

# Расчет трансформаторов

## при произвольных законах изменения напряжения и тока

**Предложен принцип расчета трансформаторов при произвольных законах изменения напряжения и тока. Расчет предполагает удовлетворение двух условий: это обеспечение теплового режима элементов трансформатора и получение заданной индуктивности рассеивания. Проведено сравнение шести часто встречающихся конфигураций трансформаторов.**

Юрий Черкашин, к. т. н.  
cheryury@mtu-net.ru

Расчету трансформаторов посвящено много работ, например [1–5]. В данной статье представлен подход к их расчету, основанный на обеспечении:

- заданного нагрева магнитопровода (МП) при намагничивании его переменным напряжением произвольной формы и нагрева обмоток рабочим током произвольной формы;
- получения заданной индуктивности рассеивания, то есть получения заданного значения напряжения короткого замыкания или заданной длительности фронта импульса.

Первый подход хорошо зарекомендовал себя при расчете дросселей с магнитопроводом при произвольной форме тока [6]. Созданная теория подтверждалась результатами статистической обработки значений удельной энергии промышленных дросселей, которая выявила зависимость удельной энергии дросселя как степень 1/7 от значения самой энергии в широких пределах изменения энергий от долей до тысяч джоулей.

Далее не рассматривается расчет «строчных» трансформаторов, которые по виду выполняемых функций являются двухобмоточными дросселями.

В трансформаторе закон изменения индукции задается напряжением, в дросселе — током. Другими словами, сердечник трансформатора намагничивается напряжением, а дросселя — током. Можно выделить несколько типичных несинусоидальных режимов работы трансформатора.

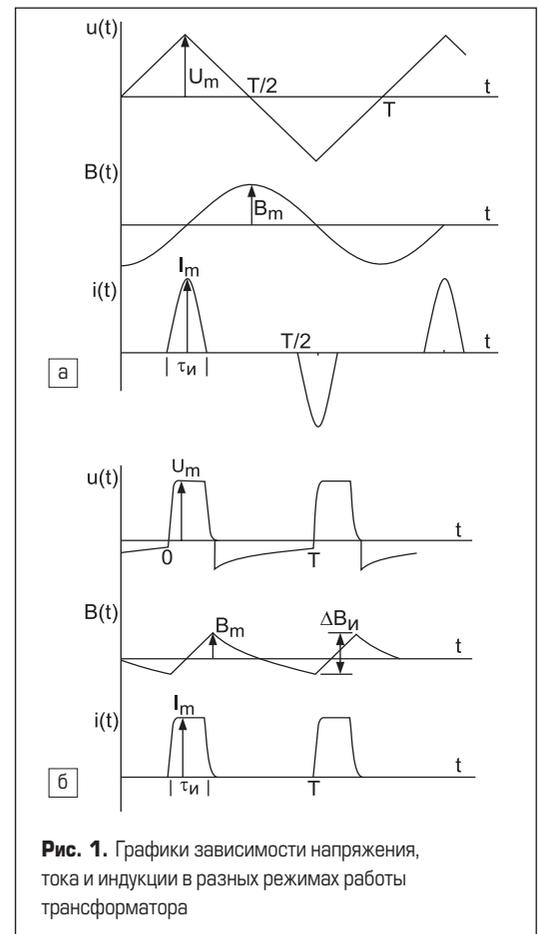
1. Минимальное и максимальное значения напряжения близки по абсолютному значению, но имеют противоположные знаки (рис. 1а). Имеет место режим переменного тока.
2. Минимальное и максимальное значения напряжения намного отличаются друг от друга, например, одно равно 5–10% другого (рис. 1б). Время действия положительного и отрицательного напряжения сильно отличаются. Режим принято называть импульсным. Разность между максимальным и минимальным значением индукции называют перепадом  $\Delta B$  (иногда размахом), а половину этого значения — амплитудой переменной составляющей  $B_m$ .

В обоих режимах постоянная составляющая индуктированного напряжения равна нулю. В противном случае индукция в магнитопроводе стала бы непрерывно нарастать.

Дроссель и трансформатор состоят из одинаковых частей: магнитопровода и обмоток. Задачей конструктивного расчета трансформатора и дросселя является определение основных геометрических размеров магнитопровода, числа витков обмоток, сечения проводов обмоток, а для дросселя — еще и определение размеров воздушного зазора.

Исходными данными для расчета трансформатора являются:

1. Закон изменения напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$  с заданными параметрами: средним значением напряжения  $U_{cp}$ , эффективным значением тока  $I$  или амплитудой  $I_m$  и коэффициентом амплитуды импульса  $k_a = I_m/I$ , а также скважностью импульсов  $v = \tau_n/T$  (рис. 1б).



**Рис. 1.** Графики зависимости напряжения, тока и индукции в разных режимах работы трансформатора

2.  $L_s$  — индуктивность рассеивания, или на-  
пряжение короткого замыкания  $u_k$ , или  
 $\tau_s = L_s/R_n$  — постоянная времени, где  $R_n$  —  
сопротивление нагрузки трансформатора.

Если трансформатор работает совместно  
с формирующей линией, то при вычислении  
постоянной времени сопротивление нагруз-  
ки должно быть удвоено, так как сопротивле-  
ние нагрузки и, как правило, равное ему вол-  
новое сопротивление линии включены после-  
довательно с индуктивностью рассеивания  
трансформатора.

Далее будут рассмотрены броневые и стерж-  
невые типы трансформаторов. Самые плохие  
условия охлаждения, ввиду закрытости магни-  
топровода катушками, имеет стержневой тип  
с катушками на обоих стержнях. Стержневой  
тип трансформатора с двумя катушками экви-  
валентен тороидальному трансформатору.  
Удельные потери для этих магнитопроводов,  
как правило, должны составлять 3–5 Вт/кг, а для  
остальных — 7–10 Вт/кг.

Предварительно по принятому значению  
удельных потерь в магнитопроводе при извест-  
ном законе изменения индукции определяют  
допустимую амплитуду переменной со-  
ставляющей индукции  $B_{mc}$  или перепад ин-  
дукции  $\Delta B_n$ .

Рассмотрим выбор и расчет режима работы  
магнитопроводов.

Самым простым является выбор рабочей  
индукции для работы на очень низких частотах  
— 10–20 Гц. В этом случае могут быть при-  
менены шихтованные или витые магнитопро-  
воды из обычных трансформаторных сталей  
с толщиной листа или ленты 0,3–0,5 мм. Для  
импульсных трансформаторов перепад ин-  
дукций может быть близким к значению  $2B_s$ .  
Для обеспечения такого режима должно быть  
применено смещение рабочей точки на кри-  
вой намагничивания путем подмагничивания  
МП постоянным током.

На частотах в десятки и сотни герц должен  
быть проведен традиционный выбор матери-  
алов и режимов работы.

На частотах несколько десятков килогерц  
потери в МП являются определяющими в вы-  
боре марки и толщины магнитного материа-  
ла. На этих частотах вихревые потери можно  
регулировать выбором толщины материала.  
Особо тонкими выпускаются ленты из пер-  
маллоев (толщиной 10–20 мк) и аморфные  
или нанокристаллические материалы (25 мк).  
Гистерезисные потери не зависят от толщи-  
ны материала, а на высоких частотах стано-  
вятся определяющими. Необходимо выби-  
рать материалы с узкой петлей гистерезиса  
или с высокой начальной магнитной про-  
ницаемостью. Здесь МП из аморфных сплавов  
практически не имеют преимуществ по срав-  
нению с МП из высоколегированных сплавов  
(пермаллоев).

Радикальный способ снижения потерь —  
это уменьшение рабочего значения индук-  
ции вплоть до десятых долей тесла. Пovy-  
шенное значение индукции насыщения ма-  
териала часто оказывается невостребован-  
ным. При малом значении индукции размеры  
магнитопровода и трансформатора сильно  
возрастают.

Для повышения индукции и уменьшения  
размеров трансформатора может быть при-  
менен интенсивный обдув или масляное  
охлаждение, повышающие теплосъем с поверх-  
ностей в 1,5–2 раза. Ферритовые сердечники  
при естественном охлаждении позволяют ра-  
ботать с индукцией 0,3–0,4 Тл.

Выше 10–15 кГц — область работы ферри-  
товых сердечников или обычных сплавов  
с очень низкими значениями рабочей индук-  
ции или принудительным охлаждением. К со-  
жалению, изготовление ферритовых сердеч-  
ников больших размеров связано с техноло-  
гическими трудностями. Выбор рабочей  
индукции производится расчетным путем или  
по графикам справочных материалов [7, 8].

Объективным способом контроля качества  
расчета является экспериментальная провер-  
ка теплового режима магнитопровода при вы-  
бранной рабочей индукции на опытном серд-  
ечнике или его модели. На сердечник нама-  
тывается контрольная обмотка из тонкого  
провода с числом витков, обеспечивающим  
выбранное значение индукции при известной  
амплитуде импульса контрольного генерато-  
ра  $w = U_i \times \tau_n / (s \times \Delta B_n)$ .

Такой генератор имеет небольшую мощ-  
ность, так как обеспечивает намагничивание  
сердечника только на холостом ходу. Те участ-

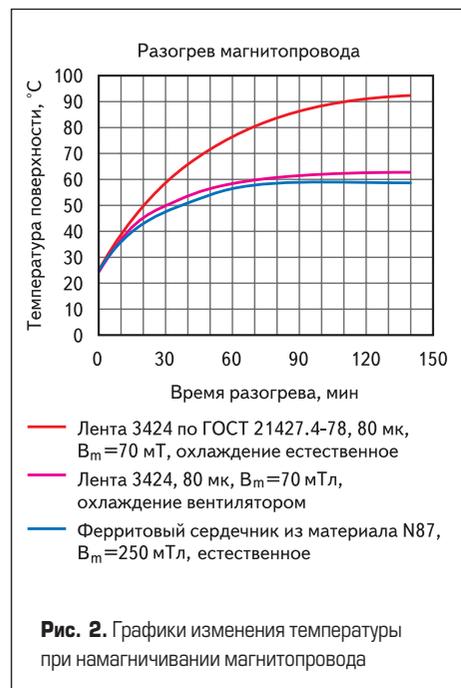


Рис. 2. Графики изменения температуры при намагничивании магнитопровода

ки сердечника, на которых будет располагать-  
ся обмотка, могут быть закрыты теплоизоля-  
ционным материалом.

Пример результатов проверки приведен  
на графиках (рис. 2). Выбором магнитного ма-

Таблица. Типовые конструкции трансформаторов броневые и стержневые типов

Тип трансформатора	Броневой		Стержневой			
	s					
Площадь сечения магнитопровода						
Короткая сторона сечения одного кольца	$a = \sqrt{s/4} = 0,5s^{1/2}$	$a = \sqrt{s/8} = 0,35s^{1/2}$	$a = s^{1/2}$	$a = \sqrt{s/2} = 0,71s^{1/2}$	$a = s^{1/2}$	$a = \sqrt{s/2} = 0,71s^{1/2}$
Длина силовой линии через корень из s, $l_1 = k_2 s^{1/2}$	$k_2 = 8,17$	$5,79$	$14,34$	$10,17$	$14,34$	$10,17$
Длина витка через корень из s, $l_n = k_4 s^{1/2}$	$k_4 = 7,14$	$6,48$	$6,51$	$6,04$	$9,02$	$7,84$
Сечение окна через s, $s_{ок} = k_6 s$	$k_6 = 2,30$	$1,15$	$6,40$	$3,20$	$6,40$	$3,20$
Площадь торца катушки через s, $s_{торц} = k_7 s$	$k_7 = 7,14$	$4,57$	$5,21$	$3,40$	$14,44$	$8,82$
Площадь охлаждения катушки через s, $s_{охл} = k_8 s$	$k_8 = 31,62$	$16,96$	$81,83$	$46,52$	$77,87$	$42,53$
Поверхность охлаждения магнитопровода, через s, $s_{охлс} = k_{10} s$	$k_{10} = 31,22$	$25,35$	$22,16$	$15,82$	$38,16$	$27,82$
Разрешенные удельные потери в магнитопроводе, $p_{уд} = k_{12} / s^{1/2}$ , Вт·м/кг	$k_{12} = 0,37$	$0,43$	$0,15$	$0,15$	$0,26$	$0,27$
Коэффициент намагничивающей силы	$k_{iw} = 1,77 \times 10^5$	$9,62 \times 10^4$	$4,97 \times 10^5$	$2,75 \times 10^5$	$4,12 \times 10^5$	$2,31 \times 10^5$
Коэффициент определения индуктивности рассеивания	$k_{Ls} = 12,5 \times 10^{-7}$	$11,4 \times 10^{-7}$	$2,61 \times 10^{-7}$	$2,41 \times 10^{-7}$	$14,5 \times 10^{-7}$	$12,5 \times 10^{-7}$
Коэффициент определения плотности тока	$k_A = 4,40 \times 10^5$	$4,78 \times 10^5$	$4,44 \times 10^5$	$4,92 \times 10^5$	$3,68 \times 10^5$	$4,13 \times 10^5$
Коэффициент определения массы медного провода	$k_{gm} = 5,12 \times 10^4$	$2,32 \times 10^4$	$1,30 \times 10^5$	$6,02 \times 10^4$	$1,80 \times 10^5$	$7,79 \times 10^4$
Коэффициент определения массы магнитопровода	$k_{gc} = 5,42 \times 10^4$	$3,84 \times 10^4$	$9,51 \times 10^4$	$6,74 \times 10^4$	$9,51 \times 10^4$	$6,74 \times 10^4$
Коэффициент определения массы трансформатора через сечение сердечника	$k_{gs} = 1,16 \times 10^5$	$6,78 \times 10^4$	$2,47 \times 10^5$	$1,40 \times 10^5$	$3,02 \times 10^5$	$1,60 \times 10^5$
Коэффициент определения массы трансформатора через $U_{ср}, S, W_n$	$k_{glw} = 3,68$	$3,63$	$3,24$	$3,05$	$4,65$	$4,04$
Коэффициент определения массы трансформатора через $S, W_n$ и $u_{кр} \tau_s / \tau_n$	$k_{gsu} = 0,144$	$0,0767$	$0,0646$	$0,0340$	$0,438$	$0,201$

териала и величины рабочей индукции заканчивается первый этап расчета трансформатора.

В последующих выводах принято допущение, что тепловой режим магнитопровода не влияет на тепловой режим катушки. При тепловом расчете магнитопровода и катушек не должны учитываться поверхности их соприкосновения.

Второй этап — расчет обмоток. За основную переменную величину принимаем сечение магнитопровода (первая строка таблицы). Сечение — единственный геометрический параметр, входящий в формулу закона электромагнитной индукции. Закон инвариантен по отношению к форме сечения. Через сечение при выбранной конфигурации трансформатора могут быть определены все остальные размеры трансформатора, например, короткая сторона сечения  $a = 0,5 \times s^{1/2}$  (вторая строка таблицы), длинная сторона  $b = 2a$ , высота окна  $h = 4,6a$ , длина средней силовой линии  $l_c = (4,6 + 4,6 + 2 + 2 + 3,14) \times a = k_2 \times s^{1/2}$  (третья строка таблицы), длина витка  $l_m = k_4 \times s^{1/2}$ , сечение окна  $s_{ок} = k_6 \times s$ . При вычислении площади охлаждения катушек участки поверхности, соприкасающиеся с магнитопроводом, исключены из общей площади охлаждения.

В таблице приведены данные об отношении открытой для охлаждения поверхности магнитопровода к его объему ( $k_{12}$ ), определяющие допустимые удельные потери в сердечнике Вт·м/кг.

Выбор в качестве аргумента сечения  $s$  удобен тем, что после определения основных геометрических размеров трансформатора стержень с прямоугольным сечением может быть заменен стержнем любой формы (например, круглым, ступенчатым) с равновеликим сечением при сохранении основных электрических параметров трансформатора. В таблице представлен ряд типовых конструкций трансформаторов броневые и стержневые типов. Два первых — броневого с квадратным и прямоугольным сечением магнитопровода, два следующих — стержневые с квадратным и прямоугольным сечением магнитопровода с катушками на каждом стержне, и два последних — тоже стержневые с катушкой на одном стержне.

Проблема рассматривается без учета нелинейности вебер-амперных характеристик и при предположении, что в обмотках отсутствуют дополнительные каналы охлаждения.

Напряжение, индукция, сечение магнитопровода и число витков связаны законом электромагнитной индукции:

- при переменном напряжении:

$$U_{cp} \frac{T}{2} = (2B_{mc})k_c s w,$$

отсюда может быть найдено число витков:

$$w = \frac{U_{cp}}{4 f B_{mc} k_c s} \quad (1)$$

- при синусоидальном напряжении:

$$U = 4,44 f B_{ms} k_c s w,$$

$$w = \frac{U}{4,44 f B_{mc} k_c s}.$$

- при импульсном напряжении:

$$U_u \tau_u = (2B_{ms})k_c s w = \Delta B_u k_c s w,$$

$$w = \frac{U_u \tau_u}{\Delta B_u k_c s} \quad (2)$$

где  $\Delta B_u = 2B_{mc}$  — перепад индукций,  $B_{mc}$  — максимальное значение индукции в материале сердечника.

Видно, что при произвольном законе изменения напряжения роль импульса намагничивания играет среднее значение напряжения за ту часть периода, в которой напряжение выше (или ниже) нуля; эффективное значение тока вычисляется за целый период. Импульсный режим отличается от периодического, в первую очередь, наличием скажности, отличием амплитуд и длительностей положительной и отрицательной частей кривой напряжения.

Умножая левую и правую части первых уравнений при переменном режиме на  $I$ , а при импульсном режиме на  $I_u$ , с учетом того, что  $I = I_m / k_a \sqrt{v}$  и  $T = 1/f$ , получим:

- при переменном напряжении:

$$U_{cp} I = 4 f B_{mc} k_c s (I w)_1 \quad (3)$$

- при синусоидальном напряжении:

$$S = UI = 4,44 f B_{mc} k_c s (I w)_1,$$

- при импульсном напряжении:

$$U_u I_u \tau_u = (2B_{mc})k_c s (I_u w)_1 = k_a \sqrt{v} \times \Delta B_u k_c s (I w)_1 \quad (4)$$

Покажем, что МДС  $(I w)_1$  катушек каждого магнитопровода имеет некоторое предельное значение, ограниченное нагревом катушек. Пусть в окне сердечника площадью  $s_{ок}$  размещается  $w$  витков обмотки, коэффициент заполнения окна проводниковым материалом  $k_m = 0,35$ , тогда активное сопротивление обмотки:

$$R_{обм} = (\rho l_{m1} w^2) / (s_{ок} k_m), \quad (5)$$

где  $l_{m1}$  — средняя длина одного витка обмотки,  $\rho = 1,85 \times 10^{-8}$  Ом·м — удельное сопротивление медного провода.

Для того чтобы сопротивление обмотки и выделяющаяся мощность не увеличивались с ростом рабочей частоты (кГц) трансформатора, его обмотки должны быть намотаны проводом типа литцендрат. Жила провода литцендрат состоит из многих изолированных проводников. Диаметр одного проводника (мм) не должен превышать значения [9]:

$$d \leq 1/\sqrt{f} \quad (6)$$

Мощность, выделяемая в катушке и рассеиваемая ее поверхностью:

$$P = I^2 R = \frac{\rho l_{m1} (I w)^2}{s_{ок} k_m} = q s_{охл},$$

где  $s_{охл}$  — поверхность охлаждения обмотки, то есть поверхность обмотки за исключением частей, обращенных к стержню;  $q = 650$  Вт/м<sup>2</sup> — допустимая плотность теплового потока при превышении температуры поверхности обмотки над окружающим воздухом на 55 °С.

Для уменьшения индуктивности рассеивания (см. далее) бывает целесообразно при заданной площади окна снизить толщину намотки, то есть занять обмоткой лишь часть ширины окна. Эта же задача возникает при необходимости разместить в окне высоковольтную изоляцию первичной или вторичной обмотки.

Введем параметр  $\beta < 1$  — коэффициент использования ширины окна. Тогда предельная МДС будет равна:

$$(I w)_{пред} = \sqrt{\frac{\beta s_{ок} k_m q s_{охл}}{\rho l_{m1}}} \quad (7)$$

Предельная МДС зависит от геометрических размеров катушки, коэффициента теплоотдачи с ее поверхности, удельного сопротивления провода и коэффициента использования ширины окна.

Поверхность охлаждения, площадь окна, площадь сечения сердечника, средняя длина витка для выбранной формы сердечника могут быть выражены через сечение зазора  $s$ , и поэтому

$$(I w)_{пред} = 2\sqrt{\beta} \times k_{Iw} s^{3/4} \quad (8)$$

Значения коэффициента

$$k_{Iw} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_6 k_m q k_8}{\rho k_4}}$$

для распространенных геометрических форм магнитопроводов приведены в таблице (при расчетах предполагается использование системы СИ).

В каждой катушке стержня трансформатора имеется минимум две обмотки, их магнитодвижущие силы равны:  $(I w)_1 = (I w)_2 = (I w)_{пред} / 2$ . С учетом этого уравнения (3) и (4) примут вид:

- при переменном напряжении:

$$s (I w)_1 = \frac{U_{cp} I}{4 f B_{mc} k_c} = k_{Iw} \sqrt{\beta} \times s \times s^{3/4},$$

решая относительно  $s$ , получим:

$$s = \left( \frac{U_{cp} I}{4 f \times k_{Iw} \sqrt{\beta} B_{mc} k_c} \right)^{4/7} \quad (9)$$

- при синусоидальном напряжении:

$$s = \left( \frac{S}{4,44 f \times k_{Iw} \sqrt{\beta} B_{mc} k_c} \right)^{4/7} \quad (10)$$

- при импульсном напряжении:

$$s(IW)_1 = \frac{U_u I_u \tau_u}{k_a \sqrt{\nu} \Delta B_u k_c} = k_{Iw} \sqrt{\beta} \times s^{3/4},$$

$$s = \left( \frac{W_u}{k_a \sqrt{\nu} k_{Iw} \sqrt{\beta} \Delta B_u k_c} \right)^{4/7} \cdot (11)$$

Это первая группа формул для определения сечения магнитопровода проектируемого трансформатора. Затем могут быть определены остальные размеры, например, короткая сторона сечения магнитопровода  $a = \sqrt{s}$  при квадратной или  $a = \sqrt{(s/2)}$  при прямоугольной форме сечения, высота окна  $h = 4a$  и т. д.

Обратим внимание, что исходными данными для расчета трансформатора на переменном токе являются среднее напряжение за полпериода и эффективный ток обмоток без учета фазы их взаимного расположения во времени. Другими словами, размеры трансформатора зависят не от передаваемой активной мощности, а от полной или кажущейся мощности  $S$ .

Однако если производить расчет трансформатора исходя только из условий охлаждения, то может оказаться, что индуктивность рассеивания  $L_s$  обмоток будет очень большой, что приведет к недопустимо большому падению напряжения  $u_k$  при синусоидальном режиме работы трансформатора, искажению формы кривой при другом законе изменения напряжения или к недопустимо большой длительности фронта  $\tau_s/\tau_u$  в импульсном режиме.

Значение индуктивности рассеивания  $L_s$  пропорционально площади сечения катушек трансформатора в плоскости, перпендикулярной оси катушек, и обратно пропорционально их длине. Если одна обмотка короче другой, то индуктивность рассеивания резко возрастает, поэтому длины обмоток должны совпадать. При малом числе витков для выполнения этого условия секции с малым числом витков должны быть повторены необходимое число раз, а затем соединены параллельно. Эффективная площадь рассеивания  $s_s$  представляет сумму третьей части от площади сечения обмоток и полной площади сечения зазора между обмотками. Если обмотки занимают не всю ширину окна, то:

$$L_s = (\mu_0 w^2 \beta s_s) / h_{кат} = k_{Ls} \beta w^2 s^{1/2}, (12)$$

где  $k_{Ls} = (\mu_0 s_s) / h_{кат}$ .

Значения коэффициента  $k_{Ls}$  приведены в таблице.

У стержневого трансформатора с двумя катушками длина катушек вдвое больше, чем у трансформаторов остальных видов, а их толщина вдвое меньше. Индуктивность рассеивания получается примерно в 4 раза меньше, чем у других видов. Она сопоставима с индуктивностью рассеивания трансформатора, выполненного на тороидальном сердечнике с обмоткой, расположенной не по всей длине средней силовой линии МП (из-за необходимости выполнить выводы от нижней обмотки). Однако, если на высоких частотах из-за плохого охлаждения сердечника придется вдвое

снизить индукцию, то потребуется вдвое увеличивать число витков, в четыре раза возрастает индуктивность рассеивания. Преимущества тороидальной конструкции полностью теряются.

Подставим в формулу (12) значения витков (1) и (2) для обоих режимов и получим:

- при переменном напряжении

$$L_s = k_{Ls} \beta \left( \frac{U_{cp}}{4f B_{mc} k_c} \right)^2 \frac{1}{s^{3/2}}, (13)$$

решая уравнение относительно  $s$ , получим:

$$s = \left( \frac{k_{Ls} \beta}{L_s} \right)^{2/3} \left( \frac{U_{cp}}{4f B_{mc} k_c} \right)^{4/3} (14)$$

- при импульсном напряжении

$$L_s = k_{Ls} \beta \left( \frac{U_u \tau_u}{\Delta B_u k_c} \right)^2 \frac{1}{s^{3/2}}, (15)$$

$$s = \left( \frac{k_{Ls} \beta}{L_s} \right)^{2/3} \left( \frac{U_u \tau_u}{\Delta B_u k_c} \right)^{4/3} \cdot (16)$$

Мы получили вторую пару формул для определения размеров трансформатора. Она определяет размеры трансформатора при любой форме кривой напряжения. Предполагается, что известно значение индуктивности рассеивания и напряжение той обмотки, относительно которой определяется эта индуктивность.

Если значение  $L_s$  неизвестно, то размеры могут быть определены через относительные величины: напряжение короткого замыкания для синусоидального режима (понятие напряжение короткого замыкания существует только для синусоидального режима, когда существует величина — круговая частота  $\omega = 2\pi f$ ) или относительную длительность фронта импульса для импульсного режима.

Умножив левую и правую части уравнения (13) для синусоидального режима на  $I$ , а для импульсного режима (15) — на  $I_u$  и после несложных преобразований получим:

- при синусоидальном напряжении

$$s = \left( \frac{k_{Ls} \beta}{\pi f} \frac{S}{(B_{mc} k_c)^2} \frac{100}{u_k} \right)^{2/3}, (17)$$

- при импульсном напряжении

$$s = \left( k_{Ls} \beta \frac{W_u}{(\Delta B_u k_c)^2} \frac{\tau_u}{\tau_s} \right)^{2/3}, (18)$$

где  $u_k = 100\omega L_s I / U$  — напряжение короткого замыкания в %, а для импульсного режима  $\tau_s/\tau_u$  — относительная длительность фронта импульса.

Таким образом, мы получили третью пару формул для определения площади сечения магнитопровода.

Если известны  $L_s$  и  $u_k$  или  $\tau_s/\tau_u$ , то вторая и третья группы формул дают одинаковый результат. Из найденных по (9–11) сечения  $s_1$  и по (14, 16–18) сечения  $s_2$  должно быть выбрано большее по величине, и с ним проведены расчеты остальных геометрических параметров, чисел витков и др. Однако, если сечение, найденное из (14, 16–18), окажется много больше сечения, полученного из (9–11) с учетом только тепловой нагрузки трансформатора (через  $k_{Iw}$ ), то должен быть произведен повторный расчет с  $\beta < 1$ . Можно показать, что приближенно (как  $s^{20/21} \cong s'$ ) значение  $\beta$  может быть принято равным отношению полученных на первом шаге сечений  $s_1/s_2$ .

Тепловыделение внутри обмоток трансформатора, поверхность охлаждения и принятая допустимая температура поверхности катушек определяют максимально допустимую плотность тока в проводах обмоток:

$$\Delta I = \sqrt{\frac{q s_{охл}}{\rho l_m \beta s_{ок} k_m}}, \Delta I = \frac{k_{\Delta}}{\sqrt{\beta} \sqrt[4]{s}} \cdot (19)$$

Значения коэффициента  $k_{\Delta}$  также приведены в таблице.

С учетом найденных соотношений могут быть определены объемы меди обмотки и стали сердечника.

$$V_m = s_{ок} \beta l_{m1} k_{mp} \quad V_c = s l_c k_c \cdot (20)$$

Зная плотность меди и стали, предполагая массу конструктивных элементов (10%), найдем массу этих частей и общую массу трансформатора, кг:

$$m_m = k_{gm} \beta s^{3/2}, \quad m_c = k_{gc} s^{3/2},$$

$$m_T = k_{gs} ((\beta + 1)/2) s^{3/2}. (21)$$

Значения коэффициентов  $k_{gm}$ ,  $k_{gc}$  и  $k_{gs}$  приведены в таблице.

В формулу для определения общей массы трансформатора  $m_T$  (21) может быть подставлено значение сечения из (9). Получим выражение для вычисления массы трансформатора без учета влияния индуктивности рассеивания:

$$m_{U1} = k_{glw} \left( \frac{\sqrt{\beta}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{\beta}} \right) \left( \frac{U_{cp} I}{4f B_{mc} k_c} \right)^{6/7} \cdot (22)$$

Используя формулу (17), найдем выражение для массы через полную мощность и напряжение короткого замыкания:

$$m_{Su} = k_{gsu} \frac{\beta^2 + \beta}{2} \frac{S}{\pi f (B_{mc} k_c)^2} \frac{100}{u_k} \cdot (23)$$

Используя формулу (18), определим массу трансформатора при одновременном задании энергии импульса и постоянной времени цепи нагрузки:

$$m_{w\tau} = k_{gw\tau} \frac{\beta^2 + \beta}{2} \frac{W_u}{(\Delta B_u k_c)^2} \frac{\tau_u}{\tau_s} \cdot (24)$$

Значения коэффициентов  $k_{gsu} = k_{gw\tau}$  приведены в таблице.

При анализе этих коэффициентов видно, что если проектировать трансформатор с одинаковым уровнем индукции (если позволяют условия охлаждения МП), то самым легким является стержневой трансформатор с прямоугольным сечением магнитопровода.

Порядок применения формул для инженерных расчетов покажем на примерах.

#### Пример 1

Требуется спроектировать трансформатор, работающий от генератора напряжения прямоугольной формы («меандр») с амплитудой 375 В. Ток нагрузки в виде резонансного контура обуславливает синусоидальную форму тока с эффективным значением  $I = I_m / (k_s \sqrt{2}) = 43$  А, рабочая частота 15 кГц, индуктивность рассеивания должна составлять 9,5 мкГн.

Высокая рабочая частота заставляет сразу обратиться к применению ферритового магнитопровода. Коэффициент заполнения материалом сердечника  $k_c = 1$ . В соответствии с приведенным на рис. 2 графиком выбираем уровень рабочей индукции  $B_{cm} = 0,22$  Тл.

Выбираем магнитопровод стержневого типа с прямоугольным сечением. Рассчитываем сечение магнитопровода без учета требований к напряжению короткого замыкания по (9), первоначально с  $\beta = 1$ .

$$s = \left( \frac{375 \times 43}{4 \times 15000 \times 2,75 \times 10^{-5} \times 0,22} \right)^{4/7} = 8,6 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Теперь с учетом требований к индуктивности рассеивания рассчитаем по (16):

$$s = \left( \frac{2,41 \times 10^{-7}}{9,5 \times 10^{-6}} \right)^{2/3} \left( \frac{375}{4 \times 15000 \times 0,22} \right)^{4/3} = 7,3 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Очевидно, трансформатор должен быть выполнен на магнитопроводе с большим сечением — 8,6 см<sup>2</sup>. По найденному сечению могут быть определены остальные размеры трансформатора. Например,  $a = 0,71\sqrt{s} = 0,02$  м, высота окна  $h = 4a = 0,08$  м; ширина окна  $1,6a = 0,032$  м; площадь окна 0,0026 м<sup>2</sup> и т. д. Число витков рассчитываем по формуле (1):

$$w = \frac{375}{4 \times 15000 \times 0,22 \times 1 \times 8,6 \times 10^{-4}} = 32.$$

Плотность тока вычисляем по формуле (19):

$$\Delta I = \frac{4,92 \times 10^5}{\sqrt{8,6 \times 10^{-4}}} = 2,9 \text{ А/мм}^2.$$

Сечение провода  $43/2,9 = 14,8$  мм<sup>2</sup>, или иначе:

$$S_{m1} = \frac{s_{ок} \beta k_m}{2 w} = \frac{0,0026 \times 0,35}{2 \times 32} = 14,2 \times 10^{-6} = 14,2 \text{ мм}^2.$$

Диаметр составляющих литцендрат проводников по (6) составит  $1/\sqrt{15} = 0,26$  мм.

Число витков и сечение другой обмотки будут отличаться в коэффициент трансформации раз.

Масса трансформатора составит  $m_T = k_{gs} ((\beta+1)/2) s^2$ ,  $m_T = 1,40 \times 10^5 \times 1 \times (8,6 \times 10^{-4})^2 = 3,5$  кг.

#### Пример 2

Требуется рассчитать трансформатор, работающий совместно с формирующей линией, импульсным напряжением 40 кВ, током 300 А (импульсная мощность 12 МВт), длительностью импульса 360 мкс, длительностью фронта  $t_{\phi} = 10\%$  и частотой повторения импульсов 1 Гц.

Скважность импульсов  $1/0,00036 = 2780$ . Трансформатор, работающий на активную нагрузку без формирующей линии, будет иметь постоянное времени фронта вдвое больше — 20%. Длительность фронта —  $360 \times 0,2 = 72$  мкс =  $3\tau_s$ . Постоянная времени фронта трансформатора  $\tau_s$  составит  $72/3 = 24$  мкс. При этом сопротивление нагрузки  $R_n = 40000/300 = 133$  Ом, и индуктивность рассеивания  $L_s = \tau_s R_n = 24 \times 133 = 3200$  мкГн.

Расчет начинаем с выбора режима работы магнитного материала сердечника. При частоте повторения 1 Гц можно использовать любой магнитомягкий материал — листовую трансформаторную сталь. Максимальное значение индукции может быть  $\Delta B_u = 2B_s = 2,4$  Тл.

Выбираем стержневой магнитопровод с квадратным (круглым, ступенчатым) сечением стержня с двумя катушками.

Рассчитываем сечение магнитопровода по энергии импульса без учета требований к длительности фронта (11) первоначально  $\beta = 1$ .

$$s = \left( \frac{4320}{\sqrt{2780} \times 4,97 \times 10^5 \times 2,4 \times 0,85} \right)^{4/7} = 46 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Теперь по энергии импульса с учетом требований к длительности фронта (18) находим  $s$ :

$$s = \left( 2,61 \times 10^{-7} \times \frac{4320}{(2,4 \times 0,85)^2} \frac{360}{24} \right)^{2/3} = 255 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Масса трансформатора с сечением  $255 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup> составит в соответствии с (21):

$$m_s = k_{gs} \frac{\beta+1}{2} s^{3/2},$$

$$m_T = 2,47 \times 10^5 \times (1+1)/2 \times (255 \times 10^{-4})^{3/2} = 1006 \text{ кг}.$$

Редкие импульсы не могут сильно нагреть обмотки, поэтому первое сечение и магнитопровод получаются небольшими. Второе большое сечение является следствием требований, связанных с длительностью фронта, то есть с индуктивностью рассеивания. Два полученных сечения отличаются примерно в пять раз. Можно в 2–3 раза уменьшить толщину обмотки. Проведем расчет по тем же формулам (11) и (18) при  $\beta = 0,4$ :

$$s = \left( \frac{4320}{\sqrt{2780} \times 4,97 \times 10^5 \sqrt{0,4} \times 2,4 \times 0,85} \right)^{4/7} = 60 \times 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$s = \left( 2,61 \times 10^{-7} \times 0,4 \times \frac{4320}{(2,4 \times 0,85)^2} \frac{360}{24} \right)^{2/3} = 138 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Дальнейшие вычисления необходимо производить с этим значением сечения, например, масса трансформатора будет не 1006 кг, а:

$$m_T = 2,47 \times 10^5 \times (0,4+1)/2 \times (138 \times 10^{-4})^{3/2} = 280 \text{ кг}.$$

Значение  $\beta$  может быть еще уменьшено.

#### Пример 3

Оценим размеры трансформатора с прямоугольной формой кривых рабочего напряжения и тока (меандр) 50 В, ток 1 А (эфф.) для работы на частоте 50 кГц.

Предполагаем применение ферритового броневое магнитопровода (Ш-образного) с индукцией 200 мТл.

По формуле (9) находим необходимое сечение магнитопровода:  $0,31 \text{ см}^2 = 31 \text{ мм}^2$ .

По формуле (22) его массу:  $0,012 \text{ кг} = 12 \text{ г}$  и т. д.

Далее могут быть проанализированы другие варианты конструкций, иные соотношения размеров с целью проведения уточнений при той или иной оптимизации (по массе, объему, стоимости, введению каналов охлаждения и т. п.).

Расчет по разработанным формулам типовых, выпускаемых промышленностью рядов трансформаторов серии ТН, ОСМ дает совпадение расчетных параметров с фактическими.

Одинаково успешный расчет и малых, и больших трансформаторов при различных законах изменения напряжения и тока указывает на фундаментальность приведенной теории расчета.

#### Литература

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. М.: Госэнергоиздат, 1953.
2. Иццоки Я. С. Импульсная техника. М.: Советское радио, 1949.
3. Булгаков Н. И. Расчет трансформаторов. М.: Госэнергоиздат, 1950.
4. Иццоки Я. С. Импульсные устройства. М.: Советское радио, 1959.
5. Черкашин Ю. С. Определение условий эквивалентности электрических режимов мощных силовых и импульсных трансформаторов // Электричество. 1966. № 5.
6. Черкашин Ю. С. Расчет дросселей с магнитопроводом при произвольной форме тока // Силовая электроника. 2008. № 3.
7. Черкашин Ю. С. Процесс и энергия намагничивания листового магнитопровода при прямоугольном напряжении // Электричество. 1978. № 6.
8. Бабин С. В., Карасев В. В., Филиппов Ф. Е. Характеристики магнитопроводов трансформаторов тока при одновременном воздействии постоянного и переменного магнитного поля // Электротехническая промышленность. 1981. Вып. 6.
9. Черкашин Ю. С. Проектирование катушек индуктивности для мощных радиотехнических устройств // Радиотехника. 1986. № 6.