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

Том 149 1966

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ НОРМАЛИЗОВАННЫХ ЛЕНТОЧНЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ ДЛЯ СГЛАЖИВАЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ*)

Е. И. ГОЛЬДШТЕЙН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и сетей)

В работах автора [1, 2] сформулированы задачи исследования и предложен критерий для оценки приближения геометрии ряда (группы ряда) к условиям оптимальной геометрии сглаживающего дросселя (с. д.) произвольной конфигурации. Однако в [1] анализ выполнен аналитически и только для расчета на заданное падение напряжения (первый расчетный случай — I). В [2] приведены результаты исследования на ЭЦВМ, но не для всех технико-экономических показателей и только для расчета на заданный перегрев (второй расчетный случай — II).

В настоящей работе проведем исследование оптимальной геометрии нормализованных ленточных магнитопроводов по всем технико-экономическим показателям с. д. при разных принципах вариации размеров внутри группы ряда для расчетных случаев I и II.

Для исследования используем критерий приближения в виде [2]

$$\Delta M = \sum_{t_{\min}}^{t_{\max}} M(t), \tag{1}$$

при $t = t_{\min}, \quad t_1, t_2, , \dots t_{\max}$.

В выражении (1)

t — варьируемый параметр геометрии,

$M(t)$ — оптимизируемая функция. Для анализа по показателям веса (G), стоимости ($Ц$), объема активных материалов (V) и объема обмотки (V_0) используем обобщенную функцию [1]:

$$\Phi_{\rm I} = n_{\rm г}^{-0,6} (K_{v{\rm c}} \beta + K_{v0}). \tag{2}$$

$$\Phi_{\rm II} = (n_{\rm г} K_{\rm др})^{-(3/7)} \cdot (K_{v{\rm c}} \beta + K_{v0}). \tag{3}$$

При анализе по показателю габаритного объема ($V_{\rm г}$)

$$V_{\rm гI} = n_{\rm г}^{-0,6} K_{v{\rm г}} \tag{4}$$

$$V_{\rm гII} = (n_{\rm г} K_{\rm др})^{-(3/7)} \cdot K_{v{\rm г}}. \tag{5}$$

Коэффициенты $n_{\rm г}$, $K_{v{\rm c}}$, K_{v0} и $K_{v{\rm г}}$ определяются только конструкцией и геометрией с. д.; выражения для этих коэффициентов приведены в [1].

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

Коэффициент расчетной площади охлаждения ($K_{др}$) характеризует связь между полной поверхностью охлаждения ($S_{др}$) и базовым размером „а“:

$$K_{др} = \frac{S_{др}}{a^2}. \qquad (6)$$

В общем случае, в соответствии с соображениями, изложенными в другой работе автора [3],

$$K_{др} = K_{об} + \Theta K_{ос}. \qquad (7)$$

Расчетные выражения для коэффициентов охлаждения обмотки ($K_{об}$) и магнитопровода (сердечника) приведены в табл. 1

Таблица 1

	Броневой дроссель	Стержневой двухкатушечный дроссель
$K_{0Б}$	$3,14\ yz+z+2y+3,14y^2$	$3,14\ yz+2z+2y+1,57\ y^2+xy+xz$
K_{0C}	$2+z+2y+2xy+xz+3x$	$4+2y+xy+4x$

Коэффициент эффективности теплоотвода с сердечника (Θ) при анализе берем для двух предельных случаев

$$\Theta_1 = 0 \quad \text{и} \quad \Theta_2 = 1. \qquad (8)$$

Коэффициент приведения β определяется по выражениям из [3]:

$$\beta_{v_0} = 0; \quad \beta_v = 1; \quad \beta_G = \frac{\gamma_c K_c}{K_0 \gamma_0}; \quad \beta_ц = \frac{\gamma_c K_c \alpha_c}{\gamma_0 K_0 \alpha_0}. \qquad (9)$$

Для минимизации критерия приближения (1) была составлена специальная программа поиска (программист — М. Ф. Панихина). На печать выдавались базовые параметры геометрии (например, $x_б$ и $y_б$ или $x_б$ и $z_б$, или $y_б$ и $z_б$), обеспечивающие минимум соответствующего критерия при принятых значениях варьируемого параметра (z, y или x).

В табл. 2 приведены основные сведения о программе поиска, в частности значения варьируемого параметра, диапазоны поиска базовых параметров и т. п.

Таблица 2

	Вариация параметром		
	x	y	z
Значения варьируемого параметра	1; 1,25; 1,6; 2,0	0,5; 0,65; 0,8; 1,0	2; 2, 5; 3, 2; 4; 5
Число значений варьируемого параметра n	4	4	5
Диапазон поисков по x	—	1÷2,0	1÷2,0
Диапазон поисков по y	0,5÷2,7	—	0,5÷2,7
Диапазон поисков по z	2÷5	2÷5	—
Базовые параметры ряда ШЛ	$y=1$, $z=2,5$	—	—
Базовые параметры ряда ПЛ	—	—	$y=1,6$ $x=2$.

Кроме того, в табл. 2 приведены значения параметров геометрии нормализованных магнитопроводов типа ШЛ и ПЛ трансформаторов малой мощности.

Основные результаты исследования базовой геометрии приведены в таблицах 3—6. В табл. 3—5 сделано сравнение критериев приближения, подсчитанных при оптимальной базовой геометрии ($\Delta M_{\text{опт}}$) и при параметрах геометрии ныне действующих нормалей ($\Delta M_{\text{шл}}$ и $\Delta M_{\text{пл}}$), причем за 100% приняты значения при оптимальной геометрии.

Таблица 3

С. д.	Оптимизируемый показатель		Вариация параметром						Примечание
			x			z			
			$y_Б$	$z_Б$	$\frac{\Delta M_{\text{шл}}}{\Delta M_{\text{опт}}}$ %	$x_Б$	$y_Б$	$\frac{\Delta M_{\text{пл}}}{\Delta M_{\text{опт}}}$ %	
Броневой	V_0	$\beta=0$	0,5	2,0	206	2,0	0,5	290	Первый расчетный случай
	Ц	$\beta=0,5$	0,5	2,0	156	2,0	0,5	200	
		$\beta=0,86$	0,5	2,0	139	2,0	0,5	172	
	V	$\beta=1$	0,5	2,0	135	2,0	0,5	164	
	G	$\beta=2,3$	0,6	2,0	113	2,0	0,6	128	
		$\beta=2,6$	0,6	2,0	111	2,0	0,7	124	
	$V_Г$	—	0,5	2,0	145	2,0	0,5	187	
Стержневой	V_0	$\beta=0$	0,5	2,0	178	2,0	0,5	229	
	Ц	$\beta=0,5$	0,5	2,0	128	2,0	0,5	150	
		$\beta=0,86$	0,5	2,0	114	2,0	0,6	129	
	V	$\beta=1,0$	0,6	2,0	111	2,0	0,6	124	
	G	$\beta=2,3$	0,7	2,0	101,5	2,0	1,0	110	
		$\beta=2,6$	0,7	2,1	≈ 100	2,0	1,0	105	
	$V_Г$	—	0,5	3,0	121	2,0	0,5	143	

Таблица 4

С. д.	Оптимизируемый показатель		Вариация параметром						Примечание
			x			z			
			$y_Б$	$z_Б$	$\frac{\Delta M_{\text{шл}}}{\Delta_{\text{опт}}}$ %	$x_Б$	$y_Б$	$\frac{\Delta M_{\text{пл}}}{\Delta M_{\text{опт}}}$ %	
Броневой	V_0	$\beta=0$	0,5	2,0	164	2,0	0,5	206	Второй расчетный случай $\Theta=0$
	Ц	$\beta=0,5$	0,5	2,0	123	1,5	0,5	142	
		$\beta=0,86$	0,6	2,0	111	1,2	0,5	127	
	V	$\beta=1$	0,6	2,0	108	1,1	0,5	122	
	G	$\beta=2,3$	1,0	2,0	101	1,1	0,8	105	
		$\beta=2,6$	1,1	2,0	100,5	1,1	0,9	103	
	$V_Г$	—	0,5	3,8	119	1,8	0,5	132	
Стержневой	V_0	$\beta=0$	0,5	2,0	159	2,0	0,5	202	
	Ц	$\beta=0,5$	0,5	2,8	115	1,7	0,5	132	
		$\beta=0,86$	0,5	4,3	106	1,2	0,5	116	
	V	$\beta=1$	0,6	3,7	104	1,3	0,6	111	
	G	$\beta=2,3$	1,0	5,0	103	1,3	1,1	101,5	
		$\beta=2,6$	1,1	5,0	104	1,3	1,2	101	
	$V_Г$	—	0,5	5,0	126	1,6	0,5	124	

Таблица 5

С. д.	Оптимизируемый показатель		Вариация параметром x: $y_Б$	x: $z_Б$	x: $\frac{\Delta M_{шл}}{\Delta M_{опт}}$ %	Вариация параметром z: $z_Б$	z: $y_Б$	z: $\frac{\Delta M_{пл}}{\Delta M_{опт}}$ %	Примечание
Броневой	V_0	$\beta=0$	0,5	2,0	198	2,0	0,5	253	Второй расчетный случай $\Theta=1$
	Ц	$\beta=0,5$	0,5	2,0	143	2,0	0,5	174	
	Ц	$\beta=0,86$	0,5	2,0	128	2,0	0,5	149	
	V	$\beta=1$	0,5	2,0	124	2,0	0,5	142	
	G	$\beta=2,3$	0,7	2,0	106	1,8	0,7	112	
	G	$\beta=2,6$	0,7	2,0	104	1,9	0,8	110	
	$V_Г$	—	0,5	2,0	134	2,0	0,5	163	
Стержневой	V_0	$\beta=0$	0,5	2,0	172	2,0	0,5	214	
	Ц	$\beta=0,5$	0,5	2,0	124	2,0	0,5	141	
	Ц	$\beta=0,86$	0,5	2,0	111	1,5	0,5	121	
	V	$\beta=1$	0,6	2,0	107,5	1,6	0,6	117	
	G	$\beta=2,3$	1,0	2,0	$\approx$100	1,6	1,0	102	
	G	$\beta=2,6$	1,1	2,1	$\approx$100	1,5	1,1	101,5	
	$V_Г$	—	0,5	4,7	120	2,0	0,5	133	

Таблица 6

С. д.	Оптимизируемый показатель		Расчетный случай I: $x_Б$	I: $z_Б$	II; $\Theta=0$: $x_Б$	II; $\Theta=0$: $z_Б$	II; $\Theta=1$: $x_Б$	II; $\Theta=1$: $z_Б$	Примечание
Броневой	V_0	$\beta=0$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	Вариация параметром y
	Ц	$\beta=0,5$	2,0	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0	
	Ц	$\beta=0,86$	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0	
	V	$\beta=1$	2,0	2,0	1,4	2,0	2,0	2,0	
	G	$\beta=2,3$	2,0	2,0	1,0	2,0	1,8	2,0	
	G	$\beta=2,6$	2,0	2,0	1,0	2,1	1,7	2,0	
	$V_Г$	—	2,0	2,0	2,0	3,1	2,0	2,0	
Стержневой	V_0	$\beta=0$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
	Ц	$\beta=0,5$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
	Ц	$\beta=0,86$	2,0	2,0	1,7	3,4	2,0	2,0	
	V	$\beta=1$	2,0	2,0	1,6	3,7	2,0	2,0	
	G	$\beta=2,3$	1,7	2,1	1,0	5,0	1,0	2,1	
	G	$\beta=2,6$	1,6	2,2	1,0	5,0	1,0	2,3	
	$V_Г$	—	2,0	3,0	2,0	5,0	2,0	4,3	

Определенный интерес представляет сравнение между собой показателей нормализованных магнитопроводов одинаковой конструкции при вариации разными параметрами геометрии. Для такого сравнения используем средний критерий приближения (на один типоразмер):

$$\Delta M_{\text{ср}} = \frac{\Delta M}{n}, \tag{10}$$

где n — число значений варьируемого параметра.

Сразу оговоримся, что результаты такого сравнения нельзя рассматривать как абсолютные, так как в свою очередь величина критерия приближения зависит от выбранного диапазона изменения варьируемого параметра и числа типоразмеров в этом диапазоне. Поэтому полученные

Таблица 7

С. д.	Оптимизируемый показатель		Вариация параметром x	y	z	Примечание
			$\frac{\Delta M_{\text{ср}}}{M_{\text{опт}}}$ %			
Броневой	V_0	$\beta=0$	170	197	175	Первый расчетный случай
	$Ц$	$\beta=0,5$	123	131	128	
		$\beta=0,86$	113	117	119	
	V	$\beta=1$	111	114	117	
	G	$\beta=2,3$	105	104	109,5	
		$\beta=2,6$	104	103	108,5	
	$V_{\text{г}}$	—	119	121	113	
	V_0	$\beta=0$	132,5	152	138	Второй расчетный случай, $\theta=0$
	$Ц$	$\beta=0,5$	106,5	112	110	
		$\beta=0,86$	104	106	106	
	V	$\beta=1$	103,5	104,5	104,5	
	G	$\beta=2,3$	101,5	102	102	
		$\beta=2,6$	101,5	102,5	102	
	$V_{\text{г}}$	—	102	104	101	
	V_0	$\beta=0$	156	189	167	Второй расчетный случай, $\theta=1$
	$Ц$	$\beta=0,5$	120	128	124	
		$\beta=0,86$	111	115	115,5	
	V	$\beta=1$	108	111	114	
	G	$\beta=2,3$	102,5	103	106	
		$\beta=2,6$	102	103	106	
	$V_{\text{г}}$	—	115	117	109	

ниже результаты позволяют сравнивать вполне определенные серии с. д. с выбранными заранее, а значит, может быть и не оптимальными пределами изменения варьируемого параметра. Однако и такое сравнение представляет интерес, тем более что в известной автору литературе этот вопрос почти не освещен. В табл. 7 и 8 приведены результаты сравнения разных принципов построения нормалей. За 100% приняты значения соответствующих показателей ($M_{опт}$) с. д. произвольной конфигурации, подсчитанных при оптимальных параметрах геометрии (см. [3]).

Таблица 8

С. д.	Оптимизируемый показатель		Вариация параметром x	y	z	Примечание	
			$\frac{\Delta M_{ср}}{M_{опт}}$ %				
Стержневой	V_0	$\beta=0$	159	178	170	Первый расчетный случай	
	Ц	$\beta=0,5$	109	110	113		
		$\beta=0,86$	104	103	108		
	V	$\beta=1$	103,5	102	107		
	G	$\beta=2,3$	102,5	103	103		
		$\lambda=2,6$	102,5	103,5	103		
	$V_Г$	—	105,5	105,5	102		
	V_0	$\beta=0$	133	149	133	Второй расчетный случай	$\theta=0$
	Ц	$\beta=0,5$	101	104,5	100,5		
		$\beta=0,86$	100,5	102,5	101		
	V	$\beta=1$	101	102	101		
	G	$\beta=2,3$	101	102	102		
		$\beta=2,6$	101	102	102,5		
	$V_Г$	—	105,5	104	109		
	V_0	$\beta=0$	161	182	168		$\theta=1$
	Ц	$\beta=0,5$	107	111	112		
		$\beta=0,86$	102,5	104	107		
	V	$\beta=1$	101,5	102	106		
	G	$\beta=2,3$	101	102	102		
		$\beta=2,6$	101	102,5	101		
	$V_Г$	—	101,5	104,5	101,5		

Выводы

1. Для стержневых с. д. минимального веса во всех случаях расчета и для броневых с. д. минимального веса, проектируемых на заданный перегрев, с успехом могут быть использованы магнитопроводы оптимальных трансформаторов малой мощности (ряды ШЛ и ПЛ).

2. Для с. д. с вариацией по высоте окна условия оптимальности по расходу меди и габаритному объему практически совпадают ($x_б = 2,0$; $y_б = 0,5$) и позволяют, по сравнению с геометрией минимального веса стержневых трансформаторов и дросселей ($x_б = 2,0$; $y_б = 1,6$) снизить показатели на $(100 \div 200)$ % по расходу меди и на $(20 \div 90)$ % по габаритному объему.

3. Показатель габаритного объема ряда ШЛ-магнитопроводов на $(20 \div 40)$ % выше соответствующего показателя при оптимальной базовой геометрии ряда с вариацией по ширине ленты; применение специ-

альной геометрии для с. д. с минимальным расходом меди ($z_б = 2{,}0$; $y_б = 0{,}5$) обеспечивает снижение показателя на $(60 \div 90)\,\%$ по сравнению с рядом ШЛ-магнитопроводов.

4. При разработке нормалей на с. д. минимальной стоимости могут быть использованы приведенные в таблицах параметры оптимальной геометрии для соответствующего расчетного случая.

5. Показатели нормализованных магнитопроводов, как и следовало ожидать, превышают соответствующие показатели при произвольной конфигурации и оптимальной геометрии; особенно велико такое превышение для показателей объема обмотки из-за выбранного нами диапазона изменения $x (x \leqslant 2{,}0$, а не $x \leqslant 2{,}7$, как для сердечников произвольной геометрии).

6. Для исследованных случаев по большинству показателей имеет преимущества принцип вариации по ширине ленты. Для с. д. минимального веса, проектируемых на заданное падение напряжения, применение принципа вариации по ширине окна позволяет незначительно снизить соответствующий показатель; для с. д. минимальных габаритов предпочтительнее вариация по высоте окна.

7. Для стержневых с. д. минимального веса возможно использование любого из рассмотренных принципов вариации; для броневых с. д. минимального веса вариации по ширине окна и ленты практически равноценны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Гольдштейн. К выбору геометрии дросселей сглаживающих фильтров. Известия ТПИ, том 130, 1964.
2. Е. И. Гольдштейн. К выбору геометрии нормализованных ленточных сердечников для дросселей и трансформаторов. Стандартизация, 1964.
3. Е. Е. Гольдштейн. Универсальные зависимости для выбора оптимальных параметров геометрии сглаживающих дросселей на ненормализованных сердечниках (настоящий сборник).

6 Заказ 7769.