



1.5. ТРАНСФОРМАТОРЫ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Трансформатором называют статический преобразователь электрической энергии переменного тока, преобразующий электрическую энергию без изменения частоты. Основными конструктивными элементами любого трансформатора являются первичная (первичные) и вторичная (вторичные) *обмотки* и *магнитопровод*, по которому электромагнитная энергия передается от первичных к вторичным цепям. Преобразование электрической энергии трансформатором обычно осуществляется одновременно с передачей энергии в другую электрическую цепь, не связанную непосредственно с той цепью, откуда эта энергия подводится. Однако передача энергии в трансформаторе возможна не только электромагнитным, но и комбинированным, электромагнитно-электрическим путем [12].

Обозначение трансформаторов на электрических схемах представлено на рис. 1.5.1, а внешний вид различных конструктивных исполнений на рис. 1.5.2.



Рис. 1.5.1. Обозначение трансформаторов на принципиальных схемах.

Если для функционирования ЭА требуется электроэнергия переменного тока, трансформаторы применяются как самостоятельные ИЭП. Однако в большинстве случаев трансформаторы входят в состав более сложных по электрической схеме и конструкции ИЭП.



Рис. 1.5.2. Трансформаторы в различных конструктивных исполнениях.

Передача энергии в трансформаторе возможна не только электромагнитным, но и комбинированным, электромагнитно-электрическим путем. Автотрансформатор — вариант трансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки соединены напрямую, и имеют за счёт этого не только магнитную связь, но и электрическую (рис. 1.5.3). Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные напряжения.



Рис. 1.5.3. Автотрансформатор. Внешний вид и эквивалентная электрическая схема

Преимуществом автотрансформатора является более высокий КПД, поскольку лишь часть мощности подвергается преобразованию — это особенно существенно, когда входное и выходное напряжения отличаются незначительно. Недостатком является отсутствие электрической изоляции (гальванической развязки) между первичной и вторичной цепью. В промышленных сетях, где наличие заземления нулевого провода обязательно, этот фактор роли не играет, зато существенным является меньший расход стали для сердечника, меди для обмоток, меньший вес и габариты, и в итоге — меньшая стоимость [14].



Параметры электрической энергии, преобразуемой трансформаторами в составе современной ЭА, могут изменяться в широких пределах:

- по мощности от 1 до 1 000 000 В • А;
- по напряжению от 1 до 50 000 В;
- по току от 1 мкА до 500 А;
- по частоте от 50 до 1 000 000 Гц.

Трансформаторы делятся по напряжению на:

- низковольтные (напряжение каждой обмотки $U < 1000$ В), высоковольтные (напряжение хотя бы одной обмотки $U \geq 1000$ В) и
- высокопотенциальные (потенциал хотя бы одной обмотки относительно корпуса или другой обмотки $U > 1000$ В);

по числу фаз: однофазные, трехфазные, шестифазные и т.д.;

по частоте питающей сети:

- промышленной частоты (50 Гц),
- повышенной частоты (400...16 000 Гц),
- высокой частоты (более 16 000 Гц);

по коэффициенту трансформации напряжения (K_T)

- повышающие ($K_T > 1$),
- понижающие ($K_T < 1$),
- изолирующие ($K_T = 1$), где K_T - отношение напряжения вторичной обмотки к напряжению первичной обмотки в режиме холостого хода;

по числу обмоток: двух- и многообмоточные,

по виду связи между обмотками:

- с электромагнитной связью (с изолированными обмотками)
- с электромагнитной и электрической связями,

по конструкции магнитопровода (рис. 1.5.3):

- стержневые,
- броневые,
- кольцевые (тороидальные).



Одним из наиболее важных параметров трансформатора электропитания является его *мощность*. Различают электромагнитную, выходную (отдаваемую), расчетную и габаритную (типовую) мощности трансформатора [15].

Электромагнитной мощностью $P_{ЭМ}$ (В·А) трансформатора называется мощность, передаваемая из первичной обмотки во вторичные электромагнитным путем. Она равна сумме произведений электродвижущих сил E_i и соответствующих токов вторичных обмоток I_i :

$$P_{ЭМ} = \sum_{i=2}^n E_i I_i ,$$

где $i=2, \dots, n$ – номера обмоток.

Выходной (отдаваемой) мощностью $P_{ВЫХ}$ трансформатора называется сумма произведений действующих напряжений U_i на зажимах вторичных обмоток и выходных (нагрузочных) токов I_i :

$$P_{ВЫХ} = \sum_{i=2}^n U_i I_i .$$

Расчетной мощностью P_i обмотки трансформатора называется произведение действующих значений тока, протекающего по обмотке, и напряжения на ее зажимах. Эта мощность характеризует габаритные размеры обмотки, так как число витков обмотки определяется напряжением на ее зажимах, а сечение провода – действующим током:

$$P_i = U_i I_i .$$

Габаритной (типовой) мощностью P_T трансформатора называется мощность, определяющая размеры трансформатора:

$$P_{ВЫХ} = 1/2 \sum_{i=1}^n P_i .$$



В процессе работы трансформатора в его магнитопроводе и в обмотках затрачивается некоторая часть подводимой к нему энергии, поэтому мощность, потребляемая трансформатором из сети, всегда больше мощности, отдаваемой нагрузке. Разность между поступающей к трансформатору энергией и отдаваемой им во вторичную сеть называется *потерями*.

Потери в магнитопроводе P_c можно определить по формуле:

$$P_c = P_{уд} G_c = P_0 (f/f_0)^\alpha \left(\frac{B}{B_0}\right)^\beta G_c,$$

где $f_0 = 1$ кГц и $B_0 = 1$ Тл – базовые значения соответственно частоты и индукции для всех материалов; P_0 , α и β – постоянные величины, характерные для конкретного материала магнитопровода, G_c – масса магнитопровода.

Потери в обмотках P_m обусловлены активным сопротивлением проводов и могут быть определены по выражению:

$$P_m = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i.$$

Здесь R_i – активное электрическое сопротивление i -й обмотки.

Коэффициент полезного действия (КПД) η трансформатора определяется отношением мощности, отдаваемой в нагрузку, к активной мощности, потребляемой трансформатором из сети, т. е.

$$\eta = P_{\text{вых}} / (P_{\text{вых}} + P_c + P_m).$$

Важными параметрами трансформаторов являются падение напряжения в обмотках и ток холостого хода.

Падение напряжения в обмотках трансформатора складывается из падений напряжения в активном и реактивном сопротивлениях первичной и вторичной обмоток. В большинстве случаев для трансформаторов электропитания ЭА при инженерных расчетах можно ограничиться учетом падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток:

$$\sum \Delta u_i = \Delta u_1 + \Delta u_i = I_1 R_1 + I_i R_i, i = 2 \dots n.$$



Ток холостого хода I_0 трансформатора складывается из двух составляющих — активной I_{0a} и реактивной I_{0p} :

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}.$$

Активная составляющая тока холостого хода (A) определяется выражением:

$$I_{0a} = P_c / U_1.$$

Реактивную составляющую тока холостого хода, A , рассчитывают по формуле:

$$I_{0p} = \frac{H l_c}{W_1},$$

где H — напряженность переменного магнитного поля; l_c — длина пути магнитного потока в магнитопроводе; W_1 — число витков первичной обмотки.

Коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{тр}}$ трансформатора равен отношению активной мощности к полной мощности, потребляемой трансформатором из сети P_1 :

$$\cos\varphi_{\text{тр}} = (P_{\text{вых}} + P_c + P_m) / P_1.$$

В некоторых случаях при анализе работы трансформатора используют понятие *энергетического коэффициента* ($\eta \cos\varphi_{\text{тр}}$), представляющего собой отношение мощности, отдаваемой в нагрузку $P_{\text{вых}}$, к полной мощности, потребляемой из сети P_1 :

$$\eta \cos\varphi_{\text{тр}} = P_{\text{вых}} / P_1.$$

Тепловые свойства трансформатора характеризует *перегрев трансформатора* θ , определяемый разностью между температурой t_{max} наиболее нагретой части трансформатора и температурой $t_{\text{окр}}$ окружающей среды:

$$\theta = t_{\text{max}} - t_{\text{окр}}.$$



Основным требованием при проектировании трансформаторов следует считать способность трансформатора электропитания выполнять свои функции как компонента общей электрической схемы изделия. Можно выделить три основных критерия проектирования: допустимый перегрев θ , допустимое падение напряжения ΔU , допустимый ток холостого хода I_0 . В каждом конкретном случае проектирования один из критериев становится определяющим. Наиболее часто в качестве определяющего критерия выбирают перегрев θ .

Заданные в технической документации срок службы и надежность трансформатора могут быть обеспечены, если выдержан определенный тепловой режим и значение перегрева θ не превышает допустимое. *Допустимый перегрев* определяется условиями эксплуатации, а также конструкцией трансформатора и может задаваться в широких пределах: от 15 °С до нескольких сотен градусов. Наиболее распространено значение $\theta = 50$ °С.

Перегрев жестко связан с электромагнитными нагрузками трансформатора, причем как магнитопровода (плотность магнитного потока B), так и обмоток (плотность электрического тока j).

Падение напряжения, в отличие от перегрева, зависит в первую очередь от нагрузки обмоток. Чем больше плотность тока, тем больше падение напряжения ΔU . Значение допустимого падения напряжения различно в зависимости от назначения и условий работы трансформатора электропитания. Обычно ΔU лежит в пределах 1...20 % от номинального напряжения обмотки.

Ток холостого хода определяется в основном нагрузкой магнитопровода. Он может изменяться в весьма широких пределах и для маломощных трансформаторов может быть сравнимым с током первичной обмотки трансформатора под нагрузкой.

Конструкцию трансформатора образуют магнитопровод, катушка, состоящая из обмоток с изоляцией, крепежная арматура, выводы, корпус (у закрытых конструкций).

В трансформаторах электропитания применяются четыре основных вида **магнитопроводов**: *броневой*, *стержневой*, *кольцевой (тороидальный)* для однофазных конструкций и *стержневой трехфазный*. Перечисленные магнитопроводы представлены на рис. 1.5.4 (фронтальные проекции находятся в плоскости линий магнитного потока).

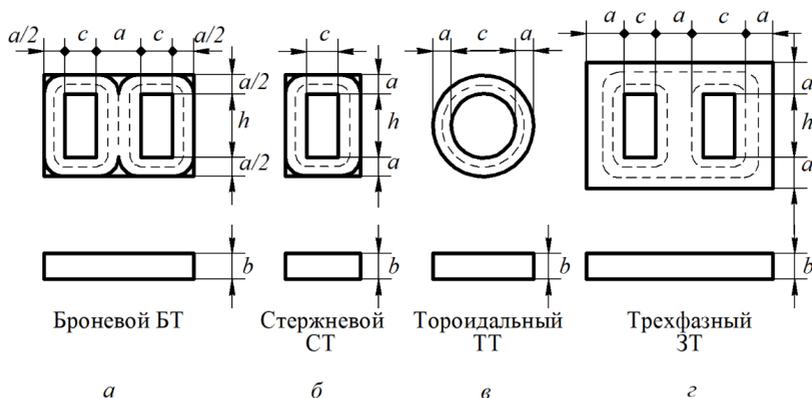


Рис. 1.5.4. Виды магнитопроводов трансформаторов:
а – броневой; *б* – стержневой однофазный; *в* – кольцевой (тороидальный); *г* – стержневой трехфазный

Магнитопроводы трансформаторов изготавливаются из магнитомягких материалов, которые по электропроводности можно разделить на проводящие (электротехнические стали, пермаллои, аморфные сплавы); полупроводящие (ферриты) и диэлектрические (магнитодиэлектрики) [9].

В зависимости от конкретных условий работы трансформатора требования к магнитному материалу, из которого изготовлен магнитопровод, различны. Тем не менее можно выделить общие требования, характерные для всех типов трансформаторов электропитания:

– магнитный материал должен обладать большой *индукцией насыщения*, т. е. обеспечивать прохождение максимального магнитного потока через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода, плотность магнитного потока во многом определяет габаритные размеры и массу трансформатора, среди перечисленных выше магнитных материалов наибольшей индукцией насыщения обладают электротехнические стали;

– магнитный материал должен легко намагничиваться и размагничиваться, обладая узкой *петлей гистерезиса*, малой *коэрцитивной силой*, большим значением *магнитной проницаемости*, этим требованиям удовлетворяют пермаллои и аморфные сплавы;



– магнитный материал должен иметь возможно меньшую *мощность потерь*, этот параметр в значительной степени зависит от рабочей частоты трансформатора, в связи с этим электротехнические стали, несмотря на большое значение индукции насыщения, целесообразно применять только до частоты около 10000 Гц, свыше 10 000 Гц применяют ферриты и магнитоэлектрики, наилучший диапазон частот для пермаллоев от 5 до 100 кГц, аморфные сплавы могут конкурировать с перечисленными магнитными материалами во всем диапазоне частот.

В табл. 1.5.1 приведены значения основных параметров магнитомягких материалов, широко применяемых в магнитопроводах трансформаторов электропитания (δ – толщина материала). Эти параметры характеризуют магнитные материалы до их технологической переработки при изготовлении трансформаторов. В процессе изготовления некоторые параметры, особенно мощность потерь и магнитная проницаемость, могут значительно изменяться. В частности, мощность потерь в магнитопроводе типа ШЛ, изготовленном из электротехнической стали, возрастает на 30...70 %, а пермаллоя – в 1,7-3 раза.

Обмотки в трансформаторах выполняют обычно цельными многослойными, расположенными вдоль всей или части длины стержня магнитопровода, отведенной для обмотки. Цельные многослойные обмотки могут быть секционированными, разделенными на ряд секций (рис. 1.5.5). Каждая секция занимает часть длины стержня, но все вместе они составляют единое конструктивное целое. Секционирование применяется обычно для высоковольтных обмоток.

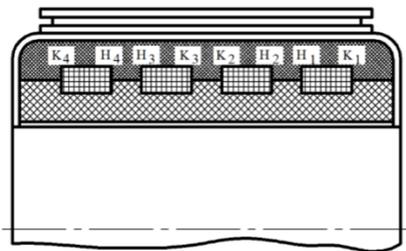


Рис. 1.5.5. Секционированная обмотка высоковольтного трансформатора



Таблица 1.5.1.
Значения параметров магнитомягких материалов

Материал (толщина, мм)	Индукция насыщения B_s , Тл	Удельная мощность потерь $P_{0,2/20}^*$, мВт/см ³	Магнитная проницаемость μ		Точка Кюри, °С
			начальная	максимальная	
Сталь 3423, $\delta = 0,08$	1,82	515	600	35 000	720
Пермаллой 79НМ, $\delta = 0,05$	0,75	158	7000	150 000	430
Пермаллой 50Н $\delta = 0,08$	1,5	521	2000	30 000	500
Феррит 2000НМ1	0,38	109	2000	3500	200
Феррит 2500НМС2	0,41	125	2500	–	200
Аморфный сплав ГМ14ДС	0,80	70	20 000	50 000	600
Аморфный сплав ГМ412В	1,12	3	30 000	45 000	610
Магнитодиэлектрик	0,73	988	140	140	–

* $P_{0,2/20}$ – удельная мощность потерь при магнитной индукции $B = 0,2$ Тл и частоте $f = 20$ кГц.

Взаимное расположение обмоток может быть различным. Как правило, применяются концентрические обмотки, располагаемые одна внутри другой. Реже используют чередующиеся обмотки, размещенные таким образом, что части разных обмоток следуют вдоль стержня одна за другой, непрерывно чередуясь. Чередующиеся обмотки конструктивно сложнее по сравнению с другими обмотками, но обладают меньшим рассеянием. В некоторых случаях используют вариант разделенных обмоток. Их располагают



рядом вдоль сердечника, но они не чередуются, что удобно для высоковольтных трансформаторов электропитания при большом числе обмоток.

Обмотки изготавливаются из проводящих материалов (проводов). Чаще всего для проводов обмоток трансформаторов электропитания используется медь, значительно реже — алюминий. Обмоточные провода обычно берутся круглого сечения, при больших размерах сечения применяют провода (или ленты) прямоугольного сечения [16].

Для обмоток, имеющих класс нагревостойкости 130 °С, широкое распространение получил провод марки ПЭТВ-2. Его свойства обеспечивают выполнение требований к трансформаторам при эксплуатации в жестких условиях внешней среды. Значения основных параметров провода ПЭТВ-2 приведены в табл. 1.5.2.

При необходимости получения нагревостойкости обмоток более 130 °С применяются провода марок ПЭТ-155 (155 °С), ПСДК (180 °С), ПЭТ-200 (200 °С), ПНЭТ-имид (220 °С).

Для соединения концов обмотки с собственно выводами используют монтажные провода. Широко распространены монтажные провода марок МПО23-11 (120 °С), МЛТП (155 °С), МГТФ (220 °С). В высоковольтных и высокопотенциальных конструкциях применяют провод марки ПВМК (155 °С).

В перспективе проводящими материалами для трансформаторов и других электромагнитных компонентов могут стать сверхпроводящие материалы. Уже в настоящее время эти материалы используются для создания уникальных сверхпроводящих магнитных систем в исследовательских целях, а также в опытных образцах трансформаторов. Неоспоримыми преимуществами сверхпроводящих материалов являются отсутствие потерь мощности и отсутствие активного падения напряжения в сверхпроводящей обмотке при прохождении через нее тока нагрузки.

Отдельные провода в обмотках разделяются с помощью *изоляции*. Различают *межвитковую*, *межслоевую*, *межобмоточную* и *внешнюю* изоляцию. Если обмотки выполняются стандартным проводом, то межвитковой является изоляция провода.



Таблица 1.5.2.
Значения параметров провода марки ПЭТВ-2

Диаметр провода по меди, мм	Площадь поперечного сечения провода по меди, мм ²	Диаметр провода по изоляции, мм	Диаметр провода по меди, мм	Площадь поперечного сечения провода по меди, мм ²	Диаметр провода по изоляции, мм
0,1	0,00785	0,128	0,85	0,56716	0,937
0,112	0,00985	0,14	0,9	0,63617	0,99
0,125	0,01227	0,154	0,95	0,70846	1,04
0,14	0,01539	0,17	1,0	0,7854	1,09
0,16	0,02011	0,198	1,06	0,88203	1,15
0,18	0,02545	0,22	1,12	0,9852	1,21
0,2	0,03142	0,24	1,18	1,09303	1,27
0,224	0,03939	0,264	1,25	1,2272	1,35
0,25	0,04909	0,3	1,32	1,36778	1,42
0,28	0,06154	0,33	1,4	1,5394	1,5
0,315	0,07789	0,364	1,5	1,7671	1,6
0,355	0,09893	0,414	1,6	2,0096	1,71
0,4	0,1256	0,46	1,7	2,26865	1,81
0,45	0,15896	0,51	1,8	2,5434	1,91
0,5	0,19625	0,56	1,9	2,83385	2,01
0,56	0,24618	0,63	2,0	3,14	2,12
0,63	0,31157	0,7	2,12	3,5281	2,24
0,71	0,39572	0,79	2,24	3,93882	2,36
0,75	0,44156	0,83	2,36	4,37214	2,48
0,8	0,50265	0,88	2,5	4,90625	2,63

При использовании для намотки ленты или фольги изоляцию витков осуществляют специальными изоляционными материалами. Такие же материалы применяют для межслоевой и межобмоточной изоляции. Внешняя изоляция между обмоткой и стержнем



магнитопровода, на который эта обмотка помещается, обеспечивается *каркасом* или гильзой из изолирующего материала. Соответственно катушки называют *каркасными* или *бескаркасными*. Внешняя изоляция обмотки с наружной стороны катушки может существенно различаться в зависимости от рабочего напряжения обмотки. Для низковольтных трансформаторов часто оказывается достаточным два-три слоя кабельной бумаги, а для высоковольтных иногда применяют заливочный компаунд толщиной до 20 мм.

В качестве межслоевой, межобмоточной, а при выполнении обмотки медной лентой и межвитковой изоляции широко распространены следующие марки *бумаги*: кабельная К, намоточная ЭН, пропиточная ЭИП, конденсаторная КОН. Для тороидальных трансформаторов, как правило, используется бумага марки БДХ.

Из тканевых материалов используют *лакоткани* как на хлопчатобумажной (ЛХ, ЛХЧ), так и на шелковой основе (ЛШ, ЛШС). В качестве термостойкой изоляции применяют стеклоткань, стеклоленту, стеклолакоткань.

В конструкциях трансформаторов, где требуется высокая электрическая прочность в сочетании с малой толщиной изолирующего слоя, нашли применение *пленочные материалы*. Среди них наиболее известны полиэтилентерефталатная пленка марки ПЭТ-Э и фторопластовая пленка марки Ф-4Э0.

В качестве термостойких электроизоляционных материалов используют слюдиниты ГСКН (300 °С) и ГСКВ (600 °С).

Внешняя изоляция низковольтных трансформаторов обеспечивается теми же электротехническими материалами, что и межобмоточная. Дополнительно снаружи обмотку низковольтного трансформатора стержневой или броневого конструкции обычно покрывают слоем электроизоляционного картона марки ЭВ, который не только усиливает внешнюю электрическую изоляцию, но и защищает обмотку от механических повреждений.

Для анализа режимов работы электрической цепи, в состав которой входит трансформатор, применяют *эквивалентную электрическую схему*. Иногда эквивалентную схему называют *моделирующей схемой*, или *схемой замещения*. Эквивалентная схема двухобмоточного трансформатора с учетом параметров источника и нагрузки приведена на рис. 1.5.6.

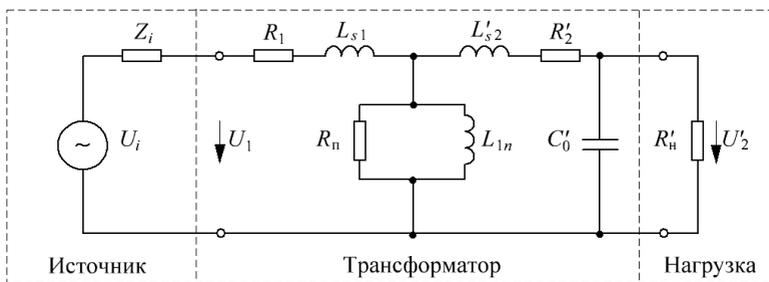


Рис. 1.5.6. Эквивалентная электрическая схема двух обмоточного трансформатора

Эквивалентная электрическая схема трансформатора содержит следующие элементы:

R_1 – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;

U_1 – напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора;

L_{s1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора;

$L_{s1} = L_1 - nM$, где L_1 – индуктивность первичной обмотки трансформатора; n – отношение витков обмоток ($n = W_1 / W_2$); M – коэффициент взаимной индукции обмоток трансформатора;

L_{1n} – индуктивность первичной обмотки, обусловленная основным магнитным потоком, $L_{1n} = L_1 - L_{s1}$;

R_n – сопротивление потерь в магнитопроводе, $R_n = U_1^2 / P_c$, где P_c – потери мощности в магнитопроводе;

L'_{s2} – индуктивность рассеяния вторичной обмотки, приведенная к первичным виткам; $L'_{s2} = L'_2 - nM$, где $L'_2 = L_2 n^2$ – индуктивность вторичной обмотки, приведенная к первичным виткам;

$R'_2 = R_2 n^2$ – активное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичным виткам;

C'_0 – эквивалентная емкость трансформатора, приведенная к первичным виткам. Она определяется конструкцией и взаимным расположением обмоток трансформатора, а также взаимным расположением магнитопровода и ближайшей к нему обмотки;

$R'_n = R_n n^2$ – приведенное к первичным виткам сопротивление нагрузки;



$U'_2 = U_2 n$ – приведенное к первичным виткам напряжение вторичной обмотки.

Важными параметрами трансформаторов являются их габаритные размеры и масса, что имеет особенное значение для транспортируемой аппаратуры, входящей в состав бортовых и наземных мобильных систем. Если учесть, что электромагнитные компоненты, в частности трансформаторы, во многом определяют габаритные размеры ЭА, то становится очевидной необходимость постоянного внимания к проблеме уменьшения габаритных размеров и массы трансформаторов, т. е. их *миниатюризации*.

Одно из решений задачи миниатюризации исходит из основной формулы электрического расчета трансформатора:

$$U = kfBSW,$$

где U – напряжение на концах обмотки трансформатора; f – рабочая частота; B –

рабочая индукция; S – сечение магнитопровода; W – число витков обмотки трансформатора; k – коэффициент пропорциональности.

Из формулы следует, что при заданном напряжении для уменьшения числа витков обмотки или сечения магнитопровода и тем самым уменьшения габаритных размеров трансформатора необходимо увеличивать либо частоту, либо индукцию, либо и то и другое вместе.

Возможности повышения рабочей индукции ограничены значением индукции насыщения магнитного материала, из которого изготовлен магнитопровод. Кроме того, для большинства магнитных материалов потери мощности в магнитопроводе резко увеличиваются при увеличении значения рабочей индукции: $P_c \sim B^\beta$, где $1,7 \leq \beta \leq 3$.

Существуют возможности увеличения рабочей частоты. Во-первых, нет принципиального ограничителя, аналогичного индукции насыщения. Во-вторых, зависимость потерь мощности от частоты менее резко выражена:

$$P_c \sim f^\alpha,$$

где $1 \leq \alpha \leq 1,6$.

В табл. 1.5.3 приведены типовые массогабаритные характеристики низковольтных трансформаторов мощностью 220 В·А на



броневых магнитопроводах, рассчитанные на перегрев обмотки $\theta = 50$ °С при различных частотах.

Таблица 1.5.3.

Массогабаритные характеристики низковольтных трансформаторов при различных частотах

Частота, Гц	50	400	20000
Размеры, мм	101x104x109	66x61x71	46x36x49
Объем, см ³	1145	286	81
Масса, кг	3,6	0,65	0,17
Тип магнитопровода	ШЛ25x50 (сталь 3413)	ШЛ16x25 (сталь 3423)	ШЛ12x15 (феррит 2000НМ1)

Современные трансформаторы, входящие в состав ИЭП импульсного действия, работают обычно на частотах 20...100 кГц. Работа на частоте 100...1000 кГц сталкивается с определенными трудностями. В этой области частот существенную роль в работе трансформатора начинают играть паразитные параметры — индуктивность рассеяния L_s и эквивалентная емкость C'_0 . Паразитные параметры заметно снижают коэффициент передачи трансформатора, причем чем выше частота, тем больше при прочих равных условиях снижение коэффициента передачи. Это явление приводит к необходимости более сложного электрического расчета трансформатора, накладывает ограничения на конструкцию, предъявляет более жесткие требования к технологии производства. Следует отметить, что увеличение рабочей частоты выше 100 кГц осложняет работу не только трансформаторов, но и других компонентов ИЭП, таких как транзисторы, конденсаторы, диоды и т. п. В связи с этим при проектировании ИЭП и входящего в его состав трансформатора вопрос возможности и необходимости повышения рабочей частоты выше определенного уровня в каждом конкретном случае должен решаться комплексно, исходя из технической и экономической целесообразности.

Исходными данными для расчета трансформатора являются напряжение и частота входной сети, токи и напряжения вторичных обмоток, а также диапазон температур окружающей среды. В результате расчета должны быть определены геометрические разме-



ры магнитопровода, данные обмоток (т. е. числа витков, марки и диаметры проводов или геометрические размеры обмоточной ленты, если обмотки выполняются лентой), электрические и эксплуатационные параметры. Важнейшими из этих параметров являются КПД трансформатора, ток холостого хода, падение напряжения и превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды.

Расчет трансформатора по указанным выше исходным данным представляет собой математически неопределенную задачу, имеющую большое количество различных решений. Последнее объясняется тем, что число параметров трансформатора, подлежащих определению, больше числа уравнений, связывающих указанные параметры с исходными величинами. В связи с этим в процессе расчета трансформаторов приходится предварительно задаваться рядом значений электрических, электромагнитных и конструктивных величин, основываясь при этом главным образом на экспериментальных данных, полученных в результате испытания ряда трансформаторов, подобных рассчитываемому. Приведем примеры расчета трансформаторов различных типов.

По примерам 1.5.1-1.5.4 можно судить о многообразии конструктивных и технологических решений трансформаторов электропитания ЭА. Появление новых материалов для магнитопроводов (в частности, аморфных и нанокристаллических) расширяет это многообразие [1].

Конструктивно-технологический облик трансформаторов определяется не только применяемыми материалами, но и требованиями к соотношению габаритных размеров. Современные технические решения по компоновке ЭА диктуют низкопрофильность электронных компонентов, в том числе и трансформаторов. При этом традиционные магнитопроводы не могут удовлетворить в полной мере комплексу технических требований. Это привело к появлению различных модификаций броневых и стержневых магнитопроводов плоской формы, таких как Е, ЕК, ЕП, ШП и др. В последние годы, с повышением рабочей частоты, появились конструкции, в которых обмотка и (или) магнитопровод выполняются в виде пленок на плате.

Падение напряжения, зависит в первую очередь от нагрузки обмоток. Чем больше плотность тока I тем больше падение напряжения. Значение допустимого падения напряжения различно в зависимости от назначения и условий работы трансформатора элек-



тропитания. Обычно лежит в пределах 1...20 % от номинального напряжения обмотки.

Ток холостого хода определяется в основном нагрузкой магнитопровода. Он может изменяться в весьма широких пределах и для маломощных трансформаторов может быть сравнимым с током первичной обмотки трансформатора под нагрузкой.

Материалы, предлагаемые некоторыми изготовителями, отличаются высоким потребителем качеством и значительно превосходят морально устаревшие отечественные марки М2500НМС1 и М2500НМС2 по электромагнитным параметрам (так, в контрольной точке на 100 кГц при 100°C и $B = 0,2$ Тл потери в марке N87 (Ercos) и 3С90 (Ferroxcube) составляют примерно 385 мВт/см³, что ориентировочно в 3,5 раза меньше чем у М2500НМС1.

Для силовых трансформаторов, работающих на частотах ниже 100 кГц выпускается широкий перечень ферритов:

N27 ($\mu_i = 2000$) базовый силовой материал,

N41 ($\mu_i = 2800$) для трансформаторов тока.

Для диапазона частот $f < 500$ кГц:

N87 ($\mu_i = 2200$) базовый материал,

N97 ($\mu_i = 2300$) уровнем потерь на 20% ниже, чем у базового материала N87,

PC47 ($\mu_i = 2500$) имеет наименьшие потери,

N95 ($\mu_i = 3000$) имеет близкую к линейной зависимость потерь от температуры.

N51 ($\mu_i = 3000$) имеет минимум потерь при $T = 40^\circ\text{C}$.

Для диапазона частот $f > 500$ кГц - N49 ($\mu_i = 1500$) позволяет создавать преобразователи на частотах до 1 МГц).

Для диапазона частот $f > 1$ МГц - PC200 ($\mu_i = 800$).

Для выходных дросселей (высокое значение индукции насыщения):

N87 ($\mu_i = 2200$) базовый силовой материал,

N92 ($\mu_i = 1500$) высокая индукция насыщения, насыщается при токе, на 20% большем, чем N87,

N93 ($\mu_i = 1250^*$) новейший материал с наибольшей индукцией насыщения.

Для электронных балластов (ЭПРА) - N72 ($\mu_i = 2500$) низкое значение коэрцитивной силы H_c , близкая к линейной ее зависимость от температуры.