

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЦВМ ПРИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТРЕХФАЗНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ<sup>1)</sup>

Г. В. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и сетей)

В [1] исследованы трехфазные трансформаторы с сочетанием обмоток высокой и низкой стороны: непрерывная-непрерывная (Нр.-Нр.). Там же указано, что у рассматриваемых трансформаторов большей мощности на низкой стороне необходимо будет применить винтовую обмотку, что дает сокращение числа независимых переменных с трех (сочетание Нр.-Нр.) до двух (Нр.-Вт.). Исследуемая система уравнений с учетом названного добавочного условия принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} S &= KB \frac{x_1 y_1 \Delta_1 h d^2}{(1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1)(y_1 + \delta_1)}, \\ u_p &= K_p \frac{x_1 y_1 \Delta_1 (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{B d^2 (1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1)(y_1 + \delta_1)} (d + 2x_2 + l), \\ k_{n1} x_1 + y_1 &= L_1 \Delta_1^2 \frac{x_1 y_1}{1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1}, \\ k_{n2} x_2 + y_2 &= L_2 \Delta_2^2 \frac{x_2 y_2}{1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2}, \\ \frac{x_2 y_2 \Delta_2}{(1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2)(y_2 + \delta_2)} &= \frac{x_1 y_1 \Delta_1}{(1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1)(y_1 + \delta_1)}, \\ I_2 \omega_{k2} &= \frac{x_2 y_2 \Delta_2}{1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Все обозначения соответствуют [1].

Система (1) исследовалась на электронно-вычислительной цифровой машине „Минск - 1“. Вычисления проводились в порядке расположения следующих формул:

$$\Delta_1 = \frac{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + \frac{4L_1 x_1}{(k_{n1} x_1 + y_1) y_1}}}{2L_1 x_1}, \quad (2)$$

$$k_{n1} x_1 + y_1$$

<sup>1)</sup> Работа выполнена под руководством проф. докт. Кулявина И. Д.

$$y_2 = \frac{I_2 \omega_{k2} (1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1) (y_1 + \delta_1)}{x_1 y_1 \Delta_1} - \delta_2, \quad (3)$$

$$\Delta_2 = \frac{\left( k_{n2} \lambda_2 + \frac{y_2}{I_2 \omega_{k2}} \right) + \sqrt{\left( k_{n2} \lambda_2 + \frac{y_2}{I_2 \omega_{k2}} \right)^2 + 4 L_2 \frac{k_{n2}}{y_2}}}{2 L_2}, \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{I_2 \omega_{k2} (1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2)}{y_2 \Delta_2}, \quad (5)$$

$$V = \frac{K_p I_2 \omega_{k2} (x_1 + x_2 + 3 \delta_{12})}{2 u_p B (y_2 + \delta_2)}, \quad (6)$$

$$d = V + \sqrt{V^2 + 2 V (2 x_2 + l)}, \quad (7)$$

$$h = \frac{S}{K I_2 \omega_{k2} B} \cdot \frac{y_2 + \delta_2}{d^2}, \quad (8)$$

$$q_c = \frac{\pi k_c}{4} \cdot d^2, \quad (9)$$

$$l_{\text{я}} = 8 k_{\text{я}} [(x_1 + x_2) + 0,7 d + l_r], \quad (10)$$

$$l_{\text{ст}} = 3 (h + 2 l_{\text{н}}), \quad (11)$$

$$Q_{\text{ст}} = \gamma_c q_c l_{\text{ст}}, \quad (12)$$

$$Q_{\text{я}} = \gamma_c q_c l_{\text{я}}, \quad (13)$$

$$Z_{\text{ст}} = (A + D B^2 + 1,5 \alpha_{\text{пст}}) Q_{\text{ст}}, \quad (14)$$

$$Z_{\text{я}} = \left[ A + D \left( \frac{B}{k_{\text{я}}} \right)^2 + 1,5 \alpha_{\text{пя}} \right] Q_{\text{я}}, \quad (15)$$

$$d_{2 \text{ ср}} = d + x_2 + 2 \delta_{02}, \quad (16)$$

$$d_{1 \text{ ср}} = d_{2 \text{ ср}} + x_2 + x_1 + 2 \delta_{12}, \quad (17)$$

$$Q_{\text{м2}} = \frac{3 \pi \gamma_{\text{м}} I_2 \omega_{k2} h}{y_2 + \delta_2} \cdot \frac{d_{2 \text{ ср}}}{\Delta_2}, \quad (18)$$

$$Q_{\text{м1}} = \frac{3 \pi \gamma_{\text{м}} I_2 \omega_{k2} h}{y_2 + \delta_2} \cdot \frac{d_{1 \text{ ср}}}{\Delta_1}, \quad (19)$$

$$Q_{\text{м}} = Q_{\text{м2}} + Q_{\text{м1}}, \quad (20)$$

$$Z_{\text{м}} = (\beta A + E \Delta_1^2) Q_{\text{м1}} + (\beta A + E \Delta_2^2) Q_{\text{м2}}, \quad (21)$$

$$Z = Z_{\text{ст}} + Z_{\text{я}} + Z_{\text{м}}, \quad (22)$$

$$\omega_{k1} = \frac{x_1 y_1 \Delta_1}{I_1 (1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1)}, \quad (23)$$

$$\sigma_p = \frac{K_p I_2 \omega_{k2}}{y_2 + \delta_2} \Delta_1 (d + 2 x_2 + l). \quad (24)$$

В качестве независимых переменных были выбраны  $x_1$ ;  $y_1$ . По формулам (11), (12), (14) подсчитывались длина, вес и затраты на стержни, а по (10), (13), (15) соответственно на ярма трансформатора. Минимум затрат  $Z$  (22) находился по методу Гаусса-Зайделя [2]. При составлении программы обнаружилась нехватка внутренней машинной

памяти. Поэтому была использована интерпретирующая система. Расчет проводился с плавающей запятой. Первоначальные шаги по  $x_1$ ,  $y_1$  были равны 0,4, далее по мере приближения к минимуму они дробились каждый раз пополам до тех пор, пока погрешность в определении конечных затрат не составляла менее 0,5%. Машинное время для определения оптимальной точки для одной мощности трансформатора составило примерно 2,5 минуты. На печать выдавались следующие величины:

$$\Delta_1, y_2, \Delta_2, x_2, d, h, Q_{ст}, Q_{я}, Z_{ст}, Z_{я}, Q_m, Z_m, Z, w_{k1}, \sigma_{p1}, x_1, y_1.$$

Программирование было произведено студенткой V курса ТГУ Панихиной М.

Исследованию подверглись трансформаторы мощностью  $16 \div 63$  Мва.

Начиная с мощности  $40 \div 60$  Мва, радиальное механическое усилие на разрыв при коротком замыкании становится больше допустимого, принятого равным  $600 \div 800$  кг/см<sup>2</sup>. Поэтому, для этих и более высоких значений мощностей трансформаторов в качестве одного из исходных уравнений при исследовании следует принимать уравнение радиальных механических усилий

$$\tau_{p1} = K_m \frac{I_2 w_{k2} \cdot \Delta_1}{y_2 + \delta_2} (d + 2x_2 + l), \quad (25)$$

где

$$K_m = \frac{2,04 \cdot K_{уд}^2 \cdot K_p}{u_k^2} \pi \cdot 10^{-8}.$$

Соответственно для вторичной обмотки можно записать

$$\tau_{p2} = K_m \frac{I_2 w_{k2} \cdot \Delta_2}{y_2 + \delta_2} (d + 2x_2 + l). \quad (26)$$

Совместное решение (25) и (26) при  $\sigma_{p1} = \tau_{p2} = [\tau_p]$  дает равенство плотностей тока обмоток ВН и НН

$$\Delta_1 = \Delta_2. \quad (27)$$

Уравнение (25) совместно с (1) дает систему из 7 уравнений с 3 неизвестными с учетом (27) (если принять число заходов, а значит и  $w_{k2}$  винтовой обмотки, величиной переменной). В качестве независимого переменного было принято число витков в катушке обмотки НН ( $w_{k2}$ ). К сожалению, простое аналитическое выражение остальных переменных через принятую независимую оказалось невозможным в виду сложности получающихся уравнений (порядка 10 степени). Поэтому было решено произвести исследование указанной выше системы уравнений на ЭЦВМ „Минск-1“ следующим образом. Все переменные были выражены через  $y_2$  и  $w_{k2}$ :

$$x_2 = \frac{-(y_2 - I_2 w_{k2} \lambda_2 k_{n2}) + \sqrt{(y_2 - I_2 w_{k2} \lambda_2 k_{n2})^2 + 4 I_2 w_{k2} k_{n2} \left( \frac{L_2 I_2 w_{k2}}{y_2} + \lambda_2 y_2 \right)}}{2 k_{n2}}, \quad (28)$$

$$\Delta = \frac{k_{n2} x_2 + y_2}{L_2 I_2 w_{k2}}, \quad (29)$$

$$d = \frac{\sigma_p}{K_M I_2 \omega_{k2}} \cdot \frac{y_2 + \delta_2}{\Delta} - 2x_2 - l, \quad (30)$$

$$x_1 = \frac{u_p K_M B}{K_p \cdot \sigma_p} d^2 \Delta - x_2 - 3\delta_{12}, \quad (31)$$

$$y_1 = \frac{k_{01}(y_2 + \delta_2)x_1 - L_1 I_2 \omega_{k2} \cdot \delta_1 \Delta}{L I_2 \omega_{k2} \Delta - y_2 - \delta_2}, \quad (32)$$

$$x'_1 = \frac{I_2 \omega_{k2}}{y_2 + \delta_2} \cdot \frac{(1 + \lambda_1 y_1 \Delta)(y_1 + \delta_1)}{y_1 \Delta}. \quad (33)$$

Остальные выражения для вычисления суммарных затрат аналогичны (8 ÷ 24).

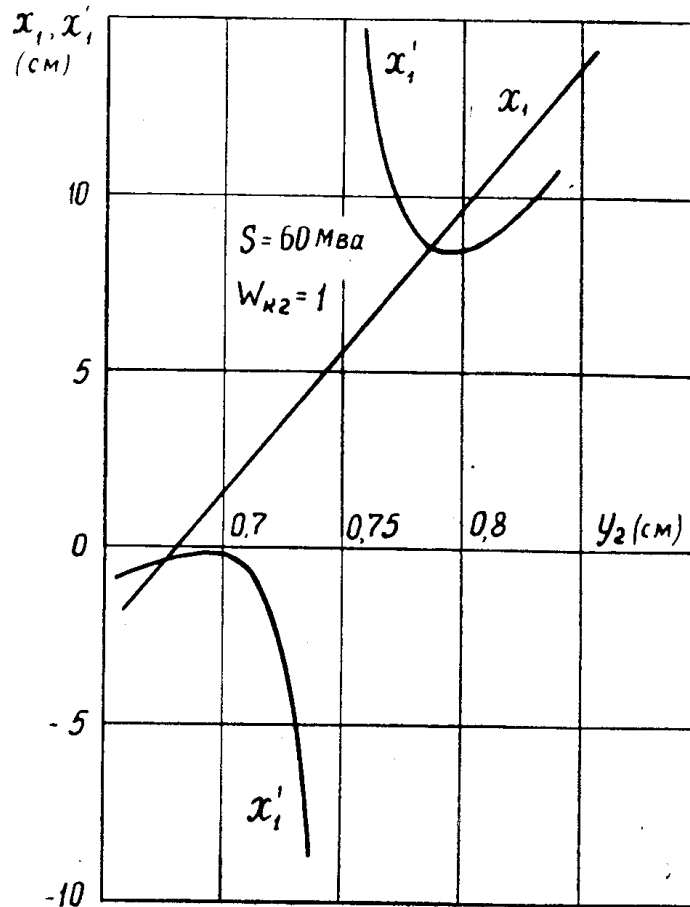


Рис. 1.

Далее методом последовательных приближений находилась для каждого принимаемого значения  $\omega_{k2}$  такой  $y_2$ , при котором  $x_1$  и  $x'_1$  были бы равны. Для найденного  $y_2$  и соответствующего ему  $\omega_{k2}$  производился подсчет затрат и всех промежуточных величин. Характер изменения  $x_1$  и  $x'_1$  показан на рис. 1.

Логическая часть программы была составлена с учетом того, что  $d$ ,  $x_1$ ,  $y_1$  или  $x'_1$  могут принимать отрицательные значения. Поэтому, если одна из указанных величин становилась меньше нуля, машина переходила к расчету следующей точки. Точка пересечения кривых

$x'_1$  и  $x_1 = f(y_2)$  обнаруживалась при перемене знака разности  $(x'_1 - x_1)$  с „+“ на „-“.

Поиск по  $y_2$  производился в пределах  $y_2 = 0 \div 4$  с первичным шагом 0,1. Далее шаги вблизи точки пересечения принимались: 0,01; 0,001; 0,0001 и т. д., пока  $|x'_1 - x_1| \leq 0,1$ . Счет, как и в первом случае, велся с плавающей запятой и интерпретирующей системой. Продолжительность полного счета для одного  $w_{k2}$  равнялась в среднем одной минуте. Поиск минимума затрат (22) по  $w_{k2}$  программой не предусматривался. Значения  $w_{k2}$  задавались следующие: 0,125; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0. Выдача такая же, как и в первом случае.

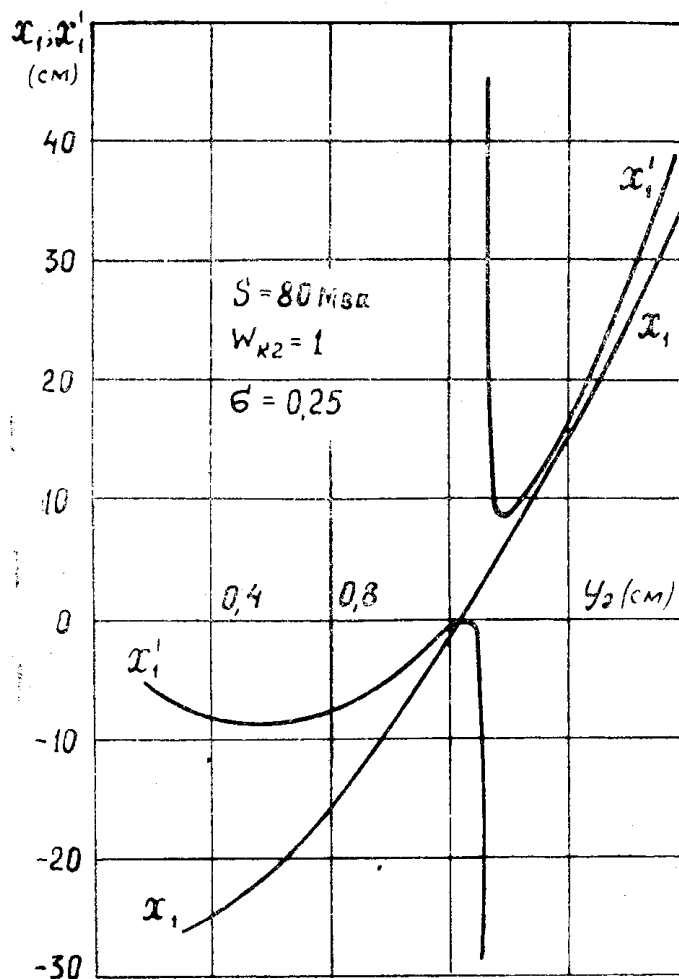


Рис. 2.

Следует отметить, что с ростом удельной тепловой нагрузки ( $\sigma$ ) интервал значений  $w_{k2}$ , для которых существуют конструктивные размеры трансформатора, сокращается. В табл. 1 в качестве примера приведены значения  $w_{k2}$  при различных  $\sigma$  для  $S = 80 \text{ Mva}$ . Только для этих  $w_{k2}$ , из всего вышеприведенного ряда принимаемых при расчете значений, существует конструктивное решение, одним из условий которого является пересечение кривых  $x'_1$  и  $x_1 = f(y_2)$ . Рис. 2 иллюстрирует отсутствие пересечения указанных кривых для  $S = 80 \text{ Mva}$ ,  $\sigma = 0,25$ ,  $w_{k2} = 1$ ,  $\tau_p = 800 \text{ k2/cm}^2$ .

Отсутствие точки пересечения  $x'_1$  и  $x_1 = f(y_2)$  для некоторых значений  $\sigma$  и  $w_{k2}$  объясняется, очевидно, наличием условия определен-

ной механической нагрузки при коротком замыкании. Дело в том, что с ростом  $\tau$  и  $w_{k2}$ , величина радиального усилия также растет (рис. 3, для  $S=16000$  кВа).

Таблица 1

| $\tau, \frac{вт}{см^2}$ | 0,1  | 0,15 | 0,2  | 0,25 | 0,5  |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| $w_{k2}$                | —    | —    | —    | —    | 0,25 |
|                         | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  |
|                         | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | —    |
|                         | 1,0  | 1,0  | 1,0  | —    | —    |
|                         | 1,5  | 1,5  | —    | —    | —    |
|                         | 2,0  | —    | —    | —    | —    |

И останов машины по этой причине происходил только для больших значений  $w_{k2}$ . При малых  $w_{k2}$  останов происходил в результате отрицательных значений  $y_1$ ,  $x'_1$  или  $d$ .

Программирование второго случая было произведено инженером - программистом ТПИ Былино Н. М.

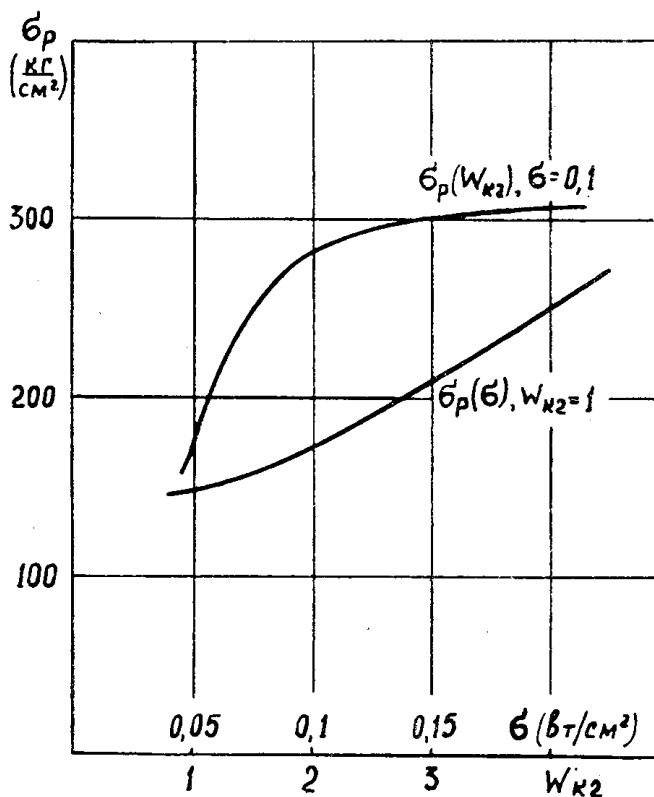


Рис. 3.

### Вывод

При технико-экономических исследованиях трехфазных трансформаторов, не только желательно, но в некоторых случаях даже обязательно использовать счетно-решающие машины ввиду сложности выражений, исключающей возможность исследования на логарифмической линейке. Для указанных исследований наиболее употребительна система с плавающей запятой и желательно применение ЭЦВМ с большей внутренней памятью, чем «Минск-1».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Дель, В. П. Краснов. Техничко-экономические исследования оптимальных размеров силовых трансформаторов. Изв. ТБИ, т. 132, 1964.
2. А. А. Фельдбаум. Вычислительные устройства в автоматических системах. Гос. изд-во физ.-матем. литературы, М., 1959.