}} = \sqrt{\frac{5,42}{2 \cdot 68,9 \cdot 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 1,4}} = 1,82 \cdot 10^2 \text{ А} / \text{см}^2 = 1,82 \text{ А} / \text{мм}^2$$

11. Определяем токи в обмотках и сечения проводов

$$I_1 \approx P / U_1 = 350 / 219,2 = 1,6 \text{ А}; \quad I_2 = I_1 \cdot K_{mp} = 1,6 \cdot 2,82 = 4,5 \text{ А};$$

$$S_{np1} = I_1 / j = 1,6 / 1,82 = 0,88 \text{ мм}^2; \quad S_{np2} = 4,5 / 1,82 = 2,47 \text{ мм}^2$$

12. Для намотки обмоток выбираем провода ПЭТВ-2 $S_{np1} = 0,9 \text{ мм}^2$

(табл. П.11 и 12); $d_{np1} = 1,08 \text{ мм}$ и литцендрат ЛЭТЛЮ-1,6 (8x0,51), при этом плотность тока станет $j_2 = I_2 / S_{np2} = 4,5 / 1,6 = 2,9 \text{ А/мм}^2$.

Диаметр провода вторичной обмотки $d'_{02} = 2,3 \text{ мм}$.

В окне можно разместить обе обмотки, при этом коэффициент заполнения окна будет

$$k_{0K} = (w_1 \cdot S_{np1} + w_2 \cdot S_{np2}) / S_{ок} = (123 \cdot 0,91 + 44 \cdot 1,6) / 1256 = 0,145 < 0,25$$

13. Для нахождения коэффициента добавочных потерь используем формулу $K_{дооб} = \sum_1^n I_n K_{дооб(n)} / I^2$, где $n=1,3,5$ -номер гармоники.

Здесь $I_{(n)}$, I – действующее значение n – ой гармоники и полного тока

Значение $I_{(n)}$ определяется по уравнению $I_{(n)} = U_{(n)} / R'_n$, где $R'_n = 137,3 \text{ Ом}$ (см. выше).

14. Разложение кривой рис. 6.5 в ряд Фурье имеет вид (см. табл. П.15)

$$U(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n^2} (\cos n \cdot t_u / T_u) \cdot \sin n \cdot \omega t, \text{ где } n=1, 3, 5, \dots$$

Ограничимся первой, третьей и пятой гармониками ряда. Находим

$$U_{1(1)} = 198 \text{ В}; \quad I_{1(1)} = 198 / 137,3 = 1,44 \text{ А}; \quad f_{(1)} = 2 \cdot 10^3 \text{ Гц.}$$

$$U_{1(3)} = 198 / 9 = 22 \text{ В}; \quad I_{1(3)} = 0,16 \text{ А}; \quad f_{(3)} = 6000 \text{ Гц.}$$

$$U_{1(5)} = U_1 / n^2 = 198 / 25 = 7,92 \text{ В}; \quad I_{1(5)} = 1,44 / 25 = 0,058 \text{ А}; \quad f_{(5)} = 10 \text{ Гц.}$$

15. Коэффициент добавочных потерь первичной обмотки (для меди $\mu_a = \mu_0$)

$$X_1 = \sqrt{4 \cdot S_{np} \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \gamma} = d_0 \sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \gamma / 2},$$

$$m_1 = w_1 / (h_{ок} / d_{np}) = 125 / (5,0 / 0,108) = 2,7,$$

$$K_{дооб1} \approx 1 + \frac{(m_1 \cdot n_1)^2}{15} \cdot X_{1(1)}^4 = 1 + \frac{(2,7 \cdot 3)^2}{15} \cdot 0,735^4 = 1,28,$$

$$X_{1(1)} = d_0 \sqrt{\pi \cdot f_{(1)} \cdot \mu_a \gamma} = 0,108 \sqrt{\pi \cdot 2000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 5,88 \cdot 10^5} = 0,735,$$

$$K_{дооб1(3)} = 1 + \frac{(2,7 \cdot 3)^2}{15} \cdot 1,27^2 = 12,34; \quad X_{1(3)} = 1,27;$$

$$K_{дооб1(5)} = 1 + \frac{(2,7 \cdot 3)^2}{15} \cdot 1,64^2 = 32,9; \quad X_{1(5)} = 1,64.$$

16. Коэффициент добавочных потерь вторичной обмотки.

число слоев обмотки: $m_2 = w_2 / (h_{ок} / d'_0) = 44 / (50 / 0,23) = 2$; $n_{2p} = \sqrt{8} \approx 3$.

$$K_{дооб2(1)} = 1 + \frac{(m_2 n_{2p})^2}{15} \cdot X_{2(1)}^4 = 1 + \frac{(2 \cdot 2,5)^2}{15} \cdot 0,347^4 = 1,02,$$

$$X_{2(1)} = d_s \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f_{(1)} \cdot \mu_a \cdot \gamma / 2} = 0,051 \cdot \sqrt{2\pi \cdot 2000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 5,88 \cdot 10^5 / 2} = 0,347,$$

$$K_{\text{дооб2(3)}} = 1 + \frac{5^2}{15} \cdot 0,6^4 = 1,2, \quad X_{2(3)} = 0,6,$$

$$K_{\text{дооб2(5)}} = 1 + \frac{5^2}{15} \cdot 0,777^4 = 1,6, \quad X_{2(5)} = 0,777,$$

$$K_{\text{дооб2}} = \frac{(1,44 \cdot 2,82)^2 \cdot 1,02 + (0,16 \cdot 2,82)^2 \cdot 1,2 + (0,058 \cdot 2,82)^2 \cdot 1,6}{4,5^2} = 0,844.$$

17. Потери в обмотках

$$\Delta P_{\text{об.1}} = R_{01} \cdot I_1^2 \cdot K_{\text{дооб.1}} \cdot K_t = 0,401 \cdot 1,6^2 \cdot 1,2 \cdot 1,4 = 1,72 \text{ Вт.}$$

$$R_{01} = \rho \frac{\ell_{\text{об.1}} \cdot W_1}{S_{\text{пр.1}}} = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{17 \cdot 125}{0,9 \cdot 10^{-2}} = 0,401 \text{ Ом.}$$

$$\Delta P_{\text{об.2}} = R_{02} \cdot I_2^2 \cdot K_{\text{дооб.2}} \cdot K_t = 0,122 \cdot 4,5^2 \cdot 0,844 \cdot 1,4 = 2,92 \text{ Вт.}$$

$$R_{02} = 1,7 \cdot 10^{-6} \frac{26 \cdot 44}{1,6 \cdot 10^{-2}} = 0,122 \text{ Ом.}$$

$$\Delta P_{\text{об.}} = \Delta P_{\text{об.1}} + \Delta P_{\text{об.2}} = 1,72 + 2,92 = 4,64 \text{ Вт.}$$

18. Общие потери в обмотках и магнитопроводе

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{\text{об.}} = 4,64 + 5,42 = 10,06 \text{ Вт.}$$

Из расчета видно, что потери в сердечнике и проводах обмоток практически одинаковы, т.е. $P_c \approx P_{\text{об.}}$

6.5. Расчет ТММ при питании импульсным напряжением

Расчет ТММ при питании импульсным напряжением незначительно отличается от расчета трансформатора при питании синусоидальным напряжением (§6.3). Форма напряжения питания трансформатора показана на рис.6.6.

Значение критерия подобия T_1 при импульсном напряжении имеет вид

$$T_1 \approx \sqrt{\frac{A_u}{K_{OK}}} \cdot \frac{1,1 \cdot P_u}{\tau \cdot f^{0,25} \cdot V_c} \approx 0,7, \quad (6.51)$$

где P_u - импульсная мощность; $f_u = 1/t_u$ - частота разнополярного импульса.

$f_u = 0,5 \cdot t_u$ - эквивалентная частота; t_u - длительность импульса одной полярности;

A_u - коэффициент импульсных потерь в магнитопроводе;

Потери в сердечнике

$$\Delta P_c = A_u \cdot f_u^{1,5} \cdot B_m^2 \cdot V_c \quad (6.52)$$

$$\text{Объем магнитопровода} \quad V_c \approx 1,5(A_u \cdot K_{\text{дооб}} \cdot K_t)^{0,5} \cdot [P_u / (k_{OK}^{0,5} \cdot f_u^{0,25} \cdot \tau)] \cdot x \quad (6.53)$$

умножают на коэффициент $x \cdot [1 + 3 \cdot e^{(1-q)}] / 4$. Последний сомножитель учитывает процессы охлаждения во время паузы; $q = t_u / T_u$ скважность импульсов; T_u - период повторения импульсов.

Минимальные потери мощности в ТММ будут при $P_c = P_{об.}$.

Согласно §4.3 при $t_0 \geq 10 \cdot \theta_B$ потери мощности на вихревые токи в шихтованном магнитопроводе при воздействии прямоугольных импульсов для

$$\mu_a = const \text{ приблизительно равны} \quad \Delta P_c \approx \frac{\Delta B_{cp.}^2 \cdot \delta_l \cdot \gamma}{12 \cdot t_0} \cdot V_c \quad (6.54)$$

Оптимальное значение индукции, соответствующее минимальным потерям и габаритам, максимальному КПД при прямоугольном импульсе напряжения с параметрами U_0 и t_0 (см. рис. 4.3) будет при $P_c = P_{об.}$ Мощность потерь в обмотках будит определяться [5]

$$\Delta P_{об.} = 2 \cdot \rho \frac{w_1 \cdot L_{об.}}{S_{np.}} I_{(1)}^2 \cdot K_{дооб.} \cdot K_t \quad (6.55)$$

При прямоугольном импульсе напряжения за время действия импульса приращение индукции будет

$$\Delta B_{cp.} = U_0 \cdot t_0 / (w_1 \cdot S_c) \quad (6.56)$$

С учетом $\Delta B_{cp.}$ ток в первичной обмотке равен

$$I_1 = P \cdot t_0 / (w_1 \cdot S_c \cdot \Delta B_{cp.}) \quad (6.57)$$

Воспользовавшись равенством

$$w_1 \cdot S_{np.} = 0,5 \cdot k_{ок} \cdot S_{ок}, \quad S_c \cdot S_{ок} / (L_c \cdot L_{об.}) = 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot V_c^{0.666}, \text{ находим}$$

$$\Delta P_{об.} \approx \frac{4 \rho K_{дооб.} K_t}{k_{ок} \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot V_c^{0.666}} \left(\frac{P_u t_0}{\Delta B_{cp.}} \right) \quad (6.58)$$

$$\text{Или окончательно имеем} \quad \Delta P_{об.} \approx \frac{9 \cdot 10^{-3}}{V_c^{1.666}} \cdot \left(\frac{P_u t_0}{\Delta B_{cp.}} \right)^2 \quad (6.59)$$

Уравнение (6.59) получено из (6.58) при следующих значениях: $k_{ок} = 0,25$, $K_{дооб.} = 2$, $K_t = 1,4$, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см.}$ (для медного провода).

Среднюю за период T_H мощность потерь в сердечнике из ленточного магнитного материала определяют по формуле

$$\Delta P_{c.ср.} = \frac{\Delta B_{ср.}^2 \cdot \delta_l^2 \cdot \gamma_c}{12 \cdot t_0 \cdot T_u} \cdot V_c \quad (6.60)$$

или за время действия импульса $\Delta P_c = \frac{\Delta B_{ср.}^2 \cdot \delta_l^2 \cdot \gamma_c}{12 \cdot t_0^2}$.

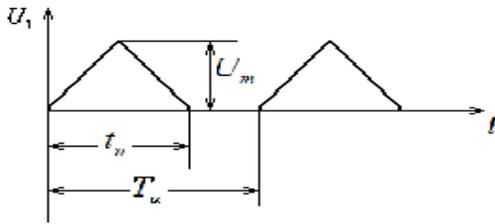


Рис.6.6.

Из сравнения (6.58) и (6.60) определим[5]

$$\Delta B_{ср.} \text{ при условии } \Delta P_c = \Delta P_{об.}$$

$$\Delta B_{ср.} = \frac{0,68 \cdot t_0 \sqrt{P_u}}{\delta_l^{0,5} \cdot \gamma_c^{0,25} \cdot V_c^{0,666}} \quad (6.61)$$

Для непрямоугольного импульса индукцию вычисляют по уравнению

$$\Delta B_{ср.} = \int_0^{t_u} U dt / (w_1 S_c) \quad (6.62)$$

Как указано в §4.2 реальную форму импульса заменяют прямоугольным или экспоненциальным. (см. табл. 4.1).

Пример 6.8. Расчет ТММ при питании импульсным напряжением

Рассчитать двухобмоточный трансформатор с мощностью в импульсе $P_u = 300 \text{ Вт}$. ТММ питается импульсным напряжением треугольной формы (рис. 6.6). Данные: длительность $t_u = 100 \text{ мкс.}$, период $T_u = 800 \text{ мкс.}$, амплитуда напряжения $U_{1m} = 60 \text{ В}$, $U_{2m} = 10 \text{ В}$, температура рабочая $t_p = 120^\circ \text{ C}$, $t_{oc} = 50^\circ \text{ C}$,

Решение:

1. Выбираем ЭТС марки 3424 с толщиной ленты $\delta_l = 0,08 \text{ мм}$.

По таблице 3.1 находим $p_0 = 16,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^3$, $\alpha = 1,2$, $\beta = 1,6$, по которым рассчитываем коэффициент А (потерь в единице объема)

$$A_u = \rho_0 \cdot f_u^{(\alpha-1,5)} \cdot B_m^{(\beta-2)} \cdot (f^*)^{-\alpha} \cdot (B_m^*)^{-\beta} = 16,6 \cdot 10^{-2} \cdot 5000^{(-0,3)} \cdot (10^{-5})^{(-0,4)} \cdot 10^{(4,1,6-3,1,2)} = 486 \text{ А} \cdot \text{см}/(\text{В} \cdot \text{с}^{0,5})$$

где $f = 1/(2 \cdot T_u) = 1/(200 \cdot 10^{-6}) = 5000 \text{ Гц}$.

С учетом коэффициента резки (табл. 2.10)

$$A_u = 1,6 \cdot 486 = 777 \text{ А} \cdot \text{см}/(\text{В} \cdot \text{с}^{0,5}).$$

2. Определим по (6.53) оценочное значение объема ТММ.

$$V_c = 1,5 \sqrt{\frac{A_u \cdot K_{доб.} \cdot K_t}{k_{ок}}} \cdot \frac{P_u}{\tau \cdot f^{0,25}} \cdot \left[\frac{1 + 3e^{(1-q)}}{4} \right] = 1,5 \sqrt{\frac{777 \cdot 2 \cdot 1,4}{0,25}} \cdot \frac{300}{70 \cdot 5000^{0,25}} \cdot \frac{1 + 3e^{(1-8)}}{4} = 34,93 \text{ см}^3$$

где $q = T_u / t_u = 0,8 \cdot 10^{-3} / 10^{-4} = 8$.

3. По табл. П.3 выбираем сердечник ШЛ16х20, $V_c = 38.1 \text{ см}^3$, $S_c = 2.8 \text{ см}^2$, $L_c = 13.6 \text{ см}$, $S_{ок} = 6.4 \text{ см}^2$, $h_{ок} = 4 \text{ см}$, $c_{ок} = 1.6 \text{ см}$, $a_m = \sqrt{S_c} \approx 2.1 \text{ см}$.

4. Действующие за время действия t_u напряжения и токи равны:

$$U_1 = U_{1m} / \sqrt{3} = 60 / 1.73 = 34.6 \text{ В}; \quad U_2 \approx 5.77 \text{ В};$$

$$I_1 = P_u / U_1 = 300 / 34.6 = 8.67 \text{ А}; \quad I_2 = I_1 K_{TP} = 52 \text{ А}; \quad K_{TP} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{60}{10} = 6$$

5. После замены треугольного импульса прямоугольным находим приращение индукции

$$\Delta B_{cp} = \frac{0.68 t_0 \sqrt{P_u}}{\delta_n^{0.5} \gamma_c^{0.25} V_c^{0.666}} = \frac{0.68 \cdot 70.7 \cdot 10^{-6} \sqrt{300}}{(8 \cdot 10^{-3})^{0.5} \cdot (2 \cdot 10^4)^{0.25} \cdot 38.1^{0.666}} = 0.743 \cdot 10^{-4} \text{ Вс} / \text{см}^2$$

где $t_0 = 0.707 \cdot t_u = 70.7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $\delta_n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}$; $\gamma_c = 2 \cdot 10^4 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$

6. Определяем число витков обмоток W_1 и W_2 .

$$w_1 = \int_0^{t_u} u \cdot dt / (\Delta B_{cp} \cdot S_c) = \frac{60 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.743 \cdot 10^{-4} \cdot 4.4} = 9.18 \text{ вит} \approx 9 \text{ вит}.$$

$$w_2 = w_1 / K_{TP} = 9.18 / 6 = 1.5 \text{ вит}.$$

7. Мощность потерь в сердечнике с учетом $K_p = 1.6$

$$\Delta P_c = \frac{\Delta B_{cp}^2 \delta_n \gamma_c' K_p V_c}{12 t_0^2} = \frac{0.743^2 \cdot 10^{-8} \cdot 0.008^2 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 1.6 \cdot 38.1}{12 \cdot (70.7 \cdot 10^{-6})^2} = 7.18 \text{ Вт}.$$

8. Определяем по (6.22) плотность тока в обмотках при $\Delta P_c = \Delta P_{об}$.

$$j = \sqrt{\frac{\Delta P_{об}}{2 \cdot V_c \cdot \rho \cdot k_{ок} \cdot K_{об} \cdot K_t}} = \sqrt{\frac{7.18}{2 \cdot 38.1 \cdot 1.7 \cdot 10^{-6} \cdot 0.25 \cdot 2 \cdot 1.4}} = 2.81 \cdot 10^2 \text{ А} / \text{см}^2 = 2.81 \text{ А} / \text{мм}^2$$

9. По плотности тока определяем сечение проводов обмоток

$$S_{np1} = I_1 / j = 8.67 / 2.81 = 3.09 \text{ мм}^2; \quad S_{np2} = 52 / 2.81 = 18.5 \text{ мм}^2$$

При таких сечениях $K_{об}$ больше расчетного ($K_{об} > 2$). Выбираем для первичной обмотки провод ЛЭТЛЮ-1,6(20х0,315) с наружным диаметром $d'_0 = 2.4 \text{ мм}$, для вторичной обмотки примем ЛЭТЛЮ-8(40х0,51) с наружным диаметром $d'_0 = 5.2 \text{ мм}$ сечением 0.08 см^2 . Плотность тока в обмотках будет

$$j_1 = \frac{I_1}{S_{np1}} = \frac{8.67}{1.6} = 5.4 \text{ А} / \text{мм}^2; \quad j_2 = 52 / 8 = 6.5 \text{ А} / \text{мм}^2.$$

10. Коэффициент добавочных потерь определим в соответствии с §4.3. С этой целью треугольный импульс тока заменим эквивалентным ему по потерям экспоненциальным импульсом. Из табл. 4.1 находим длительность импульса экспоненциального тока

$$t_{из} = t_0 / \xi = 70,7 \cdot 10^{-6} / 0,55 = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ сек},$$

$$\alpha_B = \frac{1}{0,43 \cdot 10^{-4}} = 2,32 \cdot 10^4 \text{ 1/сек}.$$

Коэффициент добавочных потерь для обмотки из круглого провода при $0 \leq x_1 \leq 1$ определим по формуле

$$K_{дооб} \approx \frac{(m \cdot n_p)^2}{5} \cdot x^2 - \frac{(m \cdot n_p)^2}{60} \cdot x^4 + 1.$$

Для первичной обмотки $m_1 = w_1 / (h_{ок} / d_{np1}) = 9 / (4 / 0,24) = 0,54$.

Число параллельных проводников в радиальном направлении при замене литцендрата эквивалентным по сечению квадратным

$$n_{1p} = \sqrt{20} \approx 4,5; \quad x_1 = d_{s1} \sqrt{\mu_a \cdot \gamma \cdot \alpha_B} = 0,0315 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot 5,88 \cdot 10^5 \cdot 2,32 \cdot 10^4} = 0,41,$$

$$K_{дооб} = 1 + \frac{(0,54 \cdot 4,5)^2}{5} \cdot 0,41^2 - \frac{(0,54 \cdot 4,5)^2}{60} \cdot 0,41^4 = 1,2 < 2.$$

Для вторичной обмотки $m_2 = w_2 / (h_{ок} / d_{np2}) = 1,5 / (4 / 0,52) = 0,195$,

$$n_{2p} = \sqrt{40} = 6,32; \quad x_2 = 0,051 \sqrt{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot 5,81 \cdot 10^5 \cdot 2,32 \cdot 10^4} = 0,66;$$

$$K_{дооб} = 1 + \frac{(0,195 \cdot 6,32)^2}{5} \cdot x_2^2 - \frac{(0,195 \cdot 6,32)^2}{60} \cdot x_2^4 = 1,13.$$

11. Мощность потерь в обмотках.

Определяем омическое сопротивление обмоток

$$R_{01} = \frac{w_1 \cdot L_{о01}}{\gamma \cdot S_{np1}} = \frac{9 \cdot 9,36}{5,8 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}} = 0,91 \cdot 10^{-2} \text{ Ом},$$

$$L_{о01} = (a + 2m_1 \cdot d_{np1} + b) \cdot 2 = (1,6 + 2 \cdot 0,54 + 2) = 9,36 \text{ см},$$

$$R_{02} = \frac{w_2 \cdot L_{о02}}{\gamma \cdot S_{np2}} = \frac{1,5 \cdot 10,4}{5,8 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

$$L_{о02} = (1,6 + 2 \cdot 0,195 + 2) \cdot 2 \cdot 1,3 = 10,4 \text{ см}.$$

Вторичная обмотка имеет длину на 30% больше $L_{о01}$, так как мотается по верх первичной обмотки.

Общие потери в обмотках и сердечнике

$$\Delta P_{о01} = R_{01} \cdot K_{до01} \cdot K_t \cdot I_1^2 = 0,91 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 1,4 \cdot 8,67^2 = 1,15 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_{о02} = R_{02} \cdot K_{до02} \cdot K_t \cdot I_2^2 = 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot 1,13 \cdot 1,4 \cdot 52^2 = 1,45 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_{о0} = \Delta P_{о01} + \Delta P_{о02} = 1,15 + 1,45 = 2,6 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{оо}} + \Delta P_c = 2,6 + 7,18 = 9,78 \text{ Вт.}$$

6.6. Собственная емкость обмоток

Другим важнейшим параметром для индуктивных элементов, кроме L_s , является собственная емкость обмоток. В общем случае последняя складывается из емкостей между внутренним слоем обмотки и магнитопроводом $C1$; между слоями $C2$, между обмотками (для трансформатора TV)- $C3$.

На рис. 6.7 приведена электрическая схема трансформатора и емкости его обмоток (а); приведение емкостей к первичной обмотке (б)

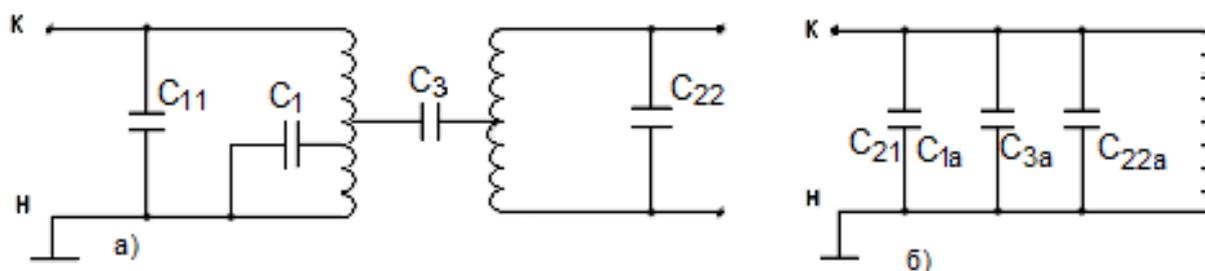


Рис. 6.7. Схема трансформатора с учётом ёмкостей обмоток

Разделение общей емкости на частные удобно, так как это позволяет анализировать сложные схемы соединения обмоток.

Приведение отдельных емкостей к входным зажимам конкретной области производится по общей формуле, имеющей вид: $C' = C \cdot f(w/w_n)$, где c' - приведенное к зажимам обмотки значение частной емкости C , реально подключенной к виткам обмотки w ; w_n - полное число витков обмотки; $f(w/w_n)$ - вид функции приведения.

Вид функции приведения определяется видом частной емкости:

а) для $C1$ $f(w/w_n) = \left(\frac{w}{w_n}\right)^2$, где w - число витков в слое обмотки ближайшей к магнитопроводу;

б) для $C2$ $f(w/w_n) = \left(\frac{w}{w_n}\right)^2$;

в) для $C3$ $f(w/w_n) = (1 - w_2/w_1)^2$, где w_1 - число витков обмотки, к зажимам которой приводится емкость $C3$; w_2 - число витков другой обмотки.

Если имеется две индуктивно связанные обмотки w_1 и w_2 , то для приведения емкости C , которая уже предварительно приведена к обмотке w_2 , к обмотке w_1 служит формула $f(w_1/w_2) = (w_2/w_1)^2$. Для понижающего трансформато-

ра $w_1 > w_2$ полная емкость обмотки W_2 уменьшается при приведении ее к обмотке w_1 , а у повышающего трансформатора TV – наоборот.

В [4;5] приведены следующие уравнения для определения частных емкостей:

а) емкость между первым слоем обмотки и сердечника

$$C_1 = \frac{8 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r \cdot L_{об} \cdot n}{4 \cdot a' - \pi \cdot r} \text{ - для рядовой намотки,} \quad (6.63)$$

$$C'_1 = \frac{8 \varepsilon \varepsilon_0 r L_{об} \cdot m'}{4 a' - \pi \cdot r} \text{ - для намотки типа пирамиды,} \quad (6.64)$$

где $\varepsilon = 3-4$ - для большинства изоляционных материалов – относительная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$; r - радиус неизолированного провода (см); $L_{об}$ - средний периметр витка (см); a' - расстояние между магнитопроводом и осью обмотки (см), n - число витков в первом слое; m' - число «косых слоев» пирамиды.

б) емкость между слоями, приведенная к выводам обмотки:

$$C_2 = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r \cdot n \cdot L_{об}}{(4 \cdot a_1 - \pi \cdot r) \cdot (m-1)} \text{ - для рядовой намотки} \quad (6.65)$$

$C'_1 \approx 0$ - для намотки типа «пирамида», где m - число слоев; $2a_1$ - расстояние между осями витков провода (см);

в) емкость между обмотками [4]

$$C_3 = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{cp} \cdot n_{cp} \cdot L_{об}}{4 \cdot a_2 - \pi \cdot r_{cp}}, \quad (6.66)$$

где r_{cp} - средний радиус голого провода смежных обмоток (см);

n_{cp} - среднее число витков в смежных слоях обмоток; $2 \cdot a_2$ - расстояние между осями провода смежных слоев соседних обмоток.

Емкость между слоями определяется как $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h \cdot L_{об} / \delta$

Расстояние между слоями проводов в обмотке

$\delta = (a - m \cdot d) / (m - 1) = a \cdot (1 - k_{OK} / \pi) / (m - 1)$, здесь k_{OK} - коэффициент заполнения окна медью определяется как $k_{OK} = S_M / S_{об} = m \cdot \pi \cdot d / 4 \cdot a$, где S_M , $S_{об}$ - площадь суммарного сечения меди и сечения обмотки $S_{об}$; a , h - ширина и высота сечения $S_{об}$; если диаметр провода d , то $S_M = m \cdot \pi \cdot n \cdot d^2 / 4$

При плотной намотке витков $n = h/d$; m, n – числа слоев и витков в слое соответственно.

Приведенная емкость

$$C' = \frac{C}{m-1} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h \cdot L_{об}}{a \cdot (1 - 4 \cdot k_{0K} / \pi)} \quad (6.67)$$

Из этой формулы видно, что межслоевая емкость не зависит от числа витков, слоев и параметра провода.

Емкость C' пропорциональна емкости конденсатора, у которого площадь пластин равна произведению высоты обмотки h на средний периметр витка, и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами, равному ширине обмотки. При $k_{0K} = 0,25$ коэффициент пропорциональности $(1 - 4 \cdot k_{0K} / \pi)^{-1} = 1,46$

Полная емкость воздушных катушек

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot h \cdot L_{об}}{a \cdot (1 - 4 \cdot k_{0K} / \pi)} + 1,8 \cdot \varepsilon_0 \cdot L_{об} \approx \varepsilon_0 \cdot L_{об} \cdot (1,8 + 1,47 \cdot h/a) \quad (6.68)$$

Оценочная (приближенная) формула для определения собственной емкости трансформатора (для приближенных геометрических параметров сердечников, при условии концентрического расположения обмоток без секционирования и специальных способов соединения обмоток).

Ориентировочное значение емкости

$$C = 1,26 \cdot 10^{-11} \cdot V_c^{0,333} \left[3,2 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 + \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right)^2 \cdot 1,26 \cdot V_c^{0,333} \right], \quad (6.69)$$

где C – емкость (Φ); V_c – объем сердечника ($см^3$).

Собственная емкость тороидального трансформатора (рис. 6.4) [4]

$$C = \left[C_{21} + \frac{c_3}{2} \cdot \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right)^2 + 2 \cdot C_{22} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{N}, \quad (6.70)$$

где C_{21} и C_{22} – межслоевые емкости секций первичной и вторичной обмоток, определяемые по выше приведенным уравнениям; N – общее число секций обмоток w_1 и w_2 .

Емкость C_3 между секциями равна

$$C_3 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (q + g) \cdot L_{об}}{2 \cdot b'}, \quad (6.71)$$

где b' - расстояние от внутреннего слоя обмотки до магнитопровода; $2q$ и $2g$ - ширина секции (по средней линии магнитопровода) обмоток w_1 и w_2 .

При намотке секций в один слой

$$C = \frac{C_3}{2N} \left(1 + \frac{w_2}{w_1} \right)^2 \quad (6.72)$$

Расчет собственной емкости ТВ целесообразно производить, придерживаясь следующей последовательности:

- а) на схематический чертеж наносятся все частные емкости;
- б) составляется электрическая схема обмоток ТВ;
- в) полученная исходная схема путем последовательных упрощений с помощью формул приведения (функции $f(w/w_n)$) преобразуется в элементарную схему, представляющую собой параллельное соединение полной собственной емкости ТВ и индуктивности первичной обмотки.

Пример 6.9. Расчет собственной емкости трансформатора

На магнитопроводе типа ШЛ25х25, $V_c = 1197 \text{ см}^3$ размещены две обмотки w_1 и w_2 . Начало и конец обмоток обозначены буквами Н и К. Магнитопровод заземлен. Число слоев первичной обмотки $m_1 = 5$, число витков $w_{cл1} = 60 \text{ вит}$; $w_1 = m_1 \cdot w_{cл1} = 5 \cdot 60 = 300 \cdot \text{вит}$; для вторичной обмотки $m_2 = 9$, $w_{cл2} = 100$, т. е. $w_2 = 900 \text{ вит}$. Диаметр провода $d_{np1} = 0,09 \text{ см}$, $d_{np2} = 0,05 \text{ см}$; рас

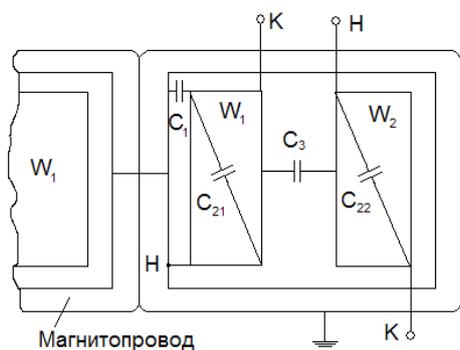


Рис.6.8. Собственные ёмкости

стояние от магнитопровода до обмотки W_1 $a = 0,2 \text{ см}$. расстояние между осями проводов в слоях обмотки: первичной $2a_1 = 0,1 \text{ см}$, вторичной $2a_1^1 = 0,06 \text{ см}$; расстояние между осями проводов смежных слоев соседних обмоток $a_2 = 0,1 \text{ см}$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3$, средняя длина обмотки $L_{об} = 20 \text{ см}$.

Определим собственную емкость обмоток, для чего на конструктивную схему обмоток трансформатора (рис. 6.8) нанесены емкость C_1 между первым слоем обмотки W_1 и магнитопроводом; межслоевые емкости C_{21} и C_{22} обмоток W_1 и W_2 ; ёмкости C_3 между обмотками w_1 и w_2 .

Определяем значения емкостей [4]

$$C_1 = \frac{8 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{np1} \cdot L_{об} \cdot w_{cl1}}{2 \cdot a_1 - \pi \cdot r_{np1}} = 1,74 \cdot 10^{-10} \Phi,$$

$$C_{21} = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{np1} \cdot L_{об} \cdot w_{cl1}}{(4 \cdot a_1 - \pi \cdot r_{np1}) \cdot (m_1 - 1)} = 2,45 \cdot 10^{-10} \Phi,$$

$$C_{22} = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{np2} \cdot L_{об} \cdot w_{cl2}}{(4a_1' - \pi \cdot r_{np2}) \cdot (m_2 - 1)} = 1 \cdot 10^{-10} \Phi,$$

$$C_3 = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{np.cp} \cdot L_{об} \cdot w_{cl.cp}}{4 \cdot a_2 - \pi \cdot r_{np.cp}} = 2,05 \cdot 10^{-6} \Phi,$$

$$r_{np.cp} = 0,25 \cdot (d_{np1} + d_{np2}) = 0,035 \text{ мм}; \quad w_{cl.cp} = 0,5 \cdot (w_{cl.1} + w_{cl.2}) = 80.$$

Полная электрическая схема приведена на рис. 6.7,а

Приведем отдельные части емкостей к первичным обмоткам по формулам приведения в соответствии с рис.6.7,б

$$C_{1a} = C_1 \left(\frac{W_{cl1}}{W_1} \right)^2 = 1,74 \cdot 10^{-10} \left(\frac{60}{300} \right)^2 = 6,96 \cdot 10^{-12} \Phi,$$

$$C_{3a} = C_2 \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right)^2 = 2,05 \cdot 10^{-10} \left(1 - \frac{900}{300} \right)^2 = 8,2 \cdot 10^{-10} \Phi.$$

Полная собственная емкость трансформатора

$$C_0 = C_{1a} + C_{21} + C_{22a} + C_{3a} = 6,96 \cdot 10^{-12} + (2,45 + 14,4 + 8,2) \cdot 10^{-10} = 2,53 \cdot 10^{-9} \Phi.$$

Согласно оценочной формуле (6.70) емкость трансформатора

$$C_0 = 3,4 \cdot 10^{-9} \Phi.$$

Пример 6.10. Расчет собственной емкости повышающего ТММ

Рассчитать собственную ёмкость повышающего трансформатора источника вторичного электропитания для следующих данных:

входное напряжение $U_1 = 30 \text{ В}$, выходное напряжение $U_2 = 4500 \text{ В}$; собственная ёмкость вторичной обмотки $C_2^1 = 260 \text{ нФ}$. Определить ёмкость на частоте 20 кГц .

Решение

Величина ёмкости, приведенная к первичной обмотке, определяется по формуле [15]

$$C_2^1 = C_2 \cdot (W_2 / W_1)^2 = 60 \cdot 10^{-12} \cdot 150^2 = 1,35 \text{ мкФ},$$

где W_1, W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

На частоте $f = 20 \text{ кГц}$ для зарядки такой ёмкости до напряжения 30 В необходим средний ток в первичной обмотке должен быть не менее:

$$I_{cp} = 2U_1 / C_2^1 \cdot 0,5 \cdot T = 2 \cdot 30 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6} / 25 \cdot 10^{-6} = 3,24 \text{ А}.$$

При мощности трансформатора $P_{тр} = 450 \text{ ВА}$ ток вторичной обмотки должен составлять около $0,1 \text{ А}$, что более, чем в 30 раз меньше.

Для снижения собственной ёмкости вторичную обмотку следует разбить на несколько секций, каждую из которых в ИВЭП следует подключить к диодной сборке с C -фильтром, а выпрямители соединить последовательно, при этом существенно уменьшается зарядный ток выпрямителя и повышается КПД.

Литература

1. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М: Советское радио, 1971. – 720с.
2. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1987. - 167с.
3. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400с.
4. Горский А.Н., Русин Ю.С. и др. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. – М.: Радио и связь, 1988. – 176с.
5. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник./ Ю.С. Русин, И.Я. Гликман, А.Н. Горский. – М.: Радио и связь, 1991. – 224с.
6. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств. Учебное пособие. – Томск: изд-во ТУСУР, 2007. -125 с.
7. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392с.
8. Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Под ред. Г.С. Найвельта. - М.: Радио и связь, 1986. – 576с.
9. Терещук Р.М. и др. Полупроводниковые приёмно-усилительные устройства: Справочник радиолюбителя. – Киев: Наукова думка, 1988. -800 с.
10. Грумбина А.Б. Электрические машины и источники питания радиоэлектронных устройств. – М.: ЭАИ, 1990. – 386с.
11. Сидоров И.Н. и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники. Справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 384с.
12. Гольдштейн Е.И., Майер А.К. Индуктивно-емкостные сглаживающие фильтры.- Томск: ТГУ, 1982.-222 с.
13. Драбович Ю.И., Криштафович И.А. Определение параметров силовых трансформаторов транзисторных преобразователей на частотах до 1МГц.// Проблемы миниатюризации и унификации ВИП РЭА: Материалы семинара.
14. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И. и др. Высокочастотные транзисторные преобразователи.-М.: Радио и связь, 1988.-288 с.
15. Драбович Ю.И., Криштафович И.А., Пономарёв И.Г. Построение высоковольтных источников постоянного напряжения повышенной эффективности. -Проблемы преобразовательной техники. –Киев: ИЭД АН УССР, 1979, №1.
16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Высшая школа, 2002.-638 с.

Приложение

Расчетные параметры кольцевых ленточных магнитопроводов типа ОЛ

Таблица П. 1

Типоразмер магнитопровода	Активная площадь сечения магнитопровода $S_{ст}, \text{см}^2$	Площадь окна магнитопровода $S_{ок}, \text{см}^2$	Площадь сечения стали, умноженная на площадь окна $S_{ст} S_{ок}, \text{см}^4$	Средняя длина силовой линии $L_c, \text{см}$	Активный объем магнитопровода $V_{ст}, \text{см}^3$	Ширина стержня "а", мм	Высота стержня "h", мм	Ориентировочная мощность трансформатора, ВА	
								50Гц	400Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОЛ 6x 8-2,5	0,025	0,283	0,007	2,2	0,055	1	2,5		
ОЛ 6x12-5	0,15	0,251	0,037	2,83	0,424	3	5		
ОЛ 6x12-6,5	0,195	0,251	0,049	2,83	0,551	3	6,5		
ОЛ 8x10-2,5	0,025	0,502	0,012	2,83	0,056	1	2,5		
ОЛ 8x12-5	0,1	0,472	0,047	3,14	0,314	2	5		
ОЛ 8x12-6,5	0,129	0,472	0,061	3,14	0,408	2	6,5		
ОЛ 10x12-2,5	0,025	0,785	0,019	3,46	0,069	1	2,5		
ОЛ 10x16-4	0,12	0,69	0,094	4,1	0,49	3	4		
ОЛ 10x16-5	0,15	0,69	0,104	4,1	0,612	3	5		
ОЛ 10x16-6,5	0,195	0,69	0,135	4,1	0,78	3	6,5		
ОЛ 10/x16-8	0,24	0,69	0,166	4,1	0,96	3	8		
ОЛ 12x14-3	0,03	1,13	0,034	4,08	0,123	1	3		
ОЛ 12x14-4	0,04	1,13	0,045	4,08	0,163	1	4		
ОЛ 12x20-5	0,2	1,03	0,206	5,02	1,005	4	5		
ОЛ 12x20-6,5	0,26	1,03	0,268	5,02	1,307	4	6,5		
ОЛ 12x20-8	0,32	1,03	0,33	5,02	1,608	4	8		
ОЛ 12x20-10	0,4	1,03	0,412	5,02	2,011	4	10		

Продолжение таблицы П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОЛ 14x17-3	0,045	1,538	0,069	4,87	0,219	4	3		
ОЛ 14x17-4	0,06	1,538	0,092	4,87	0,292	1,5	4		
ОЛ 16x20-3	0,06	2,009	0,121	5,65	0,339	1,5	3		
ОЛ 16x20-4	0,08	2,009	0,161	5,65	0,452	2	4		
ОЛ 16x20-5	0,1	2,009	0,201	5,65	0,565	2	5		
ОЛ 16x26-5	0,25	1,91	0,477	6,6	1,649	2	5		
ОЛ 16x26-6,5	0,325	1,91	0,621	6,6	2,212	5	6,5	0,48	7,0
ОЛ 16x26-8	0,4	1,91	0,764	6,6	2,6	5	8	0,6	8,8
ОЛ 16x26-10	0,5	1,91	0,955	6,6	3,298	5	10	0,73	10,1
ОЛ 16x26-12,5	0,625	1,91	1,194	6,6	4,123	5	12,5	0,92	13,6
ОЛ 18x23-4	0,1	2,543	0,254	6,45	0,645	2,5	4		
ОЛ 18x23-5	0,125	2,543	0,319	6,45	0,806	2,5	5		
ОЛ 20x25-5	0,125	3,142	0,392	7,06	0,884	2,5	5		
ОЛ 20x25-6,5	0,163	3,142	0,51	7,06	1,15	2,5	6,5		
ОЛ 20x28-5	0,2	3,142	0,628	7,55	1,508	4	5		
ОЛ 20x28-6,5	0,26	3,142	0,816	7,55 8,16	1,96	4	6,5		
ОЛ 20x32-8	0,48	2,94	1,411		3,921	6	8	1,2	16,9
ОЛ 20x32-10	0,6	2,94	1,76	8,16	4,901	6	10	1,4	20,8
ОЛ 20x32-12,5	0,75	2,94	2,205	8,16	6,126	6	12,5	1,8	26,0
ОЛ 20x32-16	0,96	2,94	2,822	8,16	7,841	6	16	2,3	33,7
ОЛ 22x30-5	0,2	3,799	0,759	8,17	1,635	4	5		
ОЛ 22x30-6,5	0,26	3,799	0,988	8,17	2,12	4	6,5		
ОЛ 25x35-5	0,25	4,906	1,226	9,42	2,35	5	5		
ОЛ 25x35-6,5	0,325	4,906	1,594	9,42	3,06	5	6,5		
ОЛ 25x40-5	0,375	4,906	1,839	10,2	3,828	7,5	5		

Продолжение таблицы П.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОЛ 25x40-6,5	0,487	4,906	2,392	10,2	4,97	7,5	6,5		
ОЛ 25x40-10	0,75	4,71	3,533	10,2	4,977	7,5	10	2,9	38
ОЛ 25x40-12,5	0,94	4,71	4,427	10,2	9,572	7,5	12,5	3,7	47
ОЛ 25x40-16	1,2	4,71	5,652	10,2	12,252	7,5	16	4,7	60
ОЛ 25x40-20	1,5	4,71	7,065	10,2	15,315	7,5	20	5,8	75
ОЛ 25x40-25	1,88	4,71	8,855	10,2	19,144	7,5	25	7,3	94
ОЛ 28x40-8	0,48	6,154	2,954	10,7	5,12	6	8		
ОЛ 28x40-10	0,6	6,154	3,693	10,7	6,4	6	10		
ОЛ 32x45-8	0,52	8,038	4,179	12,1	6,3	6,5	8		
ОЛ 32x45-10	0,65	8,038	5,225	12,1	7,85	6,5	10		
ОЛ 32x50-8	0,72	8,038	5,787	12,9	9,28	9	8		
ОЛ 32x50-10	0,9	8,038	7,234	12,9	11,6	9	10		
ОЛ 32x50-16	1,44	7,54	10,858	12,87	18,548	9	16	9,3	120
ОЛ 32x50-20	1,8	7,54	13,572	12,87	23,185	9	20	11,6	149
ОЛ 32x50-25	2,25	7,54	16,965	12,87	28,981	9	25	14,6	187
ОЛ 32x50-32	2,88	7,54	21,715	12,87	37,096	9	32	18,7	240
ОЛ 36x56-8	0,8	10,137	8,138	14,4	11,529	10	8		
ОЛ 36x56-10	1	10,137	10,137	14,4	14,412	10	10		
ОЛ 40x56-12,5	1	12,56	12,56	15,1	15,031	8	12,5		
ОЛ 40x56-16	1,28	12,56	16,0077	15,1	19,239	8	16		
ОЛ 40x64-12,5	1,5	12,56	18,84	16,3	24,504	12	12,5		
ОЛ 40x64-16	1,92	12,56	24,115	16,3	31,366	12	16		
ОЛ 40x64-20	2,4	11,78	28,272	16,33	39,207	12	20	24	278
ОЛ 40x64-25	3	11,78	35,34	16,33	49,009	12	25	30	346
ОЛ 40x64-32	3,84	11,78	45,235	16,33	62,731	12	32	39	444
ОЛ 40x64-40	4,8	11,78	56,544	16,33	78,414	12	40	49,5	515
ОЛ 45x70-16	2	15,896	31,792	18,05	36,128	12,5	16		
ОЛ 50x70-20	2	19,625	39,25	18,85	37,699	10	20		
ОЛ 50x70-25	2,5	19,625	49,063	18,85	47,123	10	25		
ОЛ 50x80-20	3	18,5	58,875	20,41	61,261	15	20		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОЛ 50x80-25	3,75	18,5	69,375	20,41	76,576	15	25	58,5	550
ОЛ 50x80-32	4,8	18,5	88,8	20,41	98,018	15	32	75	660
ОЛ 50x80-40	6	18,5	11	20,41	122,522	15	40	935	825
ОЛ 50x80-50	7,5	18,5	138,75	20,41	153,152	15	50	117	1030
ОЛ 56x90-20	3,4	24,617	83,699	22,9	77,974	17	20		
ОЛ 56x90-25	4,25	24,617	104,625	22,9	97,468	17	25		
ОЛ 64x100-20	3,6	32,17	115,753	25,8	92,739	18	20		
ОЛ 64x100-25	4,5	32,17	144,691	25,8	115,924	18	25		
ОЛ 64x100-32	5,75	32,17	184,883	25,8	148,383	18	32	148	1300
ОЛ 64x100-40	7,2	32,17	231,624	25,8	185,479	18	40	186	1630
ОЛ 64x100-50	9	32,17	289,53	25,8	231,849	18	50	233	2040
ОЛ 64x100-64	11,5	32,17	370,598	25,8	296,767	18	64	293	2300
ОЛ 70x110-32	6,4	38,465	246,176	28,3	180,955	20	32		
ОЛ 70x110-40	8	38,465	307,72	28,3	226,192	20	40		
ОЛ 80x128-32	7,68	50,27	385,843	32,6	250,925	24	32		
ОЛ 80x128-40	9,6	50,27	482,304	32,6	313,656	24	40	340	2500
ОЛ 80x128-50	12	50,27	603,24	32,6	392,971	24	50	428	2650
ОЛ 80x128-64	15,3	50,27	769,131	32,6	501,85	24	64	548	3340
ОЛ 80x128-80	19,2	50,27	965,148	32,6	627,313	24	80	685	4170
ОЛ 80x130-40	10	47,1	471	32,97	329,867	25	40		
ОЛ 80x130-50	12,5	47,1	588,75	32,97	412,334	25	50		
ОЛ 80x130-64	16	47,1	753,6	32,97	527,787	25	64		
ОЛ 80x130-80	20	47,1	942,2	32,97	659,734	25	80		
ОЛ 90x140-40	10	63,585	635,85	36,1	361,283	25	40		
ОЛ 100x160-32	9,6	78,5	753,6	40,8	392,071	30	32		
ОЛ 100x160-40	12	78,5	942	40,8	490,09	30	40		

Расчетные параметры стержневых ленточных магнитопроводов типа ПЛ

Таблица П. 2

Типоразмер магнитопровода	Активная площадь сечения магнитопровода, $S_{СТ}, \text{см}^2$	Площадь окна $S_{ОК}, \text{см}^2$	Площадь сечения стали, умноженная на площадь окна $S_{СТ} S_{ОК}, \text{см}^4$	Средняя длина силовой линии $L_c, \text{см}$	Активный объем стали, $V_{СТ}, \text{см}^3$	Коэф. заполнения окна сердечника, K_0	Средняя длина витка, $L_k, \text{см}$	Предельное значение мощности, $B-A$, трансформаторов		$a, \text{мм}$	$b, \text{мм}$	$c, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	$A, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	Масса, г
								50 Гц	400 Гц							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ПЛ6,5x12,5x8 ПЛ6,5x12,5x10 ПЛ6,5x12,5x12,5 ПЛ6,5x12,5x16	0,73	0,64 0,8 1 1,28	0,467 0,584 0,73 0,934	3,69 3,98 4,33 4,83	2,69 2,9 3,16 3,52	0,1	5,4	2,5 2,7 3 3,25	10,5 12,6 15,3 18,7	6	12,5	8	8 10 12,5 16	21	21 23 25,5 29	28 30 33 37
ПЛ8x12,5x12,5 ПЛ8x12,5x16 ПЛ8x12,5x20 ПЛ8x12,5x25	0,9	1,25 1,62 2,5	1,125 1,44 1,8 2,25	6,06 6,68 7,38 8,26	5,45 6,01 6,64 7,43	0,13	6,1	3,56 4,4 4,8 6	23 28,4 33 39	8	12,5	10	12,5 16 20 25	26	28,5 32 36 41	47 51 57 63
ПЛ10x12,5x20 ПЛ10x12,5x25 ПЛ10x12,5x32 ПЛ10x12,5x40	1,01	2,5 3,12 4 5	2,5 3,15 4,04 5,05	9,6 10,6 11,6 13,6	9,69 11,76 12,71 13,74	0,15	7	7,5 8,8 10 12,5	46,5 60 73	10	12,5	12,5	20 25 32 40	32,5	40 45 52 60	81 89 98 114
ПЛ12,5x16x25 ПЛ12,5x16x32 ПЛ12,5x16x40 ПЛ12,5x16x50	1,8	4 5,12 6,4 8	7,2 9,2 16 11,52 14,4	12 13,4 15 17	21,6 24,12 27 30,6	0,18	8,9	13,5 16 19 22	91 110 130 156	12,5	16	16	25 32 40 50	41	50 55 65 75	163 182 203 230
ПЛ12,5x25x32 ПЛ12,5x25x40 ПЛ12,5x25x50 ПЛ12,5x25x60	2,81	6 8 10 12	16,81 22,48 28,1 33,72	13,8 15,8 17,8 19,8	38,78 44,39 50,02 55,64	0,2	11,5	28 35 44 55	200 248 300 340	12,5	25	20	32 40 50 60	45	57 65 75 85	292 334 376 418

Продолжение таблицы П.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ПЛ16х32х40 ПЛ16х32х50 ПЛ16х32х65 ПЛ16х32х80	4,64	10 12,5 16,25 20	46,1 57,62 74,91 92,2	18 20 23 26	82,98 92,2 106 119,86	0,23	14,6	70 90 115 145	430 510 620 730	16	32	25	40 50 65 80	57	72 82 97 112	612 690 795 900
ПЛ20х40х50 ПЛ20х40х60 ПЛ20х40х80 ПЛ20х40х100	7,2	16 19,2 25,6 32	115,2 138,2 184,32 230,4	22,7 24,7 28,7 32,7	163,44 177,84 206,6 235,4	0,25	18,4	180 220 280 350	860 980 1220 1450	20	40	32	50 60 80 100	72	90 10 120 140	1230 1350 1550 1770
ПЛ25х50х 65 ПЛ25х50х80 ПЛ25х50х100 ПЛ25х50х120	11,25	26 32 40 48	292,5 360 450 540	28,8 31,8 35,8 39,8	324 357,7 402,7 447,7	0,25	23	420 500 620 740	1840 2150 2600 2800	25	50	40	65 80 100 120	90	115 130 150 170	2440 2700 3040 3380
ПЛ32х64х80 ПЛ32х64х100 ПЛ32х64х130 ПЛ32х64х160	18,43	40 50 65 80	737,2 921,5 1198 1474	36 40 46 52	663,4 737,2 847,8 958,4	0,3	29,2	1000 1200 1400 1750	3500 4000 4800 5600	32	64	50	80 100 130 160	114	144 164 194 224	5000 5600 6480 7250
ПЛ40х80х100 ПЛ40х80х120 ПЛ40х8х160 ПЛ40х80х200	28,8	64 76,8 102,4 128	1843 2212 2949 3689	45,3 49 57,3 65,3	1304,6 1411,2 1650,2 1880,6	0,3	36,8	2400 2800 3500 4200	6720 7750 9000 1000 0	40	80	64	100 120 160 200	144	180 200 240 280	9900 10700 12500 14300

Расчетные параметры броневых ленточных магнитопроводов типа ШЛ

Таблица П.3

Типоразмер магнитопровода	a , мм	h , мм	c , мм	L , мм	H , мм	b , мм	h_1 , мм	Масса, г, не более	Активная площадь сечения сердечника S_c , см ²	Средняя длина силовой линии L_c , см	Площадь сечения $S_c S_{0K}$, см ⁴	Активн. объем сердечника $V_{ст}$, см ³	Масса сердечника, Г г, не более	Средняя длина витка обмотки L_k , см	Ориентировочная мощность трансформатора (В•А)	
															50 Гц	400 Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ШЛ8х8-h ШЛ8х8 ШЛ8х12,5 ШЛ8х16-h	8	20	8	33	29	8 10 12 16	4	30 37 47 60	0,55 0,69 0,86 1,16	6,8	1,02 1,28 1,6 2,05	4,35 5,45 6,8 8,7	30 37 47 60	5,1 5,5 6 6,7	--	--
ШЛ10х10-h ШЛ10х12,5 ШЛ10х16 ШЛ10х20-h	10	25	10	40	35	10 12,5 16 20	5	59 73 94 117	0,87 1,09 1,39 1,74	8,5	2,50 3,12 4 5	4,7 9,56 11,8 14,8	57 71 91 113	6,5 7 7,7 8,5	--	37 47 56 67
ШЛ12х12,5 ШЛ12х16 ШЛ12х20-h ШЛ12х25-h	12	30	12	48	42	12,5 16 20 25	6	105 133 169 210	1,31 1,68 2,1 2,63	10,2	5,4 6,9 8,7 10,8	13,36 17,1 21,4 26,8	100 130 165 205	8 8,7 9,5 10,5	9 10 13 16	80 94 112 135
ШЛ16х16-h ШЛ16х20 ШЛ16х32 ШЛ16х25-h	16	40	16	64	56	16 20 32 25	4	240 300 375 480	2,24 2,8 3,5 4,5	13,6	16,6 20,5 25,6 32,6	30,46 38,1 47,6 61,2	235 295 370 470	10,8 11,6 12,6 14	20 26 33 43	158 380 450 510
ШЛ20х20-h ШЛ20х25 ШЛ20х32 ШЛ20х40-h	20	50	20	80	70	20 25 32 40	10 10	470 590 755 940	3,5 4,4 5,6 7,1	17,1	40 50 64 80	59,9 75,2 95,8 121,4	460 575 735 920	13,7 14,7 16,1 17,7	54 68 86 110	330 380 450 510

Продолжение таблицы П. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	13	14	15	16
ШЛ25x25-h ШЛ25x32 ШЛ25x40 ШЛ25x50-h	25	62,5	25	100	87,5	25 32 40 50	12,5	915 1170 1470 1830	5,5 7,1 8,8 11	21,3	98 125 156 195	117 151,2 187,4 234	900 1150 1440 1800	17,2 18,8 20,2 22,2	135 170 210 260	610 730 810 990
ШЛ32x32-h ШЛ32x40 ШЛ32x50 ШЛ32x64-h	32	80	32	128	112	32 40 50 64	16	1920 2440 3060 3900	9,1 11,3 14,2 18,1	27,3	261 328 410 523	284,4 308,5 388 494	1900 2370 2970 3800	22,2 23,8 25,8 28,6	310 390 490 680	1200 1400 1650 1940
ШЛ40x40-h ШЛ40x50 ШЛ40x64 ШЛ40x80-h	40	100	40	160	140	40 50 64 80	20	3860 4800 6150 7700	14,2 17,7 22,7 28,4	34,2	640 800 1025 1280	486 605 776 971	3720 4650 5960 7430	27,9 29,9 32,7 35,9	690 850 1000 1200	2200 2500 3000 3500

Конструктивные размеры и параметры ленточных магнитопроводов типа ТЛ

Таблица П. 4

Типоразмер магнитопровода	a, мм	h, мм	c, мм	L, мм	H, мм	b, мм	h ₁ , мм	Активное сечение S _{ст} , см ²	Площадь окна S _{ок} , см ²	Площадь сечения стали и окна S _{ст} S _{ок} , см ⁴	Средняя длина L _с , см	Объем магнитопровода V, см ³	Частота, Гц	Номинальная мощность P _{ном} , Вт	Индукция Вм, Тл	Плотность тока J, А/мм ²	КПД η, %	Падение напряжения ΔU	
																		ΔU ₁	ΔU ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ТЛ 5x10-14 ТЛ 5x10-16 ТЛ5x10-18 ТЛ5x10-21 ТЛ5x10-24	5 5 5 5 5	14 16 18 21 21	14 14 14 14 14	43 43 43 43 13	24 26 28 31 34	10 10 10 10 10	46 48 51 54 54	0,5	1,96 2,24 2,52 2,94 3,36	0,98 1,12 1,26 1,47 1,68	9 9,5 9,8 10,5 11	5,9 6,15 6,4 6,8 7,2	400	-	1,4	-	-	-	-
ТЛ6,5x16-16 ТЛ6,5x10-18 ТЛ6,5x10-20 ТЛ6,5x10-23 ТЛ6,5x10-26	6,5 6,5 6,5 6,5 6,5	16 18 20 23 26	16 16 16 16 16	51,5 51,5 51,5 51,5 51,5	29 31 33 36 39	10 10 10 10 10	69 72 75 80 85	0,65	2,56 2,88 3,2 3,68 4,16	1,664 1,872 2,08 2,392 2,704	10,6 11 11,4 12 12,6	8,64 9,03 9,4 9,98 10,4	400	19 22 25 28 32	1,4	5	71 72 73 74 75	2,88 2,8 2,75 2,72 2,68	3,4 3,36 3,3 3,25 3,221
ТЛ8x12,5-18 ТЛ8x12,5-21 ТЛ8x12,5-24 ТЛ8x12,5-28 ТЛ8x12,5-32	8 8 8 8 8	18 21 24 28 32	18 18 18 18 18	60 60 60 60 60	34 37 40 44 48	12,5 12,5 12,5 12,5 12,5	122 128 134 144 154	1	3,24 3,78 4,32 5,04 5,76	3,24 3,78 4,32 5,04 5,76	12,2 12,8 13,4 14,2 15	14,4 16,3 17,1 18,1 19,3	400	40 45 50 57 64	1,4	5	75 76 77 78 79	2,52 2,48 2,44 2,4 2,36	3,02 2,98 2,92 2,88 2,83
ТЛ10x16-20 ТЛ10x16-23 ТЛ10x16-26 ТЛ10x16-31 ТЛ10x16-36	10 10 10 10 10	20 23 26 31 36	20 20 20 20 20	70 70 70 70 70	40 43 46 51 56	16 16 16 16 16	220 230 260 280 295	1,6	4 4,6 5,2 6,2 7,2	6,4 7,36 8,32 9,92 11,52	14 14,6 15,2 16,2 17,2	28,8 30,1 31,4 33 34,5	400	85 97 110 125 140	1,4	5 4,9 4,8 4,7 4,6	79 80 81 82 83	1,73 1,69 1,65 1,61 1,57	2,08 2,03 1,98 1,93 1,89

Продолжение таблицы П.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ТЛ12,5x20-25	12,5	25	25	87,5	50	20	430		6,25	15,625	17,5	56,2		25/180		4/4,2	74/83	6,3/1,18	7,5/1,42
ТЛ12,5x20-29	12,5	29	25	87,5	54	20	450		7,25	18,125	18,4	58,9		30/205		4/4,1	75/84	6,1/1,14	7,3/1,37
ТЛ12,5x20-33	12,5	33	25	87,5	58	20	480	2,5	8,25	20,625	19,2	61,5	$\frac{50}{400}$	$\frac{35}{230}$	$\frac{1,5}{1,32}$	4/4	76/85	5,8/1,1	7,1/1,32
ТЛ12,5x20-8,5	12,5	38,5	25	87,5	63,5	20	520		9,625	24,062	20,2	65,5	$\frac{50}{400}$	$\frac{40}{260}$	$\frac{1,5}{1,32}$	4/3,9	77/86	5,6/1,08	6,7/1,27
ТЛ12,5x20-44	12,5	44	25	87,5	69	20	570		11	27,5	21,3	69,4		$\frac{45}{295}$		4/3,8	78/87	5,38/1,02	6,4/1,23
ТЛ16x25-32	16	32	32	112	64	25	970		10,24	40,96	22,4	115		$\frac{63}{380}$		3,5/3,2	78/87	4,95/0,83	5,95/0,99
ТЛ16x25-37	16	37	32	112	69	25	1020		11,84	47,36	23,4	121,5		$\frac{72}{440}$		3,45/3,1	79/88	4,8/0,79	5,75/0,95
ТЛ16x25-42	16	42	32	112	74	25	1070	4	13,44	53,76	24,4	125,5	$\frac{50}{400}$	$\frac{81}{500}$	$\frac{1,5}{1,13}$	3,4/3	80/89	4,65/0,77	5,6/0,91
ТЛ16x25-49	16	49	32	112	81	25	1145		15,68	62,72	25,8	133,5	$\frac{50}{400}$	$\frac{93}{570}$	$\frac{1,5}{1,13}$	3,35/2,9	81/90	4,5/0,73	5,4/0,88
ТЛ 16x25-56	16	56	32	112	88	25	1220		17,92	71,68	27,2	141		$\frac{105}{640}$		3,3/2,8	82/91	4,4/0,71	5,2/0,85
ТЛ20x32-40	20	40	40	140	86	32	1770		16	102,4	28	225		$\frac{142}{740}$		2,9/2,4	82/91	3,54/0,6	4,25/0,73
ТЛ20x32-47	20	47	40	140	87	32	1870		18,8	120,32	29,5	235		$\frac{170}{850}$		2,85/2,35	83/92	3,46/0,56	4,1/0,7
ТЛ20x32-54	20	54	40	140	94	32	1970	6,4	21,6	138,24	30,8	248	$\frac{50}{400}$	$\frac{190}{960}$	$\frac{1,5}{0,96}$	2,8/2,3	84/93	3,4/0,56	4,06/0,67
ТЛ20x32-62	20	62	40	140	102	32	2095		24,8	158,72	32,5	262	$\frac{50}{400}$	$\frac{218}{1100}$	$\frac{1,5}{0,96}$	2,75/2,25	85/94	3,3/0,54	3,98/0,64
ТЛ20x32-70	20	70	40	140	110	32	2220		28	179,2	34	276		$\frac{255}{1250}$		2,7/2,2	86/95	3,23/0,51	3,88/0,6
ТЛ25x40-50	25	50	50	175	100	40	3420		25	250	35	440		$\frac{325}{1400}$		2,5/2,1	86/94	2,52/0,742	3,02/0,57
ТЛ25x40-58	25	58	50	175	108	40	3620		29	290	36,6	464		$\frac{375}{1575}$		2,45/2,05	87/95	2,44/0,46	2,92/0,55
ТЛ25x40-66	25	66	50	175	116	40	3820	10	33	330	38,2	484	$\frac{50}{400}$	$\frac{420}{1750}$	$\frac{1,45}{0,81}$	2,4/2	88/95	3,36/0,44	2,86/0,53
ТЛ25x40-77	25	77	50	175	127	40	4080		38,5	385	40,4	515	$\frac{50}{400}$	$\frac{480}{1950}$	$\frac{1,45}{0,81}$	2,35/1,95	89/96	2,28/0,43	2,74/0,51
ТЛ25x40-88	25	88	50	175	138	40	4340		44	440	42,6	550		$\frac{540}{2200}$		2,3/1,9	90/96	2,2/0,41	2,64/0,49
ТЛ32x40-64	32	64	64	224	128	40	5600		40,96	524,288	44,8	715		$\frac{680}{2400}$		2,25	91/95	1,97/0,42	2,36/0,5
ТЛ32x40-74	32	74	64	224	138	40	5951		47,36	606,208	46,8	753		$\frac{780}{2750}$		2,2	92/95	1,89/0,41	2,27/0,49
ТЛ32x40-84	32	84	64	224	148	40	6300	12	53,75	688,128	48,8	785	$\frac{50}{400}$	$\frac{880}{3100}$	$\frac{1,4}{0,73}$	2,15	93/96	1,81/0,4	2,17/0,48
ТЛ32x40-97	32	97	64	224	161	40	6700		62,02	793,856	51,4	830	$\frac{50}{400}$	$\frac{990}{350}$	$\frac{1,4}{0,73}$	2,1	94/96	1,73/0,39	2,08/0,47
ТЛ32x40-10	32	110	64	224	174	40	7100		70,4	901,12	54	885		$\frac{100}{4000}$		2,05	94/96	1,65/0,39	1,98/0,46

Примечание: в столбцах 15,16 и 17,18 и 19,20 приведены значения мощности и индукции, плотности тока и КПД и падения напряжения–

в числителе для частоты 50 Гц, в знаменателе для 400Гц, соответственно.

Конструктивные размеры кольцевых сердечников из ферритов марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ, 4000НМ,

Таблица П. 5

Типоразмер сердечника	D , мм	d , мм	h , мм	Масса, г, не более
К4х2,5х1,2	4 ±0,2	2,5±0,1	1,2±0,15	0,06
К5х3х1,5	5±0,2	3±0,1	1,5±0,15	0,12
К7х4х1,5	7±0,3	4±0,2	1,5±0,15	0,24
К7х4х2			2±0,15	0,32
К10х6х2	10±0,3	6±0,2	2±0,15	0,59
К10х6х3			3±0,15	0,86
К10х6х4,5			4,5±0,25	1,3
К12х5х5,5	12±0,4	5±0,2	5,5±0,25	2,83
К12х8х3		8±0,3	3±0,15	1,12
К16х8х6	16±0,4	8±0,3	6±0,25	4,9
К16х10х4,5		10±0,3	4,5±0,25	3,1
К17,5х8,2х5	17,5±0,4	8,2±0,3	5±0,25	5,1
К20х10х5	20±0,5	10±0,3		6,4
К20х12х6		12±0,4	6±0,25	6,7
К28х16х9	28±0,6	16±0,4	9±0,4	20
К31х18,5х7	31 ±0,8	18,5±0,5	7±0,4	19
К32х16х8	32±0,8	16±0,4	8±0,4	26
К32х20х6		20±0,5	6±0,25	17
К32х20х9			9±0,4	25
К38х24х7	38±0,8	24±0,5	7±0,4	27
К40х25х7,5	40±0,8	25±0,6	7,5±0,4	32
К40х25х11			11 ±0,5	46
К45х28х8	45±0,9	28±0,6	8±0,4	43
К65х40х6	65±1,5	40±0,8	6±0,25	68

Примечание: Сердечники предназначенные для работы в слабых синусоидальных полях напряжённостью не более: 24 А/М (для ферритовых сердечников 1000НМ , 16 А/М - марки 1500НМ , 14,4 А/М – марки 2000НМ , 10,4 А/М – марки 3000НМ , 8 А/М – марки 4000НМ и 6000НМ ; на частотах: до 1 МГц – для ферритовых сердечников марки 1000НМ , до 0,6 МГц – марки 1500НМ , до 0,45 МГц – марки 2000НМ , до 0,2 МГц – марки 3000НМ , до 0,1 МГц – марки 4000НМ , до 0,05 МГц – марки 6000НМ . Сердечники наружным диаметром 65 мм изготавливают только из феррита марки 4000НМ.

Ориентировочные значения относительно температурного коэффициента $\mu_{нач}$ в интервалах $-60^{\circ}\text{C} \leq t^{\circ} \leq +155^{\circ}\text{C}$ (см. табл. П.5 , П.6)

Электромагнитные параметры кольцевых сердечников из ферритов марок 1000НМ,
1500НМ,2000НМ,3000НМ, 4000НМ, 6000НМ

Таблица П.6

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость μ_n	Относительный тангенс угла магнитных потерь ($tg \delta_m / \mu_n$) $\cdot 10^6$, не более, при H_a , А/м				На частоте f , кГц
		для сердечников с $D \leq 12$ мм		для сердечников с $D > 12$ мм		
		0,8 (10)	8 (100)	0,8 (10)	8 (100)	
1000НМ	1000 \pm 200	—	60	15	45	100
1500НМ	1500 \pm 300					
2000НМ	2000(+500/-300)	—	80	35	60	
3000НМ	3000 \pm 500					
4000НМ	4000(+800/-500)					
6000НМ	6000(+2000/-1200)	—	100	45	75	30

Электромагнитные параметры П-образных сердечников из ферритов марок 2000НМС, 2000НМС1, 3000НМС, 4000НМС

Табл. П.7

Марка феррита	Магнитная проницаемость μ при $f = 16$ кГц и $B = 0,1$ Тл	Удельные потери P , мкВт/см ³ , не более, при $f=16$ кГц и $B = 0,1$ Тл			Максимальная индукция B_{max} , Тл, при $H_a = 240$ А/м		Максимальная индукция B_{max} , Тл, при $H = 800$ А/м
		(15 \pm 10) °С	(100 \pm 3) °С	(120 \pm 3) °С	(100 \pm 3) °С	(120 \pm 3) °С	
	(25 \pm 10) °С	(15 \pm 10) °С	(100 \pm 3) °С	(120 \pm 3) °С	(100 \pm 3) °С	(120 \pm 3) °С	(120 \pm 3) °С

Марка	Характеристика изоляции	Диаметр медной жилы, мм	Макс. рабочая температура, °С
ПЭВ-1	Один слой высокопрочной эмали	0,02...2,44	105
ПЭВ-2	Два слоя высокопрочной эмали	0,06...2,44	105
ПЭВД	Высокопрочная эмаль с дополнительным термопластичным слоем лака	0,1...0,5	105
ПЭВЛ	Высокопрочная эмаль и обмотка из лавсановой нити	0,02...1,56	120
ПЭВТЛ-1*	Один слой высокопрочной полиуретановой эмали	0,05...1,56	130
ПЭВТЛ-2*	Два слоя высокопрочной полиуретановой эмали	0,05...1,56	130
ПЭВТЛЖ*	Высокопрочная эмаль на основе полиуретана и полиамидной смолы	0,06...0,35	130
ПЭЛ	Лак на масляной основе	0,02...2,44	105
ПЭЛЛО	Лак на масляной основе и обмотка из лавсановой нити	0,06...1,56	105
ПЭЛО	Лак на масляной основе и обмотка из полиэфирной нити	0,05... 1,56	105
ПЭЛШКО	Лак на масляной основе и обмотка из капронового волокна	0,1...2,1	105
ПЭЛР	Высокопрочная эмаль на основе полиамида и резольной смолы	0,06...2,44	120
ПЭМ-1	Высокопрочная эмаль ВЛ-941	0,05...2,41	105
ПЭМ-2	То же, утолщенный слой	0,05...2,44	105
ПЭС-1	Высокопрочный лак на основе поливинилформала	0,06...2,44	105
ПЭС-2	То же, утолщенный слой	0,06...2,41	105
ПЭВТ	Высокопрочный нагревостойкий лак на основе полиэфиров	0,06...2,44	130
ПЭПЛОТ*	Полиуретановый лак и обмотка из лавсановой нити	0,08...0,52	120
ПЭТЛО	Высокопрочный нагревостойкий лак на основе полиэфиров и обмотка из лавсановой нити	0,06...1,56	130
ПСД	Два слоя обмотки из стекловолокна с пропиткой нагревостойким лаком	0,5...5,2	155
ПСДК	Два слоя обмотки из стекловолокна с пропиткой кремнийорганическим лаком	0,5...5,2	180
ПЭТ-155	Полиэфиримидный лак	0,06...2,44	155

* Не требуют зачистки перед лужением.

Ширина большей стороны мм	Сечение, мм ² , при ширине меньшей стороны в мм (для принятых сочетаний размеров сторон)										
	1	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,68	2,1	2,44	3,53	5,5
2,1	1,89	2,07	2,24	2,42	2,64	2,85	3,33	3,92	—	—	—
2,26	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,59	4,35	—	—	—
2,44	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,89	4,64	5,37	—	—
2,63	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	4,21	5,04	5,94	—	—
2,83	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,54	5,46	6,43	—	—
3,05	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	4,91	5,93	6,91	—	—
3,28	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	5,3	6,41	7,52	—	—
3,53	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,72	6,93	8,13	12	—
3,8	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	6,17	7,5	8,79	—	—
4,1	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,68	8,13	9,52	14	—
4,4	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	7,18	8,76	10,2	15	—
4,7	4,44	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,79	9,39	11	16,1	—
5,1	4,89	5,30	5,71	6,17	6,88	7,19	8,37	10,2	11,9	17,5	—
5,5	5,29	5,73	6,16	6,67	7,22	7,77	9,03	11,1	12,9	18,9	—
5,9	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	9,70	11,9	13,9	20,3	—
6,4	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	10,6	12,9	15,1	22,1	34,3
6,9	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	11,4	14	16,3	23,9	37,1
7,4	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	12,6	15	17,6	25,6	39,8
8,0	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	13,2	16,3	19	27,7	43,1
8,6	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	14,2	17,6	20,5	29,9	46,4
9,3	—	—	—	—	12,4	13,3	15,4	19	22,3	32,3	50,5
10	—	—	—	—	—	—	16,6	20,5	23,9	34,8	54,1
11,6	—	—	—	—	—	—	—	23,9	27,8	40,5	62,9
12,5	—	—	—	—	—	—	—	25,8	30,0	43,6	67,9
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	34,9	50,6	78,9

Провода круглого сечения (сортамент)

Таблица П.10

Размер	Сечение	Размер	Сечение	Размер	Сечение	Размер	Сечение
0,063	0,0031	0,224	0,0394	0,600	0,2826	1,180	1,0930
0,071	0,0040	0,236	0,0437	0,630	0,3116	1,250	1,2266
0,080	0,0050	0,250	0,0491	0,670	0,3524	1,320	1,3678
0,090	0,0064	0,265	0,0551	0,690	0,3737	1,400	1,5386
0,100	0,0079	0,280	0,0615	0,710	0,3957	1,450	1,6505
0,112	0,0098	0,300	0,0707	0,750	0,4416	1,500	1,7663
0,120	0,0113	0,315	0,0779	0,770	0,4654	1,560	1,9104
0,125	0,0123	0,335	0,0881	0,800	0,5024	1,600	2,0096
0,130	0,0133	0,355	0,0989	0,830	0,5408	1,700	2,2687
0,140	0,0154	0,380	0,1134	0,850	0,5672	1,800	2,5434
0,150	0,0177	0,400	0,1256	0,900	0,6359	1,900	2,8339
0,160	0,0201	0,425	0,1418	0,930	0,6789	2,000	3,1400
0,170	0,0227	0,450	0,1590	0,950	0,7085	2,120	3,5281
0,180	0,0254	0,475	0,1771	1,000	0,7850	2,240	3,9388
0,190	0,0283	0,500	0,1963	1,060	0,8820	2,360	4,3721
0,200	0,0314	0,530	0,2205	1,080	0,9156	2,440	4,6736
0,210	0,0346	0,560	0,2462	1,120	0,9847	2,500	4,9063

Примечание: Диаметр проводов приведен без изоляции. Изоляция увеличивает диаметр провода от 0,03 до 0,13 мм (зависимости от марки провода и числа её слоёв)

Провода ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭТВМ выпускаются диаметром от 0,063 мм до 2,500 мм; провода ПЭМ-155, АЭТ-200, ПЭФ-155, ПЭТД-180, ПЭТКД-200, ПЭФД-2-1800 – от диаметра 0,15 мм до 2,44 мм; провода ПЭЭА, ПЭВА – от 0,355 мм до 2,36 мм, провода ПСДКТ, ПСДК, ПСД, ПСДТ – от 0,9 мм до 3,0 мм.

Основные параметры высокочастотных обмоточных проводов ГОСТ 16186-74.

Таблица П.11

Диаметр проволоки, мм	Число проволок в пучке	Диаметр провода, мм					Расчетное сечение медной жилы, мм ²	Сопротивление 1 км провода при 20 °С, Ом не более
		ЛЭЛ	ЛЭЛО, ЛЭШО	ЛЭЛД, ЛЭШД	ЛЭП	ЛЭПКО		
0,05	10	0,25	0,32	0,38	—	—	0,0196	1012
	16	0,31	0,38	0,44	—	—	0,0314	634
	20	0,34	0,41	0,47	—	—	0,0392	507
	50	—	—	0,71	—	—	0,098	209
0,06	3	—	—	—	0, 2	—	0,0085	2300
	5	—	—	—	0,25	—	0,0142	1380
0,07	7	—	0,34	—	—	—	0,0269	760
	8	0,29	0,36	0,42	0,35	0,4	0,0308	624
	10	0,33	0,4	0,46	0,39	0,44	0,0385	499
	12	—	0,42	0,48	0,42	0,47	0,0462	416
	16	—	0,47	0,54	0,47	0,52	0,0616	312
	20	—	0,52	0,59	0,53	0,57	0,077	249
	27	—	0,58	0,65	—	—	0,104	190
	32	—	0,63	0,7	—	—	0,121	161
	50	—	0,82	0,89	—	—	0,193	85,6
0,1	9	0,44	0,51	0,58	0,48	0,53	0,0707	276
	12	0,5	0,57	0,64	0,54	0,59	0,0942	207
	14	0,54	0,61	0,68	0,58	0,63	0,11	177
	16	0,57	0,64	0,71	0,61	0,66	0,126	155
	19	0,6	0,67	0,74	—	—	0,149	131
	21	0,64	0,71	0,78	0,69	0, 73	0,165	118
	24	0,08	0,75	0,82	0,74	0,78	0,188	103
	28	0,74	0,81	0,88	0,8	0,84	0,22	91,3

Основные параметры медных обмоточных проводов.

Таблица П.12

Номинальный диаметр медной жилы, мм	Сечение медной жилы, мм ²	Сопротивление 1 м провода при 20 °С, Ом	Допустимый ток при плотности 2А/мм ² , А	ПЭЛ		ПЭВ-1		ПЭВ-2	
				Диаметр, мм, не более	Масса 100 м, не более	Диаметр, мм, не более	Масса 100 м, не более	Диаметр, мм, не более	Масса 100 м, не более
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,02	0,0003	61,5	0,0006	0,035	0,31	0,027	0,3	—	—
0,025	0,0005	37,16	0,001	0,04	0,48	0,034	0,5	—	—
0,03	0,0007	24,7	0,0014	0,045	0,68	0,041	0,7	—	—
0,032	0,0008	28,4	0,0016	0,046	0,69	0,043	0,7	—	—
0,01	0,0013	13,9	0,0026	0,055	1,18	0,055	1,2	—	—
0,05	0,0020	9,29	0,004	0,07	1,82	0,052	1,9	0,08	1,9
0,06	0,0028	6,44	0,0057	0,085	2,64	0,075	2,3	0,09	2,8
0,063	0,0031	5,85	0,0063	0,085	2,9	0,08	2,8	0,09	2,9
0,071	0,001	4,71	0,0078	0,095	3,67	0,088	3,8	0,095	3,9
0,08	0,005	3,63	0,0101	0,105	4,64	0,095	4,9	0,105	5,0
0,09	0,0064	2,86	0,0127	0,115	5,84	0,105	6,2	0,12	6,3
0,1	0,0079	2,23	0,0157	0,125	7,27	0,122	7,5	0,13	7,6
0,12	0,0099	1,75	0,021	0,125	9,07	0,134	9,2	0,14	9,3
0,12	0,0113	1,55	0,0226	0,145	10,5	0,144	10,9	0,15	11,0
0,125	0,0122	1,4	0,0248	0,15	11,3	0,149	11,6	0,155	11,8
0,13	0,0133	1,32	0,0266	0,155	12,2	0,155	12,7	0,16	13,1
0,14	0,0154	1,14	0,0308	0,165	14,1	0,165	14,4	0,17	14,5
0,15	0,0177	0,99	0,0354	0,18	16,2	0,176	16,5	0,19	16,6
0,16	0,0201	0,873	0,0402	0,19	18,4	0,187	18,8	0,2	18,9
0,17	0,0227	0,773	0,0454	0,2	201,8	0,197	21,2	0,21	21,3
0,18	0,0255	0,688	0,0510	0,21	23,3	0,210	23,6	0,22	23,7
0,19	0,0281	0,618	0,0568	0,21	25,9	0,220	26,3	0,23	26,4
0,2	0,0314	0,558	0,0628	0,23	28,7	0,23	29,0	0,24	29,2
0,21	0,0346	0,507	0,0692	0,24	31,6	0,24	31,9	0,25	32,2
0,224	0,0394	0,445	0,0790	0,26	38,1	0,256	36,4	0,27	36,6
0,236	0,0437	0,402	0,0875	0,27	40,1	0,260	40,4	0,285	40,6
0,25	0,0491	0,357	0,0982	0,275	44,6	0,284	45,2	0,3	45,4
0,265	0,0552	0,318	0,111	0,305	50,2	0,305	50,8	0,315	51,0

Продолжение таблицы П.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,28	0,0615	0,285	0,124	0,315	56,0	0,315	56,5	0,33	56,8
0,3	0,0708	0,248	0,143	0,34	64,5	0,34	64,9	0,35	65,2
0,315	0,078	0,225	0,158	0,352	71,0	0,35	69,0	0,365	69,3
0,335	0,0885	0,198	0,179	0,375	80,6	0,375	78,0	0,385	78,4
0,355	0,099	0,177	0,2	0,395	90,2	0,395	87,6	0,414	88,4
0,38	0,1134	0,155	0,226	0,42	103	0,42	100,4	0,44	101,3
0,4	0,126	0,140	0,251	0,442	112,5	0,44	114	0,46	115
0,125	0,142	0,124	0,283	0,47	127,2	0,465	129	0,485	130
0,45	0,100	0,110	0,319	0,495	155,0	0,49	144	0,51	145
0,175	0,177	0,099	0,353	0,495	172,0	0,525	162	0,545	164
0,5	0,196	0,09	0,392	0,55	175,5	0,55	178	0,57	179
0,51	0 2206	0,0795	0,441	0,578	200	0,58	200	0,6	201
0,56	0,247	0,071	0,494	0,61	224	0,61	2 24	0,63	225
0,6	0,283	0,062	0,566	0,65	276	0,65	257	0,67	258
0,63	0,313	0,056	0,626	0,68	306	0,68	283	0,7	285
0,67	0,352	0,05	0,704	0,72	319	0,72	320	0,75	322
0,71	0,398	0,044	0,797	0,77	361	0,76	358	0,79	361
0,75	0,441	0,039	0,884	0,81	395	0,81	400	0,84	403
0,8	0,503	0,035	1,0	0,80	455	0,86	455	0,89	457
0,85	0,567	0,031	1,13	0,91	513	0,91	513	0,94	515
0,9	0,636	0,0275	1,27	0,96	574	0,96	574	0,99	578
0,95	0,712	0,0248	1,42	1,02	641	1,01	641	1,04	643
1,0	0,7854	0,022	1,57	1,07	710	1,07	712	1,1	714
1,06	0,88	0,019	1,765	1,14	798	1,13	798	1,16	802
1,1	0,9852	0,017	1,97	1,2	886	1,19	892	1,22	894
1,18	1,092	0,016	2,185	1,26	984	1,26	990	1,28	991
1,2 5	1,227	0,01 4	2,45	1,33	1110	1,33	1110	1,35	1110
1,32	1,362	0,012	2,72	1,4	1232	1,4	1232	1,42	1241
1,4	1,539	0,011	3,078	1,48	1390	1,48	1390	1,51	1392
1,5	1,767	0,009	3,534	1,58	1590	1,58	1590	1,61	1,594
1,6	2,01	0,008	4,03	1,68	1810	1,68	1810	1,71	1810

Примечание- толщина изоляции находится в диапазоне: для проводов ПЭЛ от 0,015 до 0,09 мм; для проводов ПЭВ-1 от 0,025 до 0,08 мм; для проводов ПЭВ-2 от 0,03 до 0,11 мм.

Материал*	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте		Электрическая прочность, кВ/мм	Нагревостойкость,	Плотность, г/см ³
		50 Гц	1 МГц			
1	2	3	4	5	6	7
Асбест (Вл)	—	0,7	—	2	600	2,0...2,6
Бакелит (СС)	4,0...4,6	0,05...0,12	—	10...40	150	1,2
Бумага конденсаторная	3,5	0,01	—	20	100	1,0...1,2
Воск пчелиный (В)	2,8...2,9	0,02...0,03	—	25...30	63	0,96-0,97
Гетинакс I, II, III, X	6...8	0,07...0,1	—	17...30	120	1,25-1,4
Гетинакс V, VI, VII	6...7	0,05	0,06—0,08	25...33	120	1,3...1,4
Канифоль (СН)	3,5	0,01	—	10...15	60...70	1,1
Капрон, нейлон (ПСС)	3,8...4,2	0,025...0,03	0,04	15...20	60	1,13
Карболит (П)	—	0,03...0,1	—	10...15	—	1,2...1,3
Лакоткань хлопчатобумажная	4,0...4,6	0,03...0,2	—	5...30	105	1,5
Лакоткань шелковая	3,8...4,5	0,04...0,08	—	8...60		
Озокерит (В)	2,3	0,01	0,003	25	55...98	0,9...1
Органическое стекло (ПСС)	3,5...3,6	0,02...0,06	—	25...40	52...53	1,18
Парафин	1,9...2,2	—	0,0037	20...30	49...55	0,85-0,9
Полистирол (П)	2,45...2,65	0,0002-0,0004	0,0002-0,0008	25...40	65...96	1,05-1,07
Поливинилхлорид (ПСС)	3...5	0,03...0,08	0,04...0,1	14...20	60...70	1,4-1,75
Полиэтилен (СС)	2,2...2,3	0,0002-0,0005	0,001	20...35	100	0,92-0,94
Полипропилен (СС)	2,0...2,1	—	0,0002-0,0003	20...30	140...150	0,9...0,91

Продолжение таблицы П.13

1	2	3	4	5	6	7
Резина	3	0,15	—	20	55	1,6
Сегнетокерамика (К)	4500-1700	0,02...0,03	—	—	—	4
Слюда мусковит	6,8...7,2	0,0004-0,0007	0,001	55...95	—	1,1
Слюда флогопит	5...6	0,006...0,015	0,005	50		
Смолы кремний органические	3...5	0,001...0,03	0,003...0,05	18...20	180...200	1,6...1,7
Смолы эпоксидные	3,7...3,9	0,018	0,019	16	140	1,1...1,2
Стеатит (К)	6,0...6,5	0,0007	0,002...0,008	20... 25	160	2,7...3,0
Стекло	4...10	0,0005...0,001	0,001	20... 30	500..1700	2,2...4,0
Стеклотекстолит (ССН)	7,5...8	0,01...0,1	—	10...12	130	1,6...1,8
Стекловолокнит ПН	8	0,5	—	4...10	150...180	
Текстолит А, Б Текстолит ВЧ	7,5..8,5 7,5-8	0,1...0,14	0,07	5...8	125...135	1.3...1,45
Тиконд (К) Ультрафарфор (К)	70...150 8...8,5	0,0004 0,0004-0,0006	0,0004-0,0008 0,0004-0,0012	10...12 20...25	160	3,9 3,3...3,4
Фторопласт-3 (ПСС)		—	0,005...0,01	13...15	125	2,1...2,15
Фторопласт-4 (ПСС)	1,9...2,2	—	0,0002--0,0003	25...27	180...200	2,1...2,3
Фенопласты (П)	7,5...10	0,03...0,3	—	13...16	100...250	1,3...1,9
Целлофан (ПЭ)	3...4	0,2	—	40	80	1,25
Целлулоид (ПЭ)	5,5	—	0,02	30	40	1,3
Церезин (В)	2,1...2,3	0,0002	0,0002	15	55...80	0,95
Шеллак (СН)	3,5	0,01	—	20...30	50... 60	1,0...1,4
Эбонит (КП)	2,7...3,0	—	0,01...0,015	25	50.. 90	1,2...1,4
Электрокартон	3,5	0,05	—	8...13	100	0,95-1,25
Этилцеллюлоза (ПЭ)	3,5	0,006...0,01	0,01	60...90	50	1,14

* Буквы в скобках обозначают: В—воскообразный, Вл — волокнистый. К— керамический, КП— каучуковая пластмасса, ПН — пластмасса с наполнителем, ПЭ— пластик эфиоцеллюлозный, ПСС - продукт смолы синтетической, СН — смола натуральная, СС—смоль синтетическая, ССН — смола синтетическая

Схема выпрямителя	Реакция нагрузки	Трансформатор						Вентили			Нагрузка		
		$\frac{E_2}{U_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_1}{K_T I_d}$	$\frac{S_1}{P_d}$	$\frac{S_2}{P_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$	$\frac{U_{обр.м}}{U_d}$	$\frac{I_a}{I_d}$	$\frac{I_{a.д.}}{I_d}$	m_n	$f_{(1)}$	$K_{n(1)}$
Однофазная мостовая	активная	1,11	1,11	1,11	1,23	1,23	1,23	1,57	0,5	0,785	2	100	0,667
	индуктивная	1,11	1	1	1,11	1,11	1,11	1,57	0,5	0,71	2	100	0,667
	ёмкостная	0,71	1,63	1,63	1,51	1,51	1,51	1,32	0,5	1,15	2	100	-
Однофазная двухполупериодная со средней точкой	активная	1,11	0,785	1,11	1,23	1,73	1,48	3,14	0,5	0,785	2	100	0,667
	индуктивная	1,11	0,707	1	1,11	1,57	1,34	3,14	0,5	0,71	2	100	0,667
	ёмкостная	0,93	1,15	1,63	1,51	2,14	1,83	2,63	0,5	1,15	2	100	-
Однофазная симметричная схема удвоения напряжения	ёмкостная	0,35	2,95	2,95	1,57	1,57	1,57	1	1	2,09	2	100	-
Трёхфазная мостовая (соединение обмоток трансформатора «звезда-звезда»)	индуктивная	0,43	0,82	0,82	1,05	1,05	1,05	1,05	0,333	0,58	6	300	0,057
	ёмкостная	0,41	0,92	0,92	1,28	1,28	1,28	1	0,333	0,65	6	300	-
Трёхфазная мостовая (соединение обмоток трансформатора «звезда-треугольник»)	индуктивная	0,74	0,47	0,47	1,05	1,05	1,05	1,05	0,33	0,58	6	300	0,057
	ёмкостная	0,71	0,53	0,53	1,28	1,28	1,28	1	0,33	0,65	6	300	-
Трёхфазная со средней точкой	активная	0,855	0,583	0,476	1,22	1,48	1,35	2,11	0,33	0,59	3	150	0,25
	индуктивная	0,855	0,58	0,47	1,21	1,48	1,35	2,1	0,33	0,58	3	150	0,25
	ёмкостная	0,71	0,8	0,77	2,06	2,1	2,08	2	0,33	0,8	3	150	-

	$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\alpha\pi} (\sin \alpha \cdot \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \cdot \sin 5\omega t + \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{8a_m}{\pi^2} (\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t - \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \frac{1}{49} \sin 7\omega t + \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} (\sin \frac{\alpha\pi}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\alpha\pi}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\alpha\pi}{2} \cos 5\omega t + \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{2a_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t - \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t - \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} a_m (\frac{1}{2} + \frac{1}{8} \cos 3\omega t - \frac{1}{35} \cos 6\omega t + \frac{1}{80} \cos 9\omega t - \dots)$
	$f(\omega t) = \frac{3a_m}{\pi} (1 + \frac{2 \cos 6\omega t}{35} - \frac{2 \cos 12\omega t}{143} + \frac{2 \cos 18\omega t}{17 \cdot 19} - \dots)$

Воронин Александр Иванович
Шадрин Георгий Алексеевич

Трансформаторы и дроссели источников
электропитания электронных устройств

Учебное пособие

Технический редактор: Семенов Валерий Дмитриевич
Корректор: Обрусник Валентин Петрович

Подписано к печати
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл. Печ. л. 9. Уч. – изд. л.
Тираж 300 экз. Заказ Цена свободная.
Издательство ТУСУР. 634050, Томск, пр. Ленина, 40.