

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ
НА МИНИМУМ ПРИВЕДЕННОГО (К СТАЛИ) ВЕСА
И РАСЧЕТНЫХ ЗАТРАТ**

Л. И. ДЕЛЬ.

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических сетей и систем)

Ниже приводятся некоторые результаты исследования трансформаторов предельной мощности на минимум приведенного (к стали) веса активных материалов и минимум расчетных затрат, учитывающих расходы системы на приобретение, установку и эксплуатацию трансформатора, включая капзатраты на добавочную мощность, необходимую для покрытия потерь трансформатора в период максимума нагрузки.

Воспользуемся выражениями (2) ÷ (9) работы [3], формулой номинальной мощности трансформатора (1) [1] и определим высоту обмоток, см.

$$h = \frac{4p^2 S_c}{K_c \varphi (\delta')^2 u^2}, \quad (1)$$

где $u = \varphi \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4p}{\delta' \varphi} (2b + 3\delta_{12})} \right] = \varphi \cdot z,$ (2)

$$K_c = 4,44f \frac{\pi}{4} k_c \quad (3)$$

Найдем веса активных материалов.

Вес стали сердечника в кг:

$$Q_c = \gamma_c l_c q_c, \quad (4)$$

где γ_c — удельный вес стали, кг/см³;

l_c — длина стали сердечника, приведенная к площади сечения стержня;

$$l_c = (n+1)h + (n+1)d + 4nb + B, \quad (5)$$

$$B = 8l_n + 6\delta_{01} + 6\delta_{12}, \quad (6)$$

где l_n — изоляционное расстояние от обмоток до ярма, см;

n — число обмотанных стержней.

Вес проводникового материала обмоток трансформатора в кг

$$Q_m = 2\pi \gamma_m l_m q_m \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Приведенный к стали вес активных материалов (в кг)

$$Q_n = Q_c + \beta Q_m, \quad (8)$$

где β — коэффициент приведения, равный отношению удельных стоимостей обмоток и сердечника.

После замены переменных через независимые уравнение (7) примет вид

$$Q_n = \frac{M_1}{\varphi} + M_2 v^3 u^3 + M_3 v^2 u^2 + \frac{M_4 k_r (y + \delta)}{P \delta'}, \quad (9)$$

где

$$M_1 = \frac{(n + 1) \cdot S_c}{K_c} a_1, \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{(n + 1)}{8 v^3} a_1, \quad (11)$$

$$M_3 = \frac{4nb + B}{4p^2} a_1, \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{k_c \pi \gamma_c}{4}, \quad (13)$$

$$a_2 = 2n\beta\gamma_m \pi. \quad (14)$$

Аналитическое исследование трансформаторов на минимум приведенного веса в общем виде очень сложно, поэтому в данной статье приводятся некоторые результаты численного исследования трехфазных двухобмоточных трансформаторов предельной мощности класса напряжения 750 кВ.

В пунктах 6, 7, 8, 9 табл. 1 и 2 даны расчетные значения веса стали, проводникового материала и Q_n при различных значениях радиальной ширины и высоты меди элементарного проводника.

В табл. 1 представлена зависимость $Q_n = f(y)$ при $x = \text{const}$, а в табл. 2 зависимость $Q_n = f(x)$ при $y = \text{const}$, из которых следует, что с ростом x и y Q_n увеличивается.

При расчете этих таблиц приняты исходные данные:

$$\begin{aligned} S_c &= 200 \text{ Мва}; \quad b = 8 \text{ см}; \quad i = 0,01 \text{ см}; \quad \delta = 0,8 \text{ см}; \quad k_c = 0,9; \\ U_p &= 0,2; \quad \varepsilon = 0,3 \text{ вт/см}^2; \quad \rho = 2,14 \cdot 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}; \quad B = 17500 \text{ гс}; \\ k_R &= 0,95; \quad i = 50 \text{ гц}; \quad k_n = 0,78; \quad C = 0,92; \quad \delta_{01} = 5 \text{ см}; \quad \delta_{12} = 18 \text{ см}; \\ n &= 3; \quad \beta = 3,5; \quad l_n = 38; \quad \gamma_c = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3; \quad \gamma_m = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3. \end{aligned}$$

Кроме того, для табл. 1 $x = 0,14 \text{ см}$; для табл. 2 $y = 1,8 \text{ см}$.

Технико-экономические исследования оптимальных размеров трансформаторов следует производить путем минимизации суммарных расчетных затрат, составляющие которых упомянуты выше.

Выражение расчетных затрат представлено в виде

$$Z = (A_1 + DB^2) Q_c + (\beta A_2 + k_r \Delta^2 E) Q_m, \quad (15)$$

где A_1 , A_2 , D , E — постоянные. [2], равные $A_1 = 0,2356$; $A_2 = 0,185$; $E = 85,7 \cdot 10^{-7}$; $D = 29,9 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 1 показана зависимость $Z = f(x, y)$ при $x = 0,14 \text{ см}$ для различных значений мощностей на стержень.

На рис. 2 представлены зависимости $Z = f(x, y)$ при $y = 1,06 \text{ см}$ для $b = 7 \text{ см}$; $y = 1,0 \text{ см}$ для $b = 8 \text{ см}$; $y = 0,9 \text{ см}$ для $b = 9 \text{ см}$.

Значения мощностей и напряжения короткого замыкания взяты из табл. 1 [1] с соответствующими постоянными.

Из приведенных таблиц и графиков можно сделать следующие выводы:

1. При конструктивных значениях переменных x и y приведенный (к стали) вес активных материалов минимума не имеет.
2. Имеет место слабая зависимость расчетных затрат от величины y в пределах его конструктивных значений. Оптимальное значение осевой высоты катушки находится в пределах от 1,5 см до 3,5 см.
3. Осевые размеры элементарного проводника, соответствующие

Таблица 1

| п.п. | у | 0,6 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 2,7 | 3,0 | 3,3 | 3,6 | 3,9 |
|------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | k_r | 1,017 | 1,0284 | 1,033 | 1,039 | 1,044 | 1,048 | 1,052 | 1,055 | 1,058 | 1,060 | 1,062 | 1,064 |
| 2 | Δ | 614 | 486 | 449 | 407 | 378 | 357 | 338 | 324 | 312,5 | 302 | 293,5 | 288 |
| 3 | φ | 1966 | 2013 | 2005 | 1990 | 1960 | 1922 | 1895 | 1865 | 1840 | 1812 | 1790 | 1775 |
| 4 | d | 132 | 134,6 | 134 | 133,3 | 132 | 129,8 | 128,6 | 127 | 124,2 | 123,8 | 123 | 122 |
| 5 | h | 213 | 199,5 | 202 | 206 | 213,3 | 225 | 233 | 243 | 257 | 262,5 | 268,5 | 275 |
| 6 | Q_c | 190500 | 196200 | 194200 | 193300 | 190800 | 188000 | 187200 | 184600 | 183400 | 182000 | 180000 | 180000 |
| 7 | Q_M | 20100 | 24500 | 26700 | 29700 | 32600 | 35100 | 37300 | 39800 | 41800 | 43800 | 45800 | 47500 |
| 8 | βQ_M | 70500 | 85600 | 83900 | 104200 | 114000 | 112700 | 130600 | 139100 | 146400 | 153400 | 160200 | 166200 |
| 9 | Q_n | 261000 | 281800 | 288100 | 297500 | 304800 | 310700 | 317800 | 323700 | 329800 | 335400 | 340200 | 346200 |
| 10 | z_M | 78560 | 66870 | 64880 | 63200 | 62800 | 62900 | 62750 | 63560 | 64100 | 64700 | 65450 | 66700 |
| 11 | z_c | 62400 | 64300 | 63500 | 63300 | 62500 | 61500 | 61200 | 60400 | 60000 | 59500 | 58900 | 58900 |
| 12 | 3 | 140960 | 131170 | 128380 | 126500 | 125300 | 124400 | 123950 | 123960 | 124100 | 124200 | 124350 | 125600 |

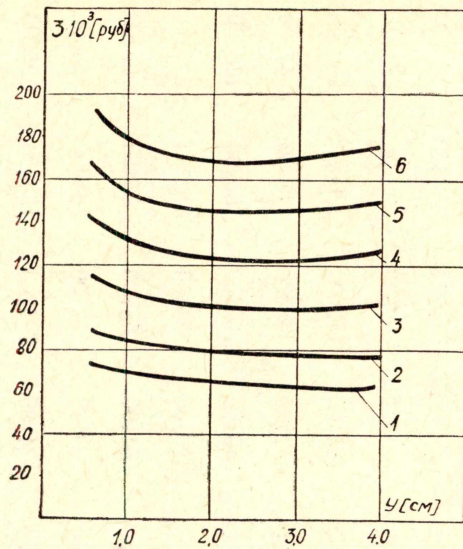


Рис. 1: 1— $S=70$ мва,
2— $S=100$ мва,
3— $S=150$ мва,
4— $S=200$ мва,
5— $S=250$ мва,
6— $S=300$ мва.

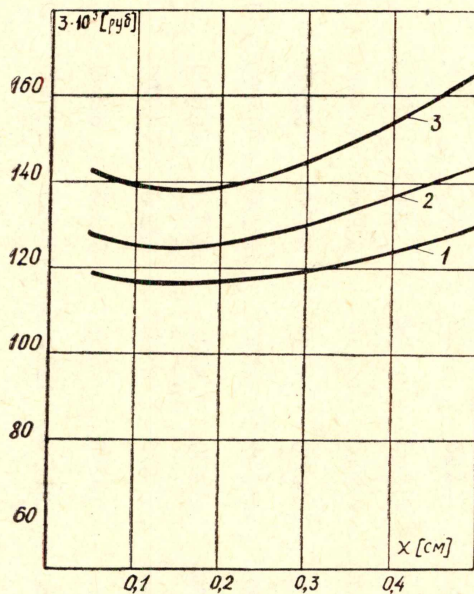


Рис. 2: 1— $b=7$ см,
2— $b=8$ см,
3— $b=9$ см.

минимуму расчетных затрат, с одной стороны, и максимуму мощности, с другой (при прочих равных условиях), почти не отличаются по величине (табл. 3).

Это позволяет использовать x_0 (оптимальное), определенное из (17) [1], и для нахождения оптимальных размеров трансформаторов, соответствующих минимуму затрат.

Таблица 2

| П. | x | 0,5 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 |
|----|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | k_T | 1,0045 | 1,022 | 1,052 | 1,096 | 1,15 | 1,22 | 1,30 |
| 2 | Δ | 409 | 388 | 377 | 366 | 356,5 | 345 | 333,5 |
| 3 | φ | 1896 | 1965 | 1968 | 1940 | 1905 | 1856 | 1803 |
| 4 | d | 128,5 | 132,2 | 132,6 | 131,2 | 130,3 | 126,6 | 124,6 |
| 5 | h | 233 | 211 | 210,5 | 217 | 225,5 | 244 | 261 |
| 6 | Q_c | 186500 | 190800 | 191100 | 189800 | 189500 | 184400 | 183000 |
| 7 | Q_M | 31100 | 31700 | 32600 | 33950 | 35700 | 37800 | 40300 |
| 8 | βQ_M | 109000 | 111000 | 114100 | 119000 | 124800 | 132000 | 141100 |
| 9 | Q_n | 295500 | 301800 | 305200 | 308800 | 314300 | 316400 | 324100 |
| 10 | Z_M | 64750 | 62080 | 62730 | 64700 | 67700 | 71350 | 76100 |
| 11 | Z_c | 61000 | 62500 | 62600 | 62100 | 62000 | 60450 | 59950 |
| 12 | 3 | 125750 | 124500 | 125330 | 126800 | 129700 | 131790 | 136050 |

Таблица 3.

| S^c (Mва) | x (см) (из расчета затрат рис. 2) | x (см) из табл. 1 (1) |
|-------------|---|--------------------------|
| 161,7 | 0,15 | 0,152 |
| 182 | 0,14 | 0,14 |
| 203 | 0,13 | 0,13 |

ЛИТЕРАТУРА

1. **И. Д. Кутявин, Л. И. Дель.** «О предельной мощности трансформатора». Изв. ТПИ, т. 172.
2. **И. Д. Кутявин.** «К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов». Изв. ТПИ, т. 130.
3. **И. Д. Кутявин, Л. И. Дель.** «Определение предельной мощности трансформаторов с учетом напряжения короткого замыкания».