

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Силовые трансформаторы используют для преобразования параметров электрической энергии переменного тока и для передачи этой энергии из одной цепи в другую.

Схема двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 1а. Первичная обмотка подключена к источнику переменного напряжения $u_1 = u_1(t)$. Напряжение на вторичной обмотке - u_2 , ток, активное сопротивление и коэффициент индуктивности первичной обмотки - i_1, R_1, L_1 , для вторичной обмотки те же параметры - i_2, R_2, L_2 , коэффициент взаимной индуктивности - M . Уравнения Кирхгофа для этой схемы имеют вид (см. [1])

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \tag{1}$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + u_2. \tag{2}$$

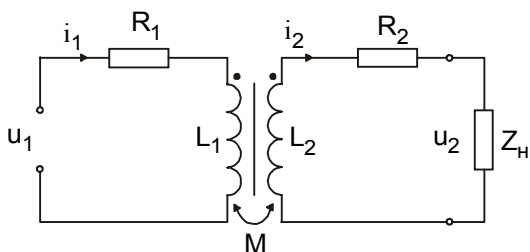


Рис. 1. Электрическая схема двухобмоточного трансформатора.

В идеальном трансформаторе активное сопротивление обмоток R_1 и R_2 , индуктивность рассеяния обмоток $L_{s1} = L_1 - nM$ и $L_{s2} = L_2 - nM$ равны нулю. Это позволяет преобразовать уравнения (1) и (2) к виду

$$u_1 = nM \frac{d(i_1 - i_2/n)}{dt}, \tag{3}$$

$$u_2 n = nM \frac{d(i_1 - i_2/n)}{dt}, \tag{4}$$

где $n = w_1/w_2$ коэффициент трансформации, равный отношению числа витков первичной обмотки w_1 к числу витков вторичной обмотки w_2 , $nM = L_0$ индуктивность намагничивания, $i_0 = i_1 - i_2/n$ ток намагничивания. Уравнениям (3) и (4) соответствует эквивалентная схема идеального трансформатора (рис. 2).

Поскольку потокосцепление магнитопровода BSw_1 связано с намагничивающим действием тока i_0 соотношением $L_0 i_0 = BSw_1$, то из уравнений (3) и (4) следует

$$u_1 = Sw_1 \frac{dB}{dt}, \tag{5}$$

$$u_2 = u_1 \frac{w_2}{w_1}, \tag{6}$$

где $B = B(t)$ магнитная индукция в материале магнитопровода в момент времени t , S - площадь поперечного сечения магнитопровода.

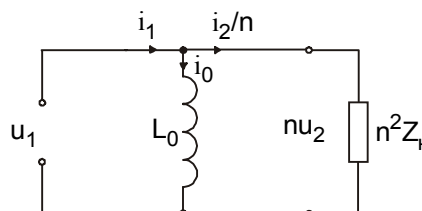


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема идеального двухобмоточного трансформатора.

При синусоидальном напряжении источника питания $u_1 = U_{m1} \sin 2\pi ft$ после решения дифференциального уравнения (5) получаем

$$B(t) = \frac{U_{m1}}{2\pi S f w_1} \cos 2\pi ft = B_m \cos 2\pi ft,$$

где U_{m1} - максимальное напряжение на первичной обмотке, а

$$B_m = \frac{U_{m1}}{2\pi S f w_1}$$

максимальная магнитная индукция (Тл). Для действующих значений U_1, U_2

$$U_1 = U_{m1}/\sqrt{2}, \quad U_2 = U_{m2}/\sqrt{2}$$

уравнения (5) и (6) заменяются соотношениями

$$U_1 = \sqrt{2} \pi B_m S f w_1, \tag{7}$$

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1}. \tag{8}$$

Мощность идеального трансформатора W_T

$$W_T = I_1 U_1 = I_2 U_2, \tag{9}$$

где I_1 и I_2 - действующие значения тока. Подставляя в уравнение (9) значения U_1 из (7), величину тока $I_1 = J_1 S_{\text{пр1}}$, выраженную через плотность тока J_1 и сечение провода первичной обмотки $S_{\text{пр1}}$, и используя выражение для коэффициента заполнения окна магнитопровода медным проводом первичной обмотки k_{m1}

$$k_{m1} = \frac{S_{\text{пр1}} w_1}{S_{\text{ок}}},$$

где $S_{\text{ок}}$ - площадь окна магнитопровода, получаем мощность трансформатора в виде

$$W_T = \sqrt{2\pi f} B_m (SS_{ок}) J_1 k_{M1}. \quad (10)$$

Для кольцевого магнитопровода

$$S_{ок} = \frac{\pi D_B^2}{4},$$

где D_B – внутренний диаметр магнитопровода.

Реальный трансформатор нагревается вследствие потерь энергии при перемагничивании магнитопровода и при протекании тока в обмотках. При расчете трансформаторов используют уравнения для идеального трансформатора, а реальные факторы учитывают следующим образом. Допустимая температура перегрева трансформатора ΔT является ограничивающим параметром расчета. Тепловой поток, излучаемый поверхностью трансформатора, состоит из потерь в магнитопроводе W_M (Вт) и потерь в обмотках $W_{об}$ (Вт), поэтому имеем

$$W_M + W_{об} = \alpha \Delta T S_T, \quad (11)$$

где S_T – площадь поверхности трансформатора (m^2), α – коэффициент теплоотдачи для естественного охлаждения равный приблизительно $12 \text{ Вт}/m^2 \cdot \text{град}$ [1].

Мощность потерь в магнитопроводе

$$W_M = PV\gamma, \quad (12)$$

где P – удельные магнитные потери в магнитном материале ($\text{Вт}/\text{кг}$), γ – плотность магнитного материала ($\text{кг}/m^3$), V – объем магнитного материала в магнитопроводе (m^3). Удельные магнитные потери P можно представить в виде зависимости от частоты f (Гц) и максимальной магнитной индукции B_m (Тл) [2]

$$P = r f^p B_m^s. \quad (13)$$

Мощность потерь в обмотках равна

$$W_{об} = 2I_1^2 R_1, \quad (14)$$

учитывая, что для идеального трансформатора

$$S_{пр1} w_1 = S_{пр2} w_2 \quad (15)$$

$$I_1 w_1 = I_2 w_2, \quad (16)$$

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_2. \quad (17)$$

Соотношение (14) можно представить в виде

$$W_{об} = \frac{2I_1^2 \rho \ell_{вит} w_1 k_T}{S_{пр1}}, \quad (18)$$

где ρ – удельное электросопротивление провода ($\text{Ом} \cdot \text{м}$), для меди величина $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при температуре $+20^\circ\text{C}$. Площадь поперечного сечения провода первичной обмотки $S_{пр1}$ (m^2) вычисляются из соотношений

$$S_{пр1} = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad \text{или} \quad d_1 = \sqrt{\frac{4S_{пр1}}{\pi}}, \quad (19)$$

где d_1 – диаметр провода первичной обмотки (m). Величина k_T – коэффициент увеличения электросопротивления провода вследствие нагрева. Для меди при температуре окружающей среды $+20^\circ\text{C}$

$$k_T = 1 + 0,004 \cdot \Delta T. \quad (20)$$

Величина k_d – коэффициент увеличения сопротивления провода вследствие скин-эффекта, равный отношению сопротивления

провода на переменном токе к сопротивлению провода на постоянном токе $k_d = R_{ac}/R_{dc}$ при одинаковых действующих значениях переменного и постоянного токов. Для синусоидального тока частотой f (Гц) в медном проводе круглого сечения диаметром d (m) коэффициент k_d можно найти из рис. 3. Среднюю длину одного витка провода обмотки $\ell_{вит}$ (m) определяют по длине окружности диаметром равным диагонали контейнера магнитопровода

$$\ell_{вит} = \pi \sqrt{\frac{(D'_H - D'_B)^2}{2} + (h')^2}, \quad (21)$$

где D'_H – наружный диаметр контейнера (m), D'_B – внутренний диаметр контейнера (m), h' – высота контейнера (m).

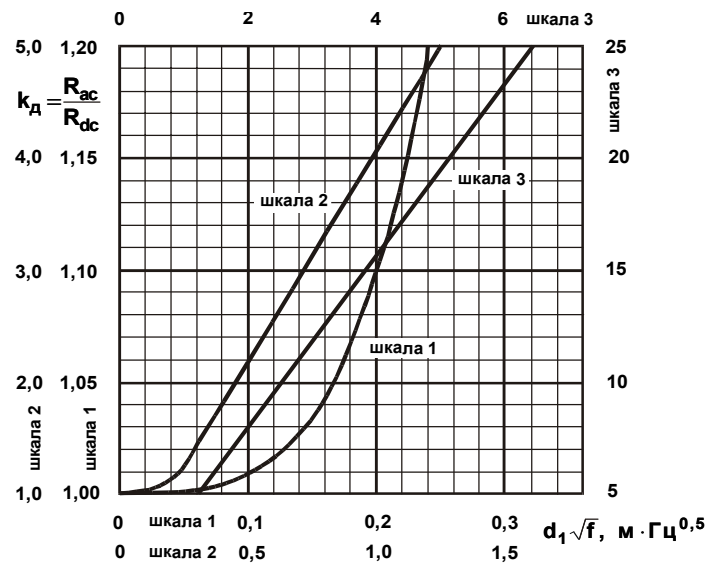


Рис. 3. Зависимость коэффициента увеличения потерь в проводе k_d от величины $d_1 \sqrt{f}$.

В расчетах будем использовать условие оптимального режима работы трансформатора

$$W_M = W_{об}. \quad (22)$$

При этом соотношение (11) принимает вид

$$2PV\gamma = \alpha \Delta T S_T. \quad (23)$$

Из уравнения (23) после подстановки в него удельных магнитных потерь P из формулы (13) находим максимальную магнитную индукцию B_m , при которой перегрев трансформатора составит ΔT

$$B_m = \left(\frac{\alpha \Delta T S_T}{2\gamma V r f^p} \right)^{\frac{1}{s}}. \quad (24)$$

Если при расчете по формуле (24) величина B_m получается больше допустимой максимальной магнитной индукции в материале магнитопровода, то в расчете используется эта допустимая величина индукции. При этом температура перегрева трансформатора будет ниже заданной в расчете величины перегрева ΔT .

Из условия равенства мощности потерь в магнитопроводе и в обмотках (22) после подстановки максимальной магнитной индукции B_m из формулы (24), числа витков w_1 из формулы (7) и после переноса всех геометрических параметров трансформатора в левую часть равенства получаем

$$\frac{SS_T}{\ell_{\text{ВИТ}}} \left(\frac{S_T}{V} \right)^{\frac{1}{s}} = \frac{4W_T J_1 \rho k_d k_T}{\sqrt{2\pi\alpha\Delta T}} \left(\frac{2r\gamma}{\alpha\Delta T f^{s-p}} \right)^{\frac{1}{s}}. \quad (25)$$

Это соотношение позволяет однозначно найти габариты магнитопровода при условии, что максимальная магнитная индукция в магнитопроводе не превышает предельно допустимой величины для материала магнитопровода.

Параметр G

$$G = \frac{SS_T}{\ell_{\text{ВИТ}}} \left(\frac{S_T}{V} \right)^{\frac{1}{s}} \quad (26)$$

называется габаритным параметром силового трансформатора. Для кольцевого магнитопровода

$$S = k_3 \frac{D_H - D_B}{2} h, \quad (27)$$

$$V = S \ell_{\text{CP}}, \quad (28)$$

$$\ell_{\text{CP}} = \pi \frac{D_H + D_B}{2}, \quad (29)$$

$$S_T = k \ell_{\text{CP}} (D_H - D_B + 2h), \quad (30)$$

где D_H – наружный диаметр магнитопровода (м), D_B – внутренний диаметр магнитопровода (м), h – высота магнитопровода (м), ℓ_{CP} – средняя длина магнитного пути магнитопровода (м), k_3 – коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, k – коэффициент увеличения площади поверхности трансформатора по сравнению с площадью поверхности магнитопровода. Для магнитопровода в защитном контейнере можно принять $k = 2$.

Приведенные выше формулы (7), (8), (13), (24) и (25) относятся к синусоидальной форме первичного напряжения u_1 . На практике форма первичного напряжения часто имеет вид, представленный на рис. 3. Для такой формы напряжения из (5) получаем

$$U_{m1} t_n = 2 B_m S w_1, \quad (31)$$

$$U_1 = 4 \sqrt{q} B_m S f w_1, \quad (32)$$

где

$$U_1 = \frac{U_{m1}}{\sqrt{q}}$$

действующее значение напряжения, $q = T_n / 2 \cdot t_n$ – скважность импульса, $f = 1/T_n$ – частота.

Удельные магнитные потери можно вычислить путем разложения магнитной индукции в ряд Фурье и суммирования потерь по гармоникам

$$P = \gamma_H f^p B_{m1}^s, \quad (33)$$

где B_{m1} – первая гармоника магнитной индукции, которая вычисляется по формуле

$$B_{m1} = \frac{4B_m}{\pi} \sin \frac{\pi t_n}{T_n}. \quad (34)$$

Коэффициент увеличения потерь вследствие несинусоидальности магнитной индукции γ_H находят из рис. 4. Для данной формы кривой напряжения вместо формул (24) и (25) имеем

$$B_m = \frac{\pi}{4 \sin \frac{\pi t_n}{T_n}} \left(\frac{\alpha \Delta T S_T}{2 \gamma_H \gamma V r f^p} \right)^{\frac{1}{s}}, \quad (35)$$

$$G = \frac{4W_T J_1 \rho k_d k_T \sin \frac{\pi t_n}{T_n}}{\pi \sqrt{q} \alpha \Delta T} \left(\frac{2 \gamma_H r \gamma}{\alpha \Delta T f^{s-p}} \right)^{\frac{1}{s}}. \quad (36)$$

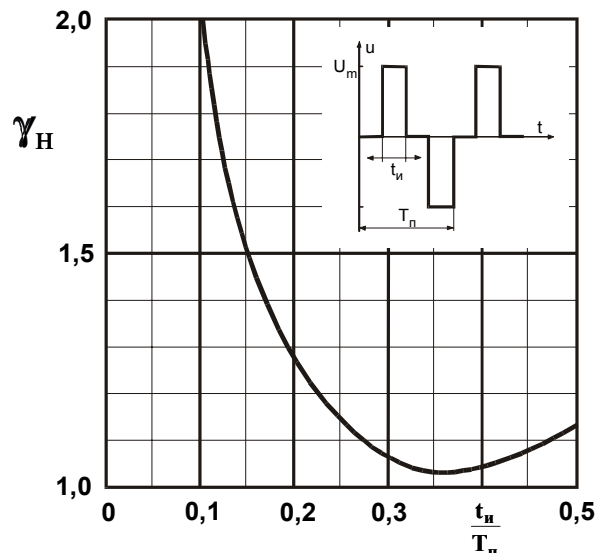


Рис. 4. Коэффициент увеличения потерь вследствие несинусоидальности магнитной индукции γ_H .

Для расчета силового трансформатора необходимо задать:

- мгновенное напряжение на первичной обмотке $u_1 = u_1(t)$, $\delta\text{1 } \text{á}\text{ñ}\text{ò}\text{ù } \text{=}\text{á}\text{ñ}\text{ò}\text{1}\text{ò}\text{ò } \text{è } \text{ò}\text{1}\text{ò}\text{1}\text{ò } \text{è}\text{ð}\text{è}\text{à}\text{1}\text{é } \text{1}\text{á}\text{1}\text{ò}\text{y}\text{æ}\text{á}\text{1}\text{è}\text{y}$;
- действующее значение тока в первичной обмотке I_1 ;
- действующее значение напряжение на вторичной обмотке U_2 ;
- температура перегрева трансформатора ΔT .

В результате расчета выбирают материал магнитопровода и его размеры, находят число витков и диаметр провода первичной и вторичной обмоток.

В качестве примера используем магнитопроводы ГАММАМЕТ 414 в защитных контейнерах. В табл. 1 приведены удельные магнитные потери, а в табл. 2 – геометрические параметры магнитопроводов. Характеристики

медных проводов представлены в табл. 3.

Оценку магнитопровода можно провести, используя формулу для мощности трансформатора (10). Для первой оценки обычно принимают плотность тока в первичной обмотке

$$J_1 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}, \quad (37)$$

а величину коэффициента заполнения окна магнитопровода проводом первичной обмотки $k_{м1} = 0,1$. Величину B_m выбирают из личного опыта с учетом частоты. Затем из табл. 2 подбирают магнитопровод с габаритным параметром $S \cdot S_{ок}$ соответствующим мощности трансформатора W_T . После выбора типоразмера магнитопровода проверяют температуру перегрева трансформатора, используя формулы для мощности потерь W_m и $W_{об}$.

Таблица 1.

Удельные магнитные потери P (Вт/кг) в магнитопроводах ГАММАМЕТ 414

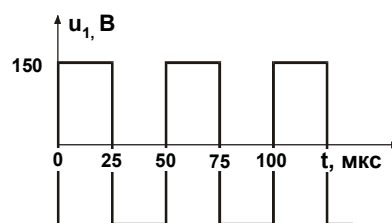
Класс	Область частоты f (Гц) и максимальной магнитной индукции B_m (Тл)	
	$f < 3000$	$0,2 \leq B_m \leq 1,0$
1	$0,00039 \cdot f^{1,2} B_m^{1,8}$	$7,5 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} B_m^2$
2	$0,00031 \cdot f^{1,2} B_m^{1,8}$	$5,5 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} B_m^2$
3	$0,00021 \cdot f^{1,2} B_m^{1,8}$	$4,3 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} B_m^2$

Порядок расчета силового трансформатора следующий. После выбора материала магнитопровода становятся известны все данные для расчета по формулам (25) или (36), кроме J_1 и k_d . В большинстве случаев для первой оценки можно принять условие (37), из которого находим площадь поперечного сечения $S_{пр1}$ и диаметр провода первичной обмотки d_1 . Из рис. 3 для известного $d_1 \sqrt{f}$ определяют соответствующее значение k_d . Для заданных значений $W_T, f, \Delta T, J_1$ по формулам (25) или (36) в зависимости от формы напряжения первичной обмотки

u_1 рассчитывают габаритный параметр G . Затем из табл. 2 для соответствующего интервала частот выбирают типоразмер магнитопровода с подходящей величиной габаритного параметра. Далее из формулы (24) или (35) находят величину максимальной магнитной индукции B_m , используя значения S_T и V из табл. 2 для выбранного типоразмера. Затем из формулы (7) или (32) находят число витков первичной обмотки w_1 , а из формулы (8) – число витков вторичной обмотки w_2 . Площадь поперечного сечения провода вторичной обмотки $S_{пр2}$ определяют из уравнения (15). Если рассчитанный габаритный параметр меньше табличного значения, то можно провести дополнительную оптимизацию трансформатора, например, за счет уменьшения сечения провода обмоток.

Пример расчета

На первичную обмотку подается напряжение прямоугольной формы: $U_1 = 150 \text{ В}, f = 20000 \text{ Гц}, W_T = 100 \text{ Вт}$. На вторичной обмотке – постоянное напряжение $U_2 = 9 \text{ В}$. Температура перегрева трансформатора $\Delta T \leq 25^\circ \text{C}$.



1). Выбор материала магнитопровода. В качестве материала магнитопровода используем ГАММАМЕТ 414 в защитном контейнере с уровнем магнитных свойств 2 класса.

2). Выбор типоразмера магнитопровода. При расчете габаритного параметра по формуле (35) воспользуемся следующими численными значениями: $W_T = 100 \text{ Вт}, J_1 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}, \rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, из рис. 2 для $d_1 \sqrt{f} = 0,08$ получаем $k_d \approx 1$ (учитывая $I_1 = W_T / U_1 = 100 / 150 = 0,67 \text{ А}, S_{пр1} = I_1 / J_1 = 0,67 / 2,5 \cdot 10^6$

Таблица 2.

Геометрические параметры магнитопроводов ГАММАМЕТ в защитных контейнерах

Номер п/п	Типоразмер	$\ell_{ср} \cdot 10^2$ (м)	$S \cdot 10^4$ (м ²)*	$V \cdot 10^6$ (м ³)*	$\ell_{вит} \cdot 10^2$ (м ²)	$S_T \cdot 10^4$ (м ²)	$S_{ок} \cdot 10^4$ (м ²)	$(SS_{ок}) \cdot 10^8$ (м ⁴)	$G \cdot 10^{4*}$	
									$f < 3 \text{ кГц}$	$3 \leq f \leq 200 \text{ кГц}$
1	ОЛ 14/20-10	5,3	0,21	1,11	4,4	27,6	1,54	0,32	1,01	0,66
2	ОЛ 15/25-10	6,3	0,35	2,21	5,0	37,8	1,77	0,62	1,65	1,09
3	ОЛ 20/32-10	8,2	0,45	3,44	5,0	52,5	3,14	1,32	2,59	1,72
4	ОЛ 28/45-10	11,5	0,60	6,9	6,4	85,1	6,16	3,70	4,16	2,80
5	ОЛ 40/64-20	16,3	1,68	27,4	9,7	209	12,57	21,1	14,5	10,0
6	ОЛ 40/64-30	16,3	2,52	41,4	12,6	274	12,57	31,7	20,2	14,1
7	ОЛ 130/175-20	47,9	3,15	151	11,7	814	132,7	418	72,2	50,9
8	ОЛ 140/200-35	53,4	7,35	392	16,9	1388	153,9	1131	157	113,6

* с учетом коэффициента заполнения $k_3 = 0,7$.

** габаритный параметр силового трансформатора с магнитопроводом ГМ 414.

Таблица 3.

Характеристики медного провода круглого сечения

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²	Масса 1 км, кг	Сопротивление 1 км, Ом	Длина 1 Ом, м
0,05	0,00196	0,0175	8920	0,112
0,06	0,00283	0,0252	6180	0,162
0,07	0,00385	0,0342	4540	0,220
0,08	0,00503	0,0448	3475	0,287
0,09	0,00636	0,0567	2750	0,364
0,10	0,00785	0,0700	2230	0,448
0,11	0,00950	0,0847	1850	0,541
0,12	0,01131	0,101	1550	0,645
0,13	0,01327	0,118	1320	0,757
0,14	0,01539	0,137	1140	0,877
0,15	0,01767	0,157	993	1,01
0,16	0,02011	0,179	873	1,15
0,17	0,0227	0,202	773	1,3
0,18	0,0255	0,227	686	1,45
0,19	0,0284	0,253	616	1,65
0,20	0,0314	0,279	557	1,79
0,21	0,0346	0,308	507	1,98
0,23	0,0416	0,369	423	2,36
0,25	0,0491	0,436	356	2,81
0,27	0,0573	0,509	307	3,22
0,29	0,0661	0,587	265	3,77
0,31	0,0755	0,671	233	4,30
0,33	0,0855	0,760	205	4,88
0,35	0,0962	0,855	182	5,49
0,38	0,113	1,01	155	6,45
0,41	0,132	1,17	133	7,52
0,44	0,152	1,35	115	8,70
0,47	0,174	1,54	101	9,90
0,49	0,189	1,68	93,1	10,7
0,51	0,204	1,82	86,0	11,6
0,55	0,238	2,11	73,7	13,5
0,59	0,273	2,43	64,3	15,5
0,64	0,322	2,86	54,5	18,3
0,69	0,374	3,32	46,9	21,3
0,74	0,430	3,82	40,8	24,5
0,80	0,503	4,47	34,9	28,6
0,86	0,581	5,16	30,2	33,1
0,93	0,679	6,04	25,9	38,6
1,00	0,785	6,98	22,4	44,6
1,08	0,916	8,14	19,2	52,1
1,16	1,057	9,40	16,61	60,2
1,25	1,23	10,91	14,33	69,8
1,35	1,43	12,73	12,28	81,4
1,45	1,65	14,7	10,62	94,2
1,56	1,91	17,0	9,18	109
1,68	2,22	19,7	7,90	127
1,81	2,57	22,9	6,83	146
1,95	2,99	26,5	5,88	170
2,10	3,46	30,8	5,07	197
2,26	4,01	35,7	4,88	205
2,44	4,68	41,6	3,75	266
2,63	5,43	48,3	3,23	310
2,83	6,29	55,9	2,79	358
3,05	7,31	65,0	2,40	416
3,28	8,45	75,1	2,08	480
3,53	9,79	87,0	1,79	558
3,80	11,34	100,8	1,55	645
4,10	13,20	117,4	1,31	764
4,50	15,90	141,4	1,10	905

$= 0,268 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $d_1 = (4 \cdot 0,268 \cdot 10^{-6} / \pi)^{0,5} = 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_1 \sqrt{f} = 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot 20000^{0,5} = 0,08 \text{ м} \cdot \text{Гц}^{0,5}$, $k_T = 1 + 0,004 \cdot 25 = 1,1$, $\alpha = 12 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $\Delta T = 25 \text{ К}$, $t_H = 25 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $T_H = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $t_H / T_H = 0,5$, $\sin \pi t_H / T_H = 1$, $q = 1$, $\gamma = 7400 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_H = 1,13$ (из рис. 3 для $t_H / T_H = 0,5$), $r = 5,5 \cdot 10^{-6}$, $s-p = 2-1,7 = 0,3$ (из табл. 1 при $f \geq 3 \text{ кГц}$ для 2 класса).

$$G = \frac{4 \cdot 100 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 1,1 \left(\frac{2 \cdot 1,13 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7400}{12 \cdot 25 \cdot 20000^{0,3}} \right)^{\frac{1}{2}}}{\pi \cdot 12 \cdot 25} = 0,79 \cdot 10^{-4}$$

табл. 2 для интервала частот 3–200 кГц выбираем магнитопровод с ближайшей большей величиной габаритного параметра G . Магнитопровод ОЛ 15/25-10 имеет $G = 1,09 \cdot 10^{-4}$.

3). Определение максимальной магнитной индукции B_m из формулы (35). Для ОЛ 15/25-10 из табл. 2 используем $S_T = 37,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и $V = 2,21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

$$B_m = \frac{\pi}{4} \left(\frac{12 \cdot 25 \cdot 37,8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,13 \cdot 7400 \cdot 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20000^{1,7}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,41 \text{ Тл}$$

4). Определение числа витков первичной обмотки w_1 из формулы (32). Величину $S = 0,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ берем из табл. 2

$$w_1 = \frac{150}{4 \cdot 1 \cdot 0,41 \cdot 20000 \cdot 0,35 \cdot 10^{-4}} = 131$$

5). Определение числа витков вторичной обмотки w_2 из формулы (6).

$$w_2 = \frac{9 \cdot 131}{150} \approx 8$$

6). Возможность оптимизации. Поскольку рассчитанный габаритный параметр меньше, чем у магнитопровода ОЛ 15/25-10, то есть возможность оптимизировать трансформатор. Оценим распределение потерь в рассчитанном трансформаторе. Из формулы (11) находим мощность потерь, излучаемую поверхностью трансформатора при $\Delta T = 25^\circ \text{C}$

$$W_M + W_{об} = 12 \cdot 25 \cdot 37,8 \cdot 10^{-4} = 1,13 \text{ Вт}$$

Из формул (33) и (34) получаем

$$B_{m1} = \frac{4}{\pi} \cdot 0,41 = 0,522 \text{ Тл}$$

$$W_M = PIV = 1,13 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20000^{1,7} \cdot 0,522^2 \cdot 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot 7400 = 0,57 \text{ Вт}$$

Из формулы (18), для $\ell_{вит} = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ из табл. 2, находим мощность потерь в обмотках

$$W_{об} = \frac{2 \cdot 0,67^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 131 \cdot 1 \cdot 1,1}{0,268 \cdot 10^{-6}} = 0,41$$

Полученная величина $W_M + W_{об} = 0,57 + 0,41 = 0,98 \text{ Вт}$ меньше допустимой величины 1,13 Вт при заданной температуре перегрева трансформатора $\Delta T = 25^\circ \text{C}$. Следовательно, можно уменьшить сечение провода, увеличивая при этом $W_{об}$ до 0,57 Вт.

7). Уточнение диаметра провода первичной обмотки d_1 . Из формулы (18) получаем

$$S_{пр1} = \frac{2I_1^2 \rho \ell_{вит} w_1 k_d k_T}{W_{об}} =$$

$$\frac{2 \cdot 0,67^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 5,0 \cdot 10^{-2} \cdot 131 \cdot 1 \cdot 1,1}{0,57} = 0,193 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

или диаметр провода

$$d_1 = \left(\frac{4 \cdot 0,193 \cdot 10^{-6}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

8). Определение диаметра провода вторичной обмотки d_2 . Из формулы (15) находим

$$S_{\text{пр}2} = \frac{S_{\text{пр}1} w_1}{w_2} = \frac{0,193 \cdot 10^{-6} \cdot 131}{8} = 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

или

$$d_2 = \left(\frac{4 \cdot 3,16 \cdot 10^{-6}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,01 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Можно использовать жгут из трех проводов сечением

$$S_{\text{пр}} = 3,16 \cdot 10^{-6} / 3 = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

или диаметром провода $d_2 = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Материал подготовил Ю.Н.Стародубцев

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.С. Русин, И.Я. Гликман и А.Н. Горский, Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры, М.: Радио и связь (1991).
2. Ю.Н. Стародубцев, Электричество 10(1995)63.
3. Ю.Н. Стародубцев, В.И. Кейлин, В.Я. Белозеров и В.А. Зеленин, ГАММАМЕТ ИНФОРМ 1(1995).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

u – мгновенное напряжение, В

U_m – максимальное напряжение, В

U – действующее значение напряжения, В

i – мгновенный ток, А

i_0 – ток намагничивания, А

I – действующее значение тока, А

J – плотность тока, А/м

R – активной сопротивление, Ом

ρ – удельное электросопротивление провода, Ом·м

L – индуктивность, Гн

L_0 – индуктивность намагничивания, Гн

M – коэффициент взаимной индуктивности, Гн

t – время, с

$t_{\text{и}}$ – длительность импульса, с

T_n – период переменного напряжения, с

q – скважность импульса

f – частота, Гц

B – мгновенная магнитная индукция, Тл

B_m – максимальная магнитная индукция, Тл

B_{m1} – первая гармоника магнитной индукции, Тл

P – удельные магнитные потери, Вт/кг

r, p, s – коэффициенты в формуле $P = rf^p B_m^s$

γ_n – коэффициент увеличения магнитных потерь вследствие несинусоидальности магнитной индукции

W_T – мощность трансформатора, Вт

W_M – мощность потерь в магнитопроводе, Вт

$W_{\text{об}}$ – мощность потерь в обмотках, Вт

G – габаритный параметр трансформатора

ΔT – температура перегрева трансформатора, К

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·град

w – число витков обмотки

n – коэффициент трансформации

S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²

S_T – площадь поверхности трансформатора, м²

$S_{\text{ок}}$ – площадь окна магнитопровода, м²

$S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения провода обмотки, м²

d – диаметр провода, м

V – объем магнитного материала магнитопровода, м³

γ – плотность магнитного материала, кг/м³

$l_{\text{ср}}$ – средняя длина магнитного пути магнитопровода, м

$l_{\text{вит}}$ – средняя длина одного витка провода обмотки, м

D_n – наружный диаметр магнитопровода, м

D_v – внутренний диаметр магнитопровода, м

h – высота магнитопровода, м

D'_n – наружный диаметр контейнера магнитопровода, м

D'_v – внутренний диаметр контейнера магнитопровода, м

h' – высота контейнера магнитопровода, м

k_d – коэффициент увеличения сопротивления провода вследствие скин-эффекта

k_T – коэффициент увеличения сопротивления провода вследствие нагрева

k_m – коэффициент заполнения окна магнитопровода проводом обмотки

k_3 – коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом

k – коэффициент увеличения площади поверхности трансформатора по отношению к площади поверхности магнитопровода

1 – нижний индекс в параметрах первичной обмотки

2 – нижний индекс в параметрах вторичной обмотки



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ГАММАМЕТ

Россия, 620219, Екатеринбург, ГСП-715, ул. Кирова 28, тел.: (3432) 42-83-79, 42-83-52, 58-12-98
Факс: (3432) 45-84-90, e-mail: gammamet@dialup.mplik.ru, http://gammamet.uralinfo.ru