

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ШАХТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В. А. ЗОРИН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Одним из важнейших направлений совершенствования электроснабжения горных участков угольных шахт в настоящее время является внедрение передвижных трансформаторных подстанций и трансформаторов во взрывобезопасном исполнении вместо стационарных трансформаторных подстанций с масляными трансформаторами типа ТМШ, что приводит к дальнейшему повышению производительности труда и улучшению технико-экономических характеристик деятельности шахт.

Опыт применения отечественных взрывобезопасных подстанций ТСШВП показывает, что при этом годовая экономия по участку средней мощности не менее 10—15 тыс. руб. только за счет ликвидации пожаробезопасных камер [1].

Однако вышесказанное не снимает с повестки дня вопроса о технико-экономическом подходе к выбору геометрических размеров трансформаторов шахтных передвижных взрывобезопасных подстанций, объем производства которых год от года все возрастает.

Отечественная промышленность выпускает два типа таких подстанций: ТКШВП — с заполнением кварцевым песком и изоляцией класса E; ТСШВП — с сухим воздушным трансформатором и кремний-органической изоляцией класса Н. В настоящей статье делается попытка применить методику технико-экономического выбора оптимальной геометрии силовых трансформаторов 1 и 2-го габаритов [2] к трансформаторам подстанций типа ТСШВП\*).

Формула для подсчета суммарных годовых расчетных затрат [2]:

$$Z = (A + DB^2 + Z_p \alpha_{рст}) Q_{ст} + [A + D \left(\frac{B}{K_я}\right)^2 + Z_p \alpha_{ря}] Q_я + \\ + (\beta A k_p + E \Delta_1^2) Q_{m1} + (\beta A + E \Delta_2^2) Q_{m2} = Z_{ст} + Z_я + Z_{m1} + Z_{m2}, \quad (1)$$

где

$Z_{ст}$  и  $Z_я$  — затраты, обусловленные наличием стали стержней и ярем трансформатора;

$Z_{m1}$  и  $Z_{m2}$  — затраты, обусловленные наличием меди обмоток ВН и НН трансформатора.

По аналогии с масляными трансформаторами можно заключить, что трансформатор будет спроектированным рационально, если найдена

\*) Работа проводится под руководством доктора технических наук И. Д. Кутявина.

такая совокупность значений переменных от варианта к варианту величин  $x_1, x_2, y_1, y_2, d, h$  (рис. 1.),  $\Delta_1, \Delta_2, \omega_k$ , при которой суммарные расчетные затраты (1) минимальны.

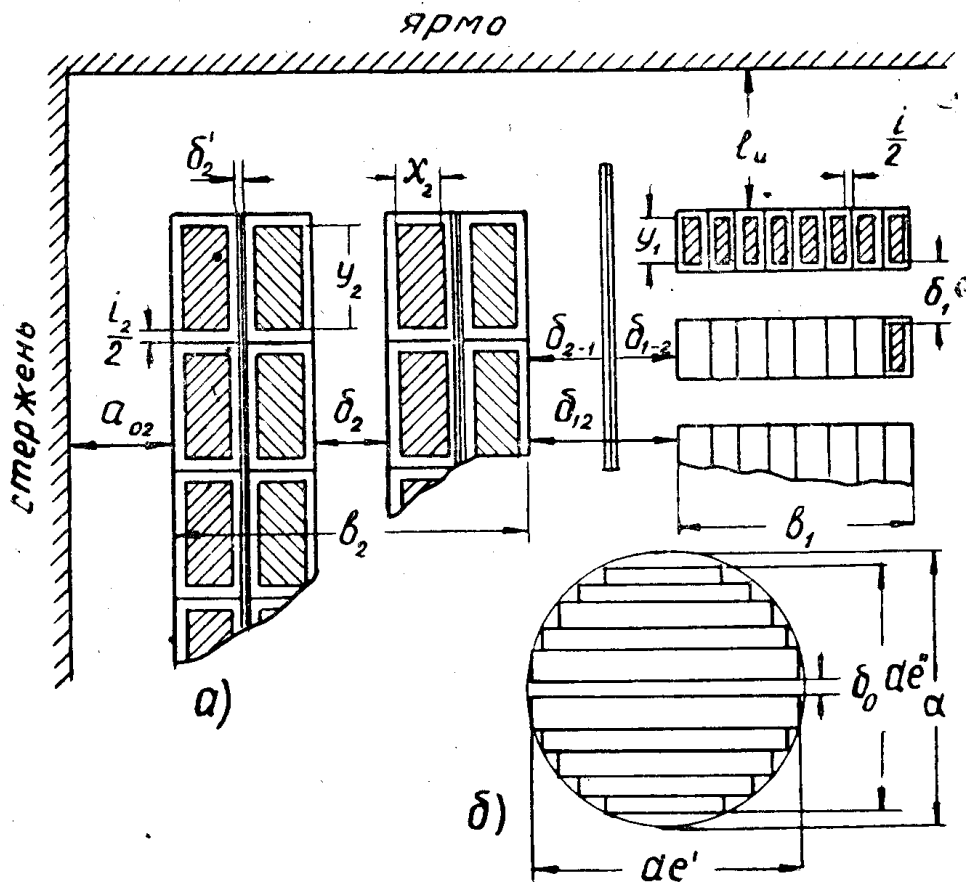


Рис. 1

*a* — эскиз осевого сечения фазы; *b* — эскиз сечения стержня трансформатора.

При тепловом расчете рассматриваемых трансформаторов, в отличие от масляных, учитывается взаимное тепловое влияние нагретых тел включением в число «физических ограничений» уравнений тепловых балансов обмоток и магнитопровода.

Методика теплового расчета, разработанная на Московском электротехническом заводе для сухих трансформаторов с естественным воздушным охлаждением и изоляцией класса *B* [3], которая была дополнена и уточнена при проектировании трансформаторов для ТЭС на Запорожском трансформаторном заводе, дает для плотностей тепловых потоков с поверхностей обмоток и магнитопровода очень громоздкие многочленные выражения в функции от переменных. Кроме того, в литературе отсутствуют необходимые рекомендации по выбору допустимых плотностей тепловых потоков. Поэтому становится понятным заключение Г. Б. Фридмана о том, что «... в расчеты по выбору основных размеров такого (шахтного воздушного) трансформатора трудно ввести ограничения, связанные с нагреванием активных частей» [3].

С целью получения наиболее простых расчетных выражений для переменных, в функции от которых так или иначе находятся все параметры и затраты, мы вводим расчетные плотности тепловых потоков для обмоток и магнитопровода  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_0$ .

### Обмотка ВН (непрерывная спиральная катушечная):

В катушке рассматривается средний провод, теплоотдачей которого в радиальных направлениях пренебрегаем. Эффективная поверхность охлаждения и потери для этого провода\*):

$$S_1 = \pi D_{\text{ср}} (x_1 + i_1) 2\beta_{1\text{к}} \kappa_{\text{П1}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{н1}} = I_{\text{в1}}^2 r_{\text{в}} = \rho \pi D_{\text{ср}} I_{\text{в1}} \Delta_1. \quad (3)$$

Выражение для коэффициента эффективности теплоотдачи конвекцией в горизонтальных каналах  $\beta_{1\text{к}}$  [4] без заметного влияния на точность расчета мы аппроксимируем прямой линией:

$$\beta_{1\text{к}} = 1,64 \frac{\delta_1}{b_1}, \quad (4)$$

где

$$b_1 = (x_1 + i_1) m_1 \omega_{\text{к}}. \quad (5)$$

Тогда расчетная плотность теплового потока:

$$\sigma_1 = \frac{P_{\text{н1}}}{S_1} = \frac{\Delta_1 \rho I_{\text{в1}} \omega_{\text{к}}}{3,28 \delta_1 \kappa_{\text{П1}}}, \quad \frac{\text{вт}}{\text{см}^2}. \quad (6)$$

Сечение активной меди катушки:

$$q_m = x_1 y_1 m_1 \omega_{\text{к}}, \quad \text{см}^2. \quad (7)$$

Площадь сечения катушки:

$$q_m'' = (x_1 + i_1) (y_1 + i_1) m_1 \omega_{\text{к}}, \quad \text{см}^2. \quad (8)$$

Коэффициент заполнения медью площади сечения катушки:

$$K_1 = \frac{q_m}{q_m''} = \frac{I_{\text{в1}}}{\Delta_1 (x_1 + i_1) (y_1 + i_1)}. \quad (9)$$

### Обмотка НН (слоевая):

Рассматриваем слой наибольшего диаметра  $D$ . Коэффициент заполнения медью площади слоя  $K$ , как и для масляных трансформаторов [2], находится из соотношения:

$$K_2 = \frac{I_{\text{в2}}}{\Delta_2 (x_2 + i_2) (y_2 + i_2) \kappa''}. \quad (10)$$

Число витков в слое с учетом (10):

$$\omega_{\text{с2}} = \frac{(x_2 + i_2) m_2 h K_2}{q_{\text{с2}}} = \frac{m_2 I_{\text{в2}} h}{q_{\text{с2}} \Delta_2 (y_2 + i_2) \kappa''}. \quad (11)$$

Эффективная поверхность охлаждения и потери для слоя:

$$S_2 = \rho \pi D h K_{\text{П2}} \beta_{2-1}, \quad \text{см}^2, \quad (12)$$

$$P_{\text{н2}} = I_{\text{в2}}^2 r_{\text{с}} = \Delta_2^2 q_{\text{с2}} \rho \pi D \omega_{\text{с2}}, \quad \text{квт}. \quad (13)$$

Коэффициент эффективности теплоотдачи конвекцией в вертикальных каналах  $\beta_{2-1}$  согласно [4]:

$$\beta_{2-1} = 0,56 \sqrt[4]{\frac{(10^{\delta_{2-1}})^{1,6}}{10 h}}. \quad (14)$$

Тогда расчетная плотность теплового потока  $\sigma_2$ :

$$\sigma_2 = \frac{P_{\text{н2}}}{S_2} = \frac{\rho I_{\text{в2}} m_2 \Delta_2 \sqrt[4]{10 h}}{(y_2 + i_2) 0,56 \sqrt[4]{(10^{\delta_{2-1}})^{1,6}} \rho \pi \kappa''}, \quad \frac{\text{вт}}{\text{см}^2}. \quad (15)$$

\*) Условные обозначения приводятся в [3] и частично в конце статьи.

Формула (15) справедлива для  $p = 1$ . Если  $p = 2$ , то вместо  $\delta_{2-1}$  в (15) следует подставлять  $\delta_{2-1}$ :

$$\delta'_{2-1} = \frac{\delta_2 + \delta_{2-1}}{2}, \text{ см.} \quad (16)$$

### Магнитопровод:

Рассматриваем только стержни по высоте окна. Потери в стержнях:

$$P_{ст} = 3\lambda_c B^2 \gamma_c \frac{\pi d^3 \kappa_c}{4} (h + 2l_u), \text{ квт.} \quad (17)$$

Эффективная поверхность охлаждения стержней:

$$S_{ст} = S'_{0-1} \beta'_{0-2} + S'_{0-2} \beta_0, \text{ см}^2. \quad (18)$$

где

$$\beta'_{0-2} = 0,56 \sqrt[4]{\frac{(5\delta_{0-2})^{1,6}}{10(h+2l_u)}}; \quad (19)$$

$$\beta_0 = 0,56 \sqrt[4]{\frac{(10\delta_0)^{1,6}}{10(h+2l_u)}}; \quad (20)$$

$$S'_{0-1} = 6(h+2l_u)(e' + e'') d \kappa_{по}, \text{ см}^2, \quad (21)$$

$$S'_{0-2} = 6(h+2l_u)n_0 d e', \text{ см}^2. \quad (22)$$

Расчетная плотность теплового потока  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{P_{ст}}{S_{ст}} = \frac{0,7\lambda_c \gamma_c \kappa_c B^2 d^3 \sqrt[4]{10(h+2l_u)}}{[(e' + e'') \kappa_{по} \sqrt[4]{(5\delta_{0-2})^{1,6}} + e' n_0 \sqrt[4]{(10\delta_0)^{1,6}}]}, \frac{\text{вт}}{\text{см}^2}. \quad (23)$$

Для сечений меди обмоток ВН и НН с учетом (9) и (10) будем иметь выражения:

$$q_{m1} = \frac{I_1 \omega_k h}{\Delta_1 \kappa_p (y_1 + i_1 + \delta_1 \kappa')}, \text{ см}^2; \quad (24)$$

$$q_{m2} = \frac{m_2 n_2 I_{в2} h}{\Delta_2 (y_2 + i_2) \kappa''}, \text{ см}^2. \quad (25)$$

Кроме полученных формул для условных плотностей тепловых потоков (6), (15), (23), в систему уравнений „физических ограничений“ входят следующие общие и для масляных трансформаторов [2] соотношения, которые для шахтных сухих трансформаторов могут быть записаны с учетом (24) и (25) в таком виде:

$$\frac{I_{в1} m_1 \omega_k}{(y_1 + i_1 + \delta_1 \kappa') \kappa_p} = \frac{I_{в2} n_2 m_2'}{(y_2 + i_2) \kappa''}; \quad (26)$$

$$\Delta_1 = \frac{I_{в1}}{x_1 y_1}; \quad (27)$$

$$\Delta_2 = \frac{I_{в2}}{x_2 y_2}; \quad (28)$$

$$S = K \frac{I_{в2} n_2 m_2' B h q_c}{(y_2 + i_2) \kappa''}; \quad (29)$$

$$u_p = \frac{2\pi^2 \kappa_r \Delta_2 q_{m2} I_m (b_1 + b_2 + 3\delta_{12})}{33,3 B h q_c}. \quad (30)$$

Если считать заданными значения индукции в стержне, условных плотностей тепловых потоков, числа параллельных проводов и слоев, указанная система уравнений содержит девять неизвестных переменных величин, одна из которых должна быть принята за независимую.

Принципиально любая из переменных может быть принята независимой, однако наиболее простые и удобные расчетные формулы получаются при использовании в качестве независимой переменной высоты обмоток  $h$ .

В этом случае непосредственно из (23) получаем для диаметра стержня:

$$d = \frac{\alpha_0}{B^2 \sqrt[4]{10(h + 2l_u)}}, \text{ см.} \quad (31)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_0 [(e' + e'') \kappa_{п0} \sqrt[4]{(5\delta_{0-2})^{1.6}} + n_0 e' \sqrt[4]{(10\delta_0)^{1.6}}]}{0,7\alpha_c \gamma_c \kappa_c}. \quad (32)$$

Из (29) находим  $y_2$ :

$$y_2 = \frac{BK I_{в2} n_2 m_2' h q_c}{S \kappa''} - i_2, \text{ см.} \quad (33)$$

Подставляем (33) в (15) и полученное выражение решаем относительно  $\Delta_2$ :

$$\Delta_2 = \frac{BK I_{в2} n_2 m_2' \alpha_2 \sqrt[4]{h^3} q_c}{\sqrt[4]{10} S \kappa''}, \frac{a}{\text{см}^2}, \quad (34)$$

$$\alpha_2 = \frac{\sigma_2 \kappa'' \rho \kappa_{п2} 0,56 \sqrt[4]{(10 \delta_{2-1})^{1.6}}}{\rho m_2' I_{в2}}. \quad (35)$$

Имея в виду полученные соотношения для  $y_2$  (33) и  $\Delta_2$  (34), из (28) определяем  $x_2$ :

$$x_2 = \frac{I_{в2}}{\Delta_2 y_2}, \text{ см.} \quad (36)$$

Из (6) для числа витков в катушке  $\omega_k$ :

$$\omega_k = \frac{\alpha_1}{\Delta_1}, \quad (37)$$

$$\alpha_1 = \frac{3,28 \sigma_1 \kappa_{п1} \delta_1}{I_{1\rho}}. \quad (38)$$

В (26) подставляем (33) и (38) и находим  $y_1$ :

$$y_1 = \frac{\alpha_1 I_{в1} m_1 K B h q_c}{S \Delta_1 \kappa_p} - (i_1 + \delta_1 \kappa'), \text{ см.} \quad (39)$$

Тогда из (27) определится  $x_1$ :

$$x_1 = \frac{I_{в1}}{\Delta_1 y_1}, \text{ см.} \quad (40)$$

Из оставшегося „физического ограничения“ (30) необходимо получить расчетное выражение для  $\Delta_1$ . Для этого в (30) подставляем (34), (25), (33) и получаем уравнение:

$$\frac{33,3 B^2 q_c^2 h K}{2\pi^3 \kappa_r S} = (d + 2a_{q2} + 2b_2 + \delta_{12}) (b_1 + b_2 + 3\delta_{12}). \quad (41)$$

Левую часть полученного уравнения для простоты обозначим через  $R$  и имеем в виду, что

$$b_2 = (x_2 + i_2) m_2 n_2 + n_{\kappa} \delta_2' + n_{\kappa 2} \delta_2, \quad (42)$$

тогда с учетом (5), (37), (40) выводим расчетную формулу для  $\Delta_1$ :

$$\Delta_1 = \frac{-V - \sqrt{V^2 - 4UP}}{2U}, \quad \frac{a}{\text{см}^2}. \quad (43)$$

Здесь

$$V = m_1 \alpha_1 \left[ \frac{I_{в1} KBhq_c}{i_1 + \delta_1 \kappa'} \left( \delta_2 + 3\delta_{12} - \frac{R}{d + 2a_{02} + 2b_2 + \delta_{12}} \right) - i_1 S\kappa_p \right]; \quad (44)$$

$$U = S\kappa_p \left[ \frac{R}{d + 2b_2 + 2a_{02} + \delta_{12}} - (b_2 + 3\delta_{12}) \right]; \quad (45)$$

$$P = \frac{I_{в1} \alpha_1 m_1 (S\kappa_p + m_1 \alpha_1 i_1 KBhq_c)}{i_1 + \delta_1 \kappa'}. \quad (46)$$

Таким образом, восемь переменных представлены теперь в функциональной зависимости от высоты обмоток. С использованием приведенных в [2] соотношений для подсчета весов  $Q_{ст}$ ,  $Q_{я}$ ,  $Q_{m1}$  и  $Q_{m2}$  через переменные формула расчетных затрат (1) будет также функцией только высоты обмоток  $h$ .

Оптимальное значение  $h$  соответствует минимуму величины расчетных затрат. Минимизацию формулы расчетных затрат (1) из-за ее сложности и наличия большого числа вспомогательных уравнений целесообразнее всего производить численным методом с помощью ЦВМ. Определив оптимальное значение  $h$  и проделав расчет по выше приведенным формулам, находим оптимальные величины для остальных переменных, необходимых размеров, весов и т. п.

### Выводы

1. Развиваемый в [2] метод технико-экономических исследований масляных трансформаторов 1 и 2 габаритов может быть использован и для исследования шахтных сухих трансформаторов. В этом случае система «физических ограничений» должна быть дополнена уравнением для плотности теплового потока с поверхности магнитопровода.

2. Из-за большой сложности теплового расчета в систему «физических ограничений» вместо действительных плотностей тепловых потоков с поверхностей обмоток и магнитопровода вводятся соответствующие расчетные величины  $\tau_1, \sigma_2, \sigma_0$ .

3. В совокупность исходных данных при исследованиях должны входить конкретные значения  $\tau, \sigma_2, \sigma_0$ . С целью определения оптимальных сочетаний  $\tau_1, \sigma_2, \sigma_0$  для каждого трансформатора должно быть проделано вспомогательное исследование.

4. Как и для масляных трансформаторов, все расчетные формулы для затрат, весов, размеров, потерь и т. п. выражаются в функции одной независимой переменной, в качестве которой целесообразно принять высоту обмотки  $h$ .

5. При исследованиях автоматически удовлетворяются все важнейшие технические и эксплуатационные требования, так как они заложены в математический аппарат как «физические ограничения».

Результаты технико-экономических исследований шахтных сухих трансформаторов по настоящей методике будут представлены в последующих публикациях.

### Условные обозначения

- $k_{по}$  — коэффициент, учитывающий закрытие части охлаждающей поверхности магнитопровода изоляционными деталями.
- $D_{ср}$  — средний диаметр обмотки ВН, см.
- $r_{в}$  — сопротивление одного параллельного провода обмотки ВН, см.
- $m_2^1$  — число параллельных проводов слоя обмотки НН в радиальном направлении.
- $q_{\omega 2}, r_c$  — сечение и сопротивление витка обмотки НН, см<sup>2</sup>, Ом·см.
- $p$  — число поверхностей охлаждения слоя обмотки НН.
- $n_{к2}, n_{к}$  — числа каналов и междуслейных прокладок обмотки НН.
- $n_0$  — количество охлаждающих каналов в стержне.
- $\delta_{0-2}$  — расчетная величина охлаждающего канала между стержнем и обмоткой НН, см.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Хорунжий, Е. Н. Зикеев. Электрооборудование для шахт — в серийное производство. «Вестник электропромышленности», № 3, 1963.
2. И. Д. Кутявин, В. А. Зорин. Техничко-экономическое обоснование выбора оптимальных размеров силовых трансформаторов малой мощности. «Надежность и экономичность электроснабжения нефтехимических заводов», вып. 1, Омск, 1968.
3. Ю. И. Герасимов, Г. Б. Фридман. Шахтные взрывобезопасные трансформаторные подстанции. Госэнергоиздат, 1963.
4. Г. Б. Фридман. Тепловой расчет шахтных трансформаторов. «Вестник электропромышленности», № 3, 1963.