

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБМОТОК В ТРЕХФАЗНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НА 110 кВ

И. Д. КУТЯВИН, Г. В. ДЕЛЬ

Вопрос применения алюминия в трансформаторостроении дискуссировался на страницах отечественной и зарубежной печати многократно. Тем не менее, до сих пор нет единого мнения об этом, несмотря на опыт, накопленный при производстве и эксплуатации трансформаторов с алюминиевыми обмотками. Особенно это относится к трансформаторам с напряжением высокой стороны 110 кВ.

В данной статье приводятся некоторые результаты исследования геометрии «алюминиевых» трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов мощностью  $2,5 \div 40$  Мва. Исследование проведено при переменном коэффициенте заполнения площади обмоток проводниковым материалом, аналогично [1]. Основные расчетные формулы также взяты из [1]. Как нами показано ранее, число независимых переменных для силовых трансформаторов малой мощности равно трем. За независимые переменные приняты: радиальная ширина катушки обмотки ВН —  $x_1$ , осевая ее высота (без изоляции) —  $y_1$  и число витков в катушке обмотки НН —  $\omega_{к2}$ .

В случае применения на низкой стороне обмотки винтового типа (трансформаторы средней мощности) с определенным числом заходов можно принять  $\omega_{к2} = \text{const}$ . Тогда число независимых переменных сократится до двух ( $x_1, y_1$ ).

Все расчеты были проведены на быстродействующей ЭЦВМ с применением метода слепого поиска.

Сопоставление расчетных данных алюминиевых и медных трансформаторов показало подобие характера поведения расчетных затрат и некоторых других параметров по принятым независимым переменным. Наблюдается только количественная разница в значениях минимальных затрат и оптимальных величин. Например, согласно [1] оптимальное значение удельной тепловой нагрузки  $\sigma$  для трансформаторов  $5,6 \div 15$  Мва колеблется в пределах  $0,1 - 0,15$  вт/см<sup>2</sup> (принимая  $\sigma_1 = \sigma_2$ ). При одних и тех же постоянных (исключая разные физические постоянные меди и алюминия) для алюминиевых трансформаторов значение  $\sigma_{\text{опт}}$  находится в пределах  $0,07 \div 0,1$  вт/см<sup>2</sup>, то есть ниже, чем для медных.

Оптимальное значение индукции в стержне «алюминиевого» трансформатора остается таким же, как и для «медного».

Несколько иначе обстоит дело в отношении оптимального значения реактивной составляющей напряжения короткого замыкания. Расчеты дают меньшую величину  $u_{p \text{ опт.}}$  для трансформаторов с медными обмотками (с учетом затрат на компенсацию реактивных потерь короткого замыкания). Так, при стоимости компенсации 1 квара в 1,5 руб. имеем для «медного» —  $u_{p \text{ опт.}} = 0,065$ , а для «алюминиевого» соответственно — 0,08 (при мощности трансформаторов  $S = 10 \text{ Мва}$ ).

Подробнее остановимся на зависимости расчетных затрат от числа витков катушки вторичной обмотки, так как эта зависимость не была исследована в [1]. В табл. 1 приводится процентное изменение расчетных затрат от  $w_{к2}$  для трансформаторов разных мощностей.

Таблица 1

S, кВа	$w_{к2}$				
	$3/3_{\text{min}}$				
2500	7	10	13	16	19
	103	100,4	100	100,2	100,5
6300	3	5	7	9	11
	112,5	100,6	100	100,4	101,4
10000	2	3	5	7	9
	110	101,6	100	100,8	102,1
16000	1	2	3	5	7
	132	102,2	100	100,8	102,7

Характерной особенностью является пологая зависимость  $Z(w_{к2})$  в области минимума расчетных затрат и в сторону значений  $w_{к2} > w_{к2 \text{ опт.}}$ . При приближении же числа витков катушки обмотки  $НН$  к единице (что означает переход от обмотки непрерывного типа к винтовой) происходит резкое возрастание расчетных затрат. Это является свидетельством экономической невыгодности применения обычной винтовой обмотки для трансформаторов мощностью до 25 Мва, даже в случае использования алюминия.

Слабое изменение расчетных затрат от  $w_{к2}$  объясняется рис. 1, показывающим почти прямую пропорциональность между  $w_{к2}$  и осевым размером катушки  $НН-y_2$ . А согласно [1], изменение расчетных затрат от  $y_2$  (так же, как и от  $y_1$ ) носит очень слабый характер. Если учесть выражение для намагничивающей силы катушки вторичной обмотки [1]

$$I_2 w_{к2} = \frac{x_2 y_2 \Delta_2}{1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2}, \quad (1)$$

и принять (см. рис. 1)

$$y_2 \approx w_{к2}, \quad (2)$$

то получим постоянство выражения

$$\frac{x_2 \Delta_2}{I_2 (1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2)} = \text{const.} \quad (3)$$

для любых значений  $\omega_{к2}$ .

Выражение (3) свидетельствует примерно о гиперболической зависимости ширины катушки обмотки *НН* от плотности тока в ней, так как  $[(1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2) \approx \text{const}]$ . Но этот вывод относится только к обмоткам непрерывного типа.

Следует также отметить почти полную независимость плотности тока обмотки *ВН* от  $\omega_{к2}$ .

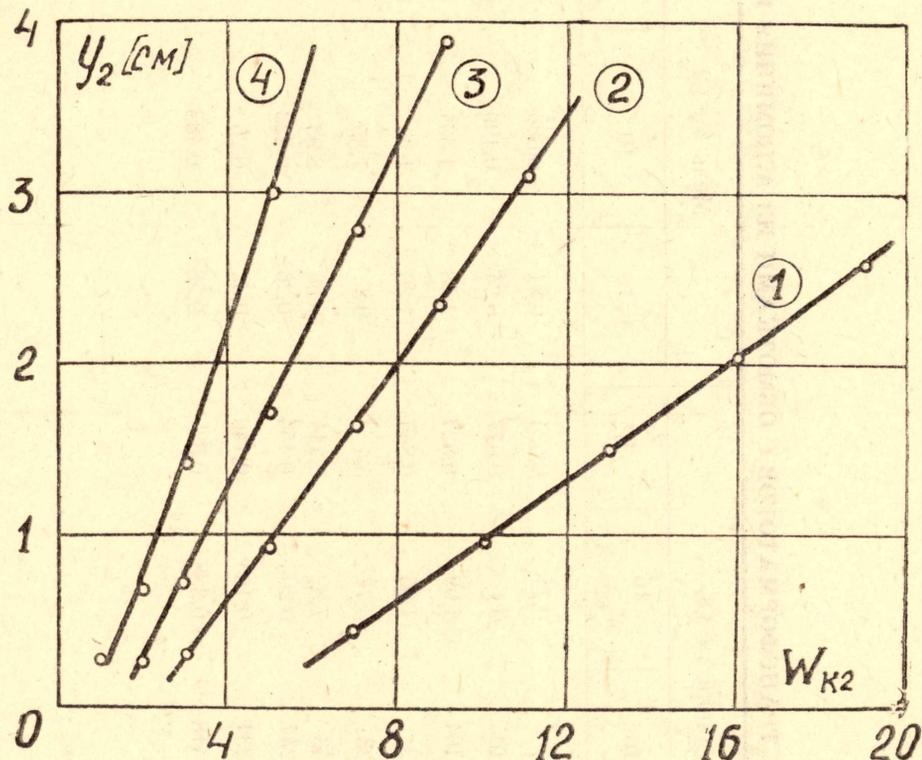


Рис. 1.

Наконец о технико-экономической оценке трансформаторов с алюминиевыми обмотками. В табл. 2 приведены удельные показатели «медных» и «алюминиевых» трансформаторов на 1 кВа мощности, рассчитанных нами:  $Q'_с$ ,  $Q'_м$ ,  $Q'_п$ , вес стали, обмотки и приведенный вес, отнесенные к 1 кВа мощности трансформатора;  $P'_с$ ,  $P'_м$  и  $\Sigma P'^*$  — потери в стали, обмотке и суммарные, отнесенные к 1 кВа;  $Z'_с$ ,  $Z'_м$  и  $Z'$  — затраты на сталь, обмотку и суммарные, отнесенные к 1 кВа.

Из этой таблицы вытекают следующие выводы. Вес, потери и затраты на сталь больше у «алюминиевых» трансформаторов (примерно на 10%). Вес обмоток и приведенный вес наоборот больше у «медных». Затраты на обмотки всегда меньше у «алюминиевых» трансформаторов. Суммарные расчетные затраты для трансформаторов с обмотками из алюминия меньше, чем с обмотками из меди в случаях малых мощностей. С ростом мощности наблюдается обратное: становятся дешевле в производстве и эксплуатации «медные трансформа-

Таблица 2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ОБМОТКАМИ ИЗ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ

№	Материал обмоток		Алюминий $\beta=3,8$				Медь $\beta=3,2$			Медь $\beta=2,9$		
	п. п.	S	Mва	6,3	10	16 ( $w_{к2=3}$ )	40	6,3	10	16	16 ( $w_{к2=2}$ )	40
1		$Q'_c$	кг/ква	0,905	0,765	0,71	0,534	0,81	0,696	0,61	0,64	0,499
2		$Q'_m$	"	0,159	0,105	0,1	0,077	0,24	0,199	0,159	0,209	0,164
3		$Q'_n$	"	1,51	1,164	1,09	0,827	1,58	1,334	1,12	1,246	0,975
4		$P'_c$	вт/ква	1,42	1,2	1,05	0,844	1,26	1,08	0,94	1,0	0,78
5		$P'_m$	"	7,82	8,23	6,77	5,4	9,3	7,85	6,96	6,05	4,5
6		$\Sigma P'$	"	9,24	9,43	7,82	6,244	10,56	8,93	7,9	7,05	5,28
7		$Z'_c$	руб./ква	0,293	0,247	0,203	0,154	0,26	0,223	0,19	0,177	0,138
8		$Z'_m$	"	0,262	0,231	0,185	0,146	0,32	0,26	0,21	0,197	0,15
9		$Z'_n$	"	0,555	0,478	0,388	0,3	0,58	0,483	0,4	0,374	0,288

торы». Правда, эта разница в расчетных затратах (для обоих случаев) колеблется в пределах  $\pm 5\%$ .

На рис. 2 показано изменение расчетных затрат в зависимости от ширины катушки первичной обмотки  $x_1$  для разных значений отношения  $\beta$  (стоимости 1 кг готовой обмотки к стоимости 1 кг магнитопровода) для трансформатора  $S = 10$  Мва. На основании этого рисунка можно сделать важный вывод о почти полной независимости оптимальных размеров трансформатора от величины  $\beta$  (для  $\beta = 2-5$  расхождение в значениях  $x_{1 \text{ опт}}$  составляет  $\sim 2,5\%$ ). С другой стороны, и сама величина расчетных затрат сравнительно слабо зависит

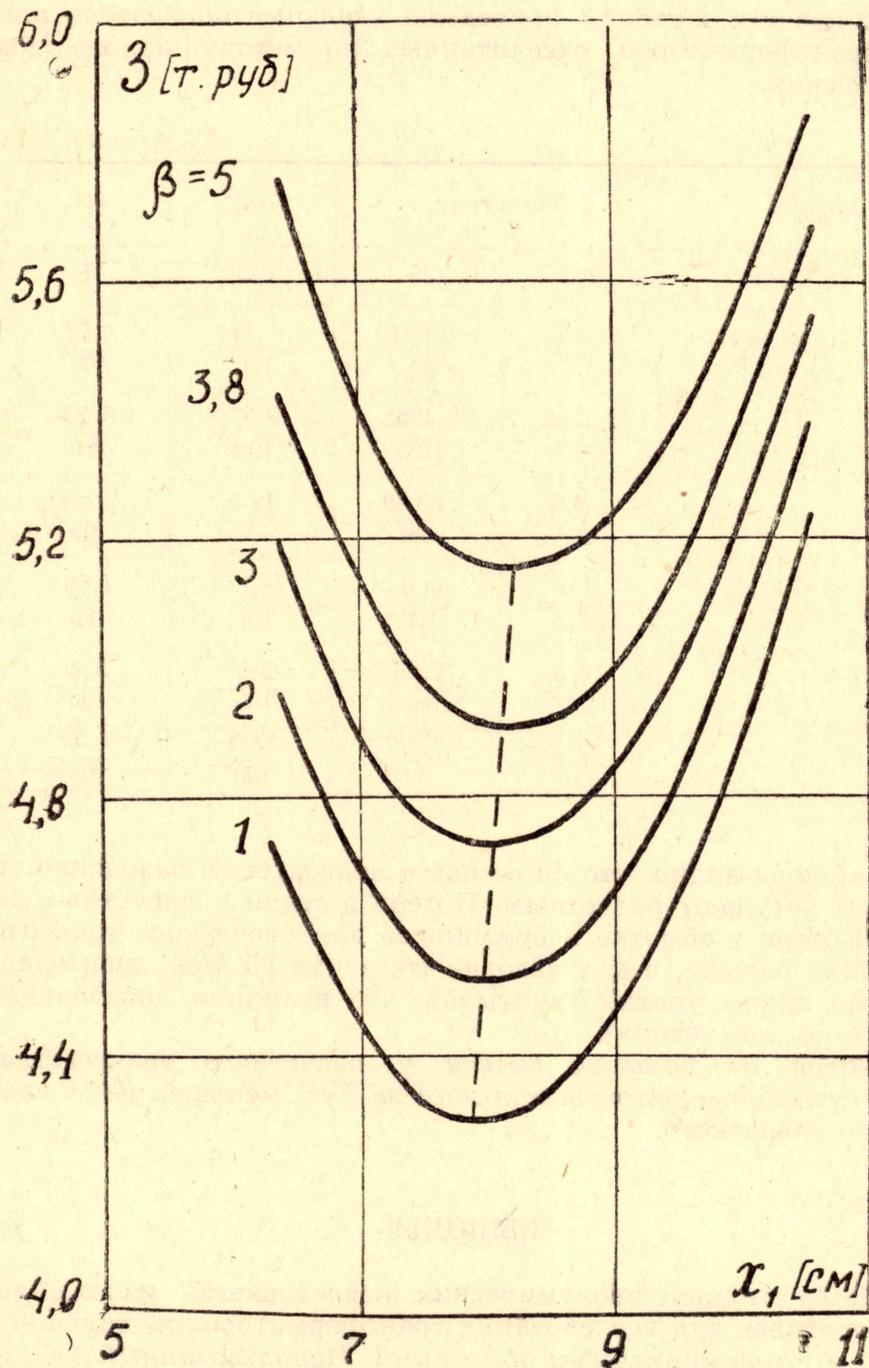


Рис. 2.

от  $\beta$  (при уменьшении  $\beta$  с 3,8 до 3 расчетные затраты упали всего на 3,8%).

Трансформаторы с алюминиевыми обмотками по сравнению с медными имеют более вытянутую в высоту и несколько уширенную геометрию. Увеличенная радиальная ширина катушек «алюминиевых» трансформаторов свидетельствует об их большей устойчивости против осевых сил при коротком замыкании.

Механические напряжения в обмотках от радиальных усилий при коротком замыкании за трансформатором  $S = 40 \text{ Мва}$  —  $\sigma_{p1} = 247 \text{ кг/см}^2$ , а  $\sigma_{p2} = 275 \text{ кг/см}^2$ , то есть меньше допустимой величины (считая  $[\sigma_p] = 300 \text{ кг/см}^2$ ).

В заключение в табл. 3 приведены удельные показатели алюминиевых трансформаторов, рассчитанных по методу, изложенному в [1], и заводских.

Таблица 3

Данные	Расчетные		[3]	[4]
$S, \text{ Мва}$	2,5	25	2,5	25
$Q'_c, \frac{\text{кг кВа}}{\%}$	$\frac{1,273}{72}$	$\frac{0,634}{88}$	$\frac{1,78}{100}$	$\frac{0,72}{100}$
$Q'_m, \text{ "}$	$\frac{0,1655}{45}$	$\frac{0,1065}{87,5}$	$\frac{0,37}{100}$	$\frac{0,22}{100}$
$Q'_n, \text{ "}$	$\frac{1,902}{60}$	$\frac{1,039}{88}$	$\frac{3,18}{100}$	$\frac{1,184}{100}$
$P'_c, \frac{\text{вт/кВа}}{\%}$	$\frac{2,0}{55,5}$	$\frac{1,0}{64}$	$\frac{3,6}{100}$	$\frac{1,56}{100}$
$P'_m, \text{ "}$	$\frac{13,5}{153}$	$\frac{5,83}{100,5}$	$\frac{8,8}{100}$	$\frac{5,8}{100}$
$\Sigma P', \text{ "}$	$\frac{15,5}{125}$	$\frac{6,83}{93}$	$\frac{12,4}{100}$	$\frac{7,36}{100}$

Из таблицы видно, что по весовым показателям заводские трансформаторы уступают расчетным. Потери в стали у расчетных также меньше. Потери в обмотке и суммарные для расчетного трансформатора 2,5 Мва больше, чем у заводского, а для 25 Мва, примерно, находятся на одном уровне (учитывая, что величина добавочных потерь нами не подсчитана).

Несмотря на большие потери у расчетного трансформатора 2,5 Мва, суммарные затраты для него на 19% меньше, чем у соответствующего заводского.

## ВЫВОДЫ

1. Метод технико-экономических исследований, изложенный в [1] и [2], пригоден для исследования трансформаторов не только с медными, но и с алюминиевыми обмотками. Использованный как метод проектирования для расчета «алюминиевых» трансформаторов, он также дает удовлетворительные результаты.

2. В качестве обмоточного материала для трансформаторов на 110 кВ, алюминий равноценен меди, даже без учета дефицита последней.

3. Удельная тепловая нагрузка «алюминиевых» трансформаторов меньше, чем у медных. Величина оптимальной индукции одинакова.

4. Положение минимума расчетных затрат почти не зависит от соотношения стоимости 1 кг обмотки и стали —  $\beta$ .

5. Характер поведения зависимостей различных параметров от одних и тех же независимых переменных для «алюминиевых» и «медных» трансформаторов идентичен.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дель Г. В., Краснов В. П. Техничко-экономические исследования оптимальных размеров силовых трансформаторов, «Известия ТПИ», том 132, 1965.
2. Кутявин И. Д., Дель Г. В., Краснов В. П. К технико-экономическому определению оптимальных размеров подстанционных трехфазных двухобмоточных трансформаторов большой мощности, «Известия ТПИ», том 130, 1964.
3. Сагалов М. И. Трансформаторы класса 110 кВ малой мощности и их применение для электрификации сельского хозяйства, Вестник электропромышленности, № 12, 1961.
4. Изготовление первого трансформатора серии 110 кВ новой конструкции.  
Rădulescu Costin, Toma Cheorghe, Năzdrăvan Ilie, Realizaren primului transformator din Serile la 110 kv după principil constructive noi, Comun tehn, electroput, 1963 (рум).