ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 130 · 1964

К ВЫБОРУ ГЕОМЕТРИИ ДРОССЕЛЕЙ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ*)

Аспирант Е. И. ГОЛЬДШТЕЙН

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Оптимальной геометрией принято называть такое сочетание основных размеров изделия, при котором минимален один из его показателей — вес, объем или стоимость. Вопросы оптимальной геометрии трансформаторов малой мощности и сглаживающих дросселей рассмотрены в [1, 2, 3].

В [2] проведен полный анализ геометрии броневых дросселей для всех случаев расчета.

В [3] приведены результаты исследования как броневых, так и стержневых дросселей, но только при незаданном сопротивлении обмотки.

Во всех указанных работах используется графоаналитический метод исследования, что позволяет увидеть поведение исследуемой функции вблизи экстремальных значений, но затрудняет проведение анализа в общем виде, а изменение любого из начальных условий требует нового повторения большинства громоздких расчетов. Представляется целесообразным разработать достаточно универсальную программу и выполнить исследование оптимальной геометрии дросселей на электронной цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ).

2. В последние годы большое внимание уделяется нормализации трансформаторов малой мощности, магнитных усилителей и сглаживающих дросселей [1, 2, 3, 4, 5]. Однако в литературе известной автору, недостаточно освещен вопрос о критерии, по которому можно оценить выбранную геометрию ряда ленточных сердечников с точки зрения ее максимального приближения к условиям оптимальной геометрии, полученным для магнитопровода произвольной конфигурации [1, 2, 3]. Отсутствие достаточно строгого критерия затрудняет, в частности, оценку целесообразности использования для сглаживающих дросселей нормалей, разработанных применительно к трансформаторам малой мощности [3].

И, наконец, минимизируя указанный выше критерий, представляется возможным достаточно строго выбирать геометрию для нормализованного ряда сердечников.

---

*) Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора И. Д. Кутявина.

Ограничимся рассмотрением только дросселей с ленточными сердечниками, геометрия которых не связана с требованиями «безотходной» штамповки, при медном обмоточном проводе, для двух основных случаев расчета:

а) при неучете температурного режима (случай 1);

б) при учете температурного режима, но при незаданном сопротивлении обмотки (случай 2).

1. ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ПРИ МАГНИТОПРОВОДЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Геометрия дросселя полностью характеризуется безразмерными параметрами x, y и z:

$$x = \frac{b}{a}; \qquad y = \frac{c}{a}; \qquad z = \frac{h}{a}. \tag{1}$$

(Условные обозначения приведены в конце статьи).

При анализе будет представлять интерес один из следующих показателей дросселя любой конструкции:

а) суммарный объем сердечника и обмотки;

$$V = a^3\,(k_{VC} + k_{VO})\,; \tag{2}$$

б) натуральный вес активных материалов;

$$G = a^3\,(K_{VC}\,\gamma_C\,K_C + K_{VO}\,\gamma_O\,K_O)\,; \tag{3}$$

в) стоимость активных материалов;

$$Ц = a^3\,(K_{VC}\,\gamma_C\,K_C\,\alpha_C + K_{VO}\,\gamma_O\,K_O\,\alpha_O)\,; \tag{4}$$

г) габаритный объем дросселя;

$$V_Г = 2\,a^3\,K_{VГ}\,. \tag{5}$$

Выражения для коэффициентов K_{VC}, K_{VO}, $K_{VГ}$ приведены в таблице 1. Для удобства дальнейшего анализа введем обобщенную функцию (Ф) объема, веса и стоимости:

$$\Phi = a^3\,(K_{VC}\,\beta + K_{VO})\,, \tag{6}$$

где коэффициент приведения β характеризует вид анализа:

$$\beta_V = 1, \quad \beta_G = \frac{\gamma_C\,K_C}{\gamma_O\,K_O}\,; \quad \beta_Ц = \frac{\gamma_C\,K_C\,\alpha_C}{\gamma_O\,K_O\,\alpha_O}\,. \tag{7}$$

Базовый размер «а» определяется по формулам, аналогичным выражениям (5·1) и (5·4) из [2]:

а) для случая I:

$$a^3 = \left(\frac{N_I}{n_Г}\right)^{0,6}; \quad N_I = \frac{L^2\,I^2{}_O\,\rho}{R\,B^2{}_O\,K^2{}_C\,K_C}\,. \tag{8}$$

б) для случая II:

$$a^3 = \left(\frac{N_{II}}{n_Г\,K_{охл}}\right)^{0,429}; \quad N_{II} = \frac{(L\,I_O{}^2)^2\,\rho_Г}{2\,B^2{}_O\,K^2{}_C\,K_O\,\sigma\,\tau}\,. \tag{9}$$

Значение коэффициентов $n_Г$ и $K_{ОХЛ}$ приведены в таблице 1.

Ограничимся рассмотрением только дросселей с ленточными сердечниками, геометрия которых не связана с требованиями «безотходной» штамповки, при медном обмоточном проводе, для двух основных случаев расчета:

а) при неучете температурного режима (случай 1);

б) при учете температурного режима, но при незаданном сопротивлении обмотки (случай 2).

1. ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ПРИ МАГНИТОПРОВОДЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Геометрия дросселя полностью характеризуется безразмерными параметрами x, y и z :

$$x = \frac{b}{a}\ ; \qquad y = \frac{c}{a}\ ; \qquad z = \frac{h}{a}\ . \tag{1}$$

(Условные обозначения приведены в конце статьи).

При анализе будет представлять интерес один из следующих показателей дросселя любой конструкции:

а) суммарный объем сердечника и обмотки;

$$V = a^3\,(k_{VC} + k_{VO})\ ; \tag{2}$$

б) натуральный вес активных материалов;

$$G = a^3\,(K_{VC}\,\gamma_C\,K_C + K_{VO}\,\gamma_O\,K_O)\ ; \tag{3}$$

в) стоимость активных материалов;

$$Ц = a^3\,(K_{VC}\,\gamma_C\,K_C\,\alpha_C + K_{VO}\,\gamma_O\,K_O\,\alpha_O)\ ; \tag{4}$$

г) габаритный объем дросселя;

$$V_Г = 2\,a^3\,K_{VГ}\ . \tag{5}$$

Выражения для коэффициентов K_{VC}, K_{VO}, $K_{VГ}$ приведены в таблице 1. Для удобства дальнейшего анализа введем обобщенную функцию (Ф) объема, веса и стоимости:

$$Ф = a^3\,(K_{VC}\,\beta + K_{VO})\ , \tag{6}$$

где коэффициент приведения β характеризует вид анализа:

$$\beta_V = 1, \quad \beta_G = \frac{\gamma_C\,K_C}{\gamma_O\,K_O}\ ; \quad \beta_Ц = \frac{\gamma_C\,K_C\,\alpha_C}{\gamma_O\,K_O\,\alpha_O}\ . \tag{7}$$

Базовый размер «а» определяется по формулам, аналогичным выражениям (5·1) и (5·4) из [2]:

а) для случая I :

$$a^3 = \left(\frac{N_I}{n_Г}\right)^{0,6}\ ; \quad N_I = \frac{L^2\,I^2{}_O\,\rho}{R\,B^2{}_O\,K^2{}_C\,K_C}\ . \tag{8}$$

б) для случая II:

$$a^3 = \left(\frac{N_{II}}{n_Г\,K_{охл}}\right)^{0,429}\ ; \quad N_{II} = \frac{(L\,I_O{}^2)^2\,\rho_Г}{2\,B^2{}_O\,K^2{}_C\,K_O\,\sigma\,\tau}\ . \tag{9}$$

Значение коэффициентов $n_Г$ и $K_{ОХЛ}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициент	Броневой	Стержневой: с одной катушкой	Стержневой: с двумя катушками
K_{VC}	$x(1{,}57+2z+2y)$	$x(3{,}14+2z+2y)$	$x(3{,}14+2z+2y)$
K_{VO}	$yz(2+2x+3{,}14y)$	$yz(2+2x+3{,}14y)$	$yz(2+2x+1{,}57y)$
$K_{V\Gamma}$	$(1+y)(1+z)(x+2y)$	$(1+y)(2+z)(x+2y)$	$(1+y)(2+z)(x+y)$
n_Γ	$\dfrac{x^2yz}{2+2x+3{,}14y}$	$\dfrac{x^2yz}{2+2x+3{,}14y}$	$\dfrac{x^2yz}{2+2x+1{,}57y}$
$K_{ОХЛ}$	$3{,}14yz+z+2y+3{,}14y^2$	$3{,}14yz+z+2y+3{,}14y^2+xy+0{,}5xz$	$3{,}14yz+2z+2y+1{,}57y^2+xy+xz$

Необходимо отметить, что мы, как и в [2], учитываем только поверхность охлаждения собственно обмотки; неучет охлаждения дросселя за счет отвода тепла через сердечник приведет к ошибке в сторону недоиспользования дросселя по нагреву, тогда как учет поверхности охлаждения сердечника по [3] может привести к недопустимому перегреву, т. к. фактически тепловой контакт между сердечником и обмоткой не идеален, а коэффициенты теплоотдачи с катушки и сердечника не равны (ср. [1] стр. 151 и [3], стр. 114).

Принимая величины N_I и N_{II} постоянными, приходим к задаче определения условий минимума выражений для удельных показателей:

а) для случая I:

$$\Phi' = (n_\Gamma)^{-0,6}\,(K_{VC}\,\beta + K_{VO}); \tag{10}$$

$$V'_\Gamma = (n_\Gamma)^{-0,6}\,K_{V\Gamma}. \tag{11}$$

б) для случая II:

$$\Phi' = (n_\Gamma\,K_{ОХЛ})^{-0,429}\,(K_{VC}\,\beta + K_{VO}); \tag{12}$$

$$V'_\Gamma = (n_\Gamma\,K_{ОХЛ})^{-0,429}\,K_{V\Gamma}. \tag{13}$$

Минимизация выражений (10)—(13) была выполнена на ЭЦВМ вычислительного центра СО АН СССР инженером А. М. Шериным при участии автора статьи. Исследование было проведено в области приемлемых конструктивных значений x, y и z:

$$0{,}5 \leqslant q \leqslant 2{,}6;\quad 0{,}5 \leqslant y \leqslant 2{,}6;\quad 1 \leqslant z \leqslant 5. \qquad 14)$$

При решении использованы следующие исходные данные:

$$\gamma_C = 7{,}65\ г/см^3;\quad \gamma_O = 8{,}8\ г/см^3;\quad K_C = 0{,}9;$$

для двухкатушечного стержневого дросселя

$$K_O = 0{,}3;\quad \frac{\alpha_C}{\alpha_O} = 0{,}33;\quad \beta_Ц = 0{,}86;\quad \beta_G = 2{,}6.$$

для однокатушечных дросселей

$$K_O = 0{,}34;\quad \frac{\alpha_C}{\alpha_O} = 0{,}374;\quad \beta_Ц = 0{,}86;\quad \beta_G = 2{,}3.$$

В таблице 2 приведены основные результаты анализа. Там же, для сопоставления, приведены данные из [2] и [3]. Необходимо иметь в виду, что в [3] учтена площадь охлаждения сердечника, а $\beta_Ц = 0{,}32$ (см. [3] стр. 110).

2. ВЫБОР КРИТЕРИЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ

При решении второй из поставленных выше задач будем считать известными:

1) аналитическое выражение оптимизируемой функции веса, объема, стоимости и т. д.;

$$\Phi_1 = f_1 (x_1 y,\ z,\ \beta). \tag{14}$$

2) минимальное значение оптимизируемой функции для ненормализованного магнитопровода произвольной конфигурации при определенном анализе

$$\Phi_{1\,\min} = \varphi (\beta). \tag{15}$$

Таблица 2.

Случай	Вид анализа	Броневой x	Броневой y	Броневой z	Броневой $\frac{V_C}{V_O}$	Стержневой, 1 катушка x	1 катушка y	1 катушка z	1 катушка $\frac{V_C}{V_O}$	Стержневой, 2 катушки x	2 катушки y	2 катушки z	2 катушки $\frac{V_C}{V_O}$
I	$\beta=0,86$	2,6 / 1,1	0,6 / 0,6	1,0 / 1,0	2,28 / 1,44	2,6 / 1,7	0,6 / 0,6	1,5 / 2,5	2,33 / 1,46	2,1 / 1,5	0,7 / 0,6	1,4 / 3,8	2,16 / 1,33
II	$Ц_{\min}$ из [3]	1÷2	0,5	1,0	—	1÷2	0,5	2,0	—	1÷2	0,5	2,0	—
I	$\beta=1$ / $V_{\min}$ из [2]	2,5 / 1,5÷2,5	0,6 / z=(2÷3)y	1,0	2,24 / 2÷3	2,5 / —	0,6 / —	1,6 / —	2,21 / —	2,0 / —	0,7 / —	1,5 / —	2,02 / —
II	$\beta=1$ / $V_{\min}$ из [2]	1,1 / 1,5÷2,5	0,7 / z=(2÷3)y	1,0	1,22 / 0,8÷1,25	1,6 / —	0,6 / —	2,9 / —	1,32 / —	1,4 / —	0,6 / —	4,2 / —	1,23 / —
I / II	$\beta=2,3$	2,2 / 1,1	0,7 / 1,0	1,4 / 1,4	1,5 / 0,68	2,5 / 2,0	0,8 / 1,2	2,1 / 2,9	1,4 / 0,67	2,1 / 1,2	1,0 / 0,9	2,1 / 5,0	1,2 / 0,68
I / II	$\beta=2,6$	2,2 / 1,1	0,7 / 1,0	1,5 / 1,6	1,46 / 0,63	2,4 / 2,1	0,8 / 1,3	2,2 / 3,0	1,34 / 0,62	2,2 / 1,2	1,1 / 1,0	2,2 / 5,0	1,09 / 0,61
II	$G_{\min}$ из [3]	1÷2	1	2,5	—	1÷2	0,5	4,0	—	1÷2	1,0	4,0	—
I	$V_{\Gamma\,\min}$	2,6 / 2,1	0,6 / 0,6	1,5 / 3,5	1,83 / 1,21	2,6 / 2,5	0,6 / 0,6	3,0 / 5,0	1,65 / 1,35	2,6 / 1,7	0,6 / 0,6	3,0 / 5,0	1,84 / 1,28
II	То же из[3]	1÷2	0,5	3,0	—	1÷2	0,5	4,0	—	1÷2	0,5	4,0	—

3) пределы изменения варьируемого, у рассматриваемого ряда, размера — толщины ленты или высоты окна; так, для сердечников с вариацией по высоте окна, из конструктивных соображений могут быть выбраны пределы:

$$z_1 \leqslant z \leqslant z_2. \tag{16}$$

Если функцию (15) рассматривать как аппроксимируемую, а функцию (14) — как аппроксимирующую, то, используя теорию приближения функции [6], критерий приближения $\Delta\Phi$ может быть записан следующим образом:

$$\Delta\Phi_1 = \int_{z_1}^{z_2} p(z)\,[\Phi_1 - \Phi_{1\,\min}]^S\, dz, \tag{17}$$

где S — показатель степенного приближения;

$p(z)$ — неотрицательная функция веса, характеризующая вероятность использования каждого из значений z в промежутке $[z_1, z_2]$.

В нашем случае с достаточной точностью может быть использовано приближение первой степени, т. к. для определенного вида анализа всегда соблюдается условие

$$[\Phi_1 - \Phi_{1\,min}] \geqslant 0 . \tag{18}$$

Принимая для упрощения, что все значения z равновероятны, получим с учетом (18):

$$\Delta\Phi_1 = \int\limits_{z_1}^{z_2} [\Phi_1 - \Phi_{1\,min}]\, dz . \tag{19}$$

Полученное выше выражение (19) позволяет оценить степень приближения выбранной геометрии к оптимальной по «интегральному» критерию $\Delta\Phi_1$. При идеальном приближении $\Delta\Phi_1 = 0$, практически всегда $\Delta\Phi_1 > 0$.

Минимизируя интегральный критерий, можно найти $x'_{опт}$ и $y'_{опт}$, при которых $\Delta\Phi_1$ минимально. Для определенного β:

$$\Phi_{1\,min} = const ; \quad \int\limits_{z}^{z_2} \Phi_{1\,min}\, dz = const \neq f(x, y) . \tag{20}$$

Поэтому для определения оптимальной (по определенному показателю) геометрии нормализованных сердечников достаточно минимизировать выражение (21)

$$\Delta\Phi'_1 = \int\limits_{z_1}^{z_2} \Phi_1\, dz . \tag{21}$$

При определении оптимальной геометрии по выражению (21) в большинстве случаев необходимо учесть еще и некоторые дополнительные условия, обусловленные заданным диапазоном изменения электрических параметров изделия (L, I_0, R), температурным режимом и т. п. Анализ таких условий позволяет установить дополнительную связь между искомыми параметрами, например,

$$x = \varphi(y) \quad \text{при} \quad z = const . \tag{22}$$

Решая (21) и (22) совместно, получим окончательно:

$$\Delta\Phi'_1 = \int\limits_{z_1}^{z_2} \Phi'_1\, dz , \tag{23}$$

где $\Phi'_1 = f'_1(y, z)$ при $\beta = const$.

3. ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ НОРМАЛИЗУЕМЫХ ДРОССЕЛЕЙ

Дополнительная связь по выражению (22) может быть получена из условия полного использования дросселя по тепловому режиму при максимальной электромагнитной нагрузке

$$a = \sqrt[5]{\frac{N_1}{n_Г}} = \sqrt[2]{\frac{N_{III}}{K_{охл}}} , \tag{24}$$

пределах $0,5 \leqslant y \leqslant 1,1$ хорошо аппроксимируются выражениями (28) (показаны пунктиром)

$$x_{БР} = 1,43\,y\,; \quad x_{1\,кат.} = 1,1\,y\,; \quad x_{2\,кат.} = 0,6 + y\,. \tag{28}$$

Минимизируя $\Delta \Phi'_1$ по (21) при $z_1 = 1$ и $z_2 = 5$, с учетом (10) и (28), были получены соответствующие уравнения, решения которых приведены в таблице 3. В этой же таблице приведены для сопоставления данные, полученные для уже упомянутой выше нормали при $x = 2$ и $y = 1,6$.

Таблица 3.

Дроссель	β	x' опт	y' опт	$\Delta \Phi'_1$	$\Delta \Phi''_1$ при $x=2$, $y=1,6$	$\frac{\Delta\Phi''_1}{\Delta\Phi'_2}$ %
Броневой	0,86	0,79	0,55	—	—	—
	2,61	1,14	0,80	—	—	—
Стержневой 1 катушка	0,86	0,67	0,61	192,1	215	112
	2,61	0,99	0,9	334,5	345,2	103
Стержневой 2 катушки	0,86	1,16	0,56	126,8	150,3	118
	2,61	1,63	1,03	256,8	262,3	102

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для рассмотренных расчетных случаев условия оптимальной геометрии однозначны и не зависят от заданных параметров дросселя, причем, как правило, условия минимального веса, габаритного объема и стоимости не совпадают.

2. Полученные результаты показывают принципиальную возможность строгого выбора геометрии нормализуемых сердечников из указанных выше соображений.

3. Анализ результатов исследования подтверждает вывод в [2, 5] о возможности использования для сглаживающих дросселей минимального веса ленточных магнитопроводов, разработанных для трансформаторов малой мощности. Можно полагать, что для сглаживающих дросселей минимальной стоимости целесообразна разработка отдельной нормали.

4. Предлагаемая методика может быть использована при выборе геометрии и других нормализуемых изделий, в том числе трансформаторов, магнитных усилителей, дросселей переменного тока.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a — базовый размер сердечника;
b — толщина сердечника;
c — ширина окна сердечника;
h — высота окна сердечника;
K_{VC} — коэффициент объема стали;
K_{VO} — коэффициент объема обмотки;
γ_C — удельный вес стали;
γ_O — удельный вес меди;
K_C — коэффициент заполнения сталью сердечника;
K_O — коэффициент заполнения окна обмоткой;
α_C — удельная стоимость стали;
α_O — удельная стоимость медного провода;

$K_{V\Gamma}$ — коэффициент габаритного объема дросселя;
n_{Γ} — коэффициент геометрии дросселя;
$K_{охл}$ — коэффициент поверхности охлаждения дросселя;
L — индуктивность дросселя в *гн*;
R — сопротивление дросселя при 20°С в омах;
I_0 — постоянная составляющая выпрямленного тока в *а*;
B_0 — постоянная составляющая индукции *вб/см*^{2};
ρ — удельное электрическое сопротивление при 20°С;
ρ_{Γ} — удельное электрическое сопротивление при нагреве;
σ — коэффициент теплоотдачи *вт/см*^{2}°С;
τ — перегрев дросселя в градусах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальян Р. Х., «Трансформаторы малой мощности». Судпромгиз 1961.
2. Бамдас А. М. и Савиновский Ю. А., «Дроссели фильтров радиоаппаратуры «Из. «Советское радио», 1962.
3. Белопольский И. И., Пикалова Л. Г., «Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности» ГЭИ, 1963.
4. Розенблат М. А., Седых О. А., Принципы построения рядов торроидальных сердечников для магнитных усилителей. «Стандартизация», № 6, 1958.
5. Каретникова Е. И., Пути унификации трансформаторов и дросселей МДНТП им. Дзержинского, сборник № 5, М. 1958.
6. Гончаров В. Л., Теория интерполирования и приближения функций, Физматгиз, 1954.