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

Том 138 1965

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЦВМ ПРИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТРЕХФАЗНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ[1])

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:

$$\left.\begin{aligned}
S &= KB\,\frac{x_1 y_1 \Delta_1 h d^2}{(1+\lambda_1 y_1 \Delta_1)(y_1+\delta_1)}\,,\\
u_{\text{р}} &= K_{\text{р}}\,\frac{x_1 y_1 \Delta_1\,(x_1+x_2+3\delta_{12})}{Bd^2\,(1+\lambda_1 y_1\Delta_1)(y_1+\delta_1)}\,(d+2x_2+l),\\
k_{\text{п}1} x_1 + y_1 &= L_1 \Delta_1^2\,\frac{x_1 y_1}{1+\lambda_1 y_1 \Delta_1}\,,\\
k_{\text{п}2} x_2 + y_2 &= L_2 \Delta_2^2\,\frac{x_2 y_2}{1+\lambda_2 y_2 \Delta_2}\,,\\
\frac{x_2 y_2 \Delta_2}{(1+\lambda_2 y_2\Delta_2)(y_2+\delta_2)} &= \frac{x_1 y_1 \Delta_1}{(1+\lambda_1 y_1 \Delta_1)(y_1+\delta_1)}\,,\\
I_2 w_{k2} &= \frac{x_2 y_2 \Delta_2}{1+\lambda_2 y_2 \Delta_2}\,.
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Все обозначения соответствуют [1].

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

$$\Delta_1 = \frac{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + \dfrac{4L_1 x_1}{(k_{\text{п}1} x_1 + y_1)\, y_1}}}{\dfrac{2L_1 x_1}{k_{\text{п}1} x_1 + y_1}}\,, \qquad (2)$$

[1]) Работа выполнена под руководством проф. докт. Кутявина И. Д.

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

$$\Delta_2 = \frac{\left(k_{п2}\lambda_2 + \dfrac{y_2}{I_2 w_{k2}}\right) + \sqrt{\left(k_{п2}\lambda_2 + \dfrac{y_2}{I_2 w_{k2}}\right)^2 + 4L_2 \dfrac{k_{п2}}{y_2}}}{2L_2}, \tag{4}$$

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

$$V = \frac{K_р I_2 w_{k2}(x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{2u_р B(y_2+\delta_2)}, \tag{6}$$

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

$$h = \frac{S}{KI_2 w_{k2} B} \cdot \frac{y_2+\delta_2}{d^2}, \tag{8}$$

$$q_с = \frac{\pi k_с}{4} \cdot d^2, \tag{9}$$

$$l_я = 8k_я\,[(x_1 + x_2) + 0{,}7d + l_r], \tag{10}$$

$$l_{ст} = 3(h + 2l_и), \tag{11}$$

$$Q_{ст} = \gamma_с q_с l_{ст}, \tag{12}$$

$$Q_я = \gamma_с q_с l_я, \tag{13}$$

$$З_{ст} = (A + DB^2 + 1{,}5\alpha_{рст})\,Q_{ст}, \tag{14}$$

$$З_я = \left[A + D\left(\frac{B}{k_я}\right)^2 + 1{,}5\alpha_{ря}\right] Q_я, \tag{15}$$

$$d_{2\,ср} = d + x_2 + 2\delta_{02}, \tag{16}$$

$$d_{1\,ср} = d_{2\,ср} + x_2 + x_1 + 2\delta_{12}, \tag{17}$$

$$Q_{м2} = \frac{3\pi\gamma_м I_2 w_{k2} h}{y_2+\delta_2} \cdot \frac{d_{2\,ср}}{\Delta_2}, \tag{18}$$

$$Q_{м1} = \frac{3\pi\gamma_м I_2 w_{k2} h}{y_2+\delta_2}\,\frac{d_{1\,ср}}{\Delta_1}, \tag{19}$$

$$Q_м = Q_{м2} + Q_{м1}, \tag{20}$$

$$З_м = (\beta A + \mathrm{E}\Delta_1^2)\,Q_{м1} + (\beta A + \mathrm{E}\Delta_2^2)\,Q_{м2}, \tag{21}$$

$$З = З_{ст} + З_я + З_м, \tag{22}$$

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

$$\sigma_р = \frac{K_р I_2 w_{k2}}{y_2+\delta_2}\,\Delta_1 (d + 2x_2 + l). \tag{24}$$

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 $З$ (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:

$$\Delta_1,\ y_2,\ \Delta_2,\ x_2,\ d,\ h,\ Q_{ст},\ Q_{я},\ З_{ст},\ З_{я},\ Q_{м},\ З_{м},\ З,\ w_{k1},\ \sigma_{p1},\ x_1,\ y_1.$$

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/см²*. Поэтому, для этих и более высоких значений мощностей трансформаторов в качестве одного из исходных уравнений при исследовании следует принимать уравнение радиальных механических усилий

$$\sigma_{p1} = K_м \frac{I_2 w_{k2} \cdot \Delta_1}{y_2 + \delta_2}(d + 2x_2 + l), \tag{25}$$

где

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

Соответственно для вторичной обмотки можно записать

$$\sigma_{p2} = K_м \frac{I_2 w_{k2} \cdot \Delta_2}{y_2 + \delta_2}(d + 2x_2 + l). \tag{26}$$

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

$$\Delta_1 = \Delta_2. \tag{27}$$

Уравнение (25) совместно с (1) дает систему из 7 уравнений с 8 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}:

$$x_2 = \frac{-(y_2 - I_2 w_{k2} \lambda_2 k_{п2}) +}{2k_{п2}}$$

$$\frac{+\sqrt{(y_2 - I_2 w_{k2} \lambda_2 k_{п2})^2 + 4 I_2 w_{k2} k_{п2}\left(\dfrac{L_2 I_2 w_{k2}}{y_2} + \lambda_2 y_2\right)}}{2k_{п2}}, \tag{28}$$

$$\Delta = \frac{k_{п2} x_2 + y_2}{L_2 I_2 w_{k2}}, \tag{29}$$

$$d = \frac{\sigma_р}{K_м I_2 w_{k2}} \cdot \frac{y_2 + \delta_2}{\Delta} - 2x_2 - l, \qquad (30)$$

$$x_1 = \frac{u_р K_м B}{K_р \cdot \sigma_р} d^2\Delta - x_2 - 3\delta_{12}, \qquad (31)$$

$$y_1 = \frac{k_{п1}(y_2 + \delta_2) x_1 - L_1 I_2 w_{k2} \cdot \delta_1 \Delta}{L I_2 w_{k2}\Delta - y_2 - \delta_2}, \qquad (32)$$

$$x_1' = \frac{I_2 w_{k2}}{y_2 + \delta_2} \cdot \frac{(1 + \lambda_1 y_1 \Delta)(y_1 + \delta_1)}{y_1 \Delta}. \qquad (33)$$

Остальные выражения для вычисления суммарных затрат аналогичны ($8 \div 24$).

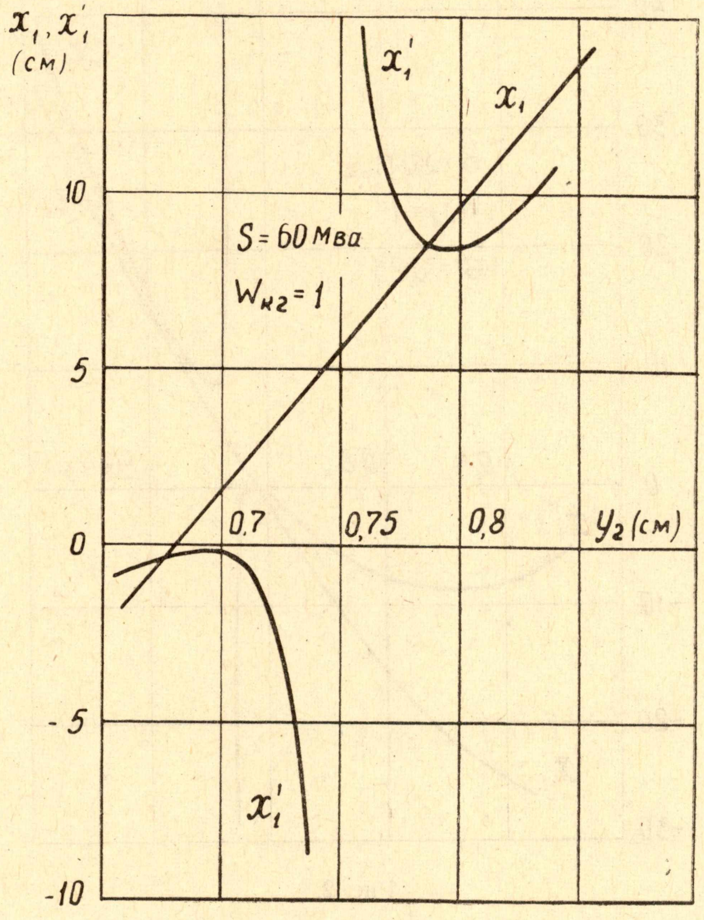

Рис. 1.

Далее методом последовательных приближений находился для каждого принимаемого значения w_{k2} такой y_2, при котором x_1 и x_1' были бы равны. Для найденного y_2 и соответствующего ему w_{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 $|x_1' - x_1| \leqslant 0{,}1$. 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.

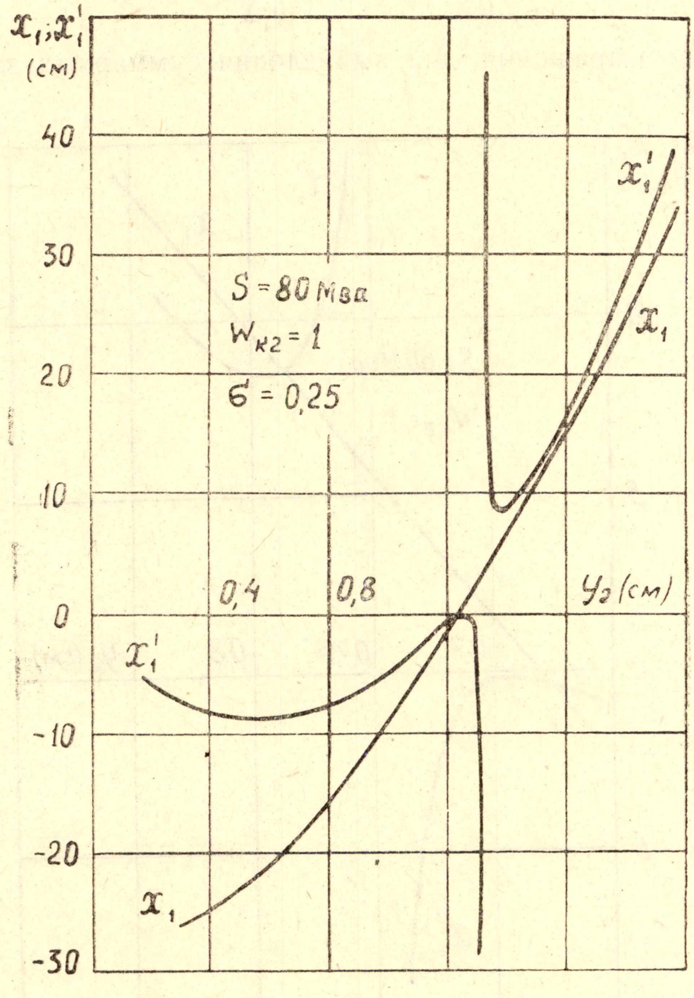

Рис. 2.

Следует отметить, что с ростом удельной тепловой нагрузки (σ) интервал значений w_{k2}, для которых существуют конструктивные размеры трансформатора, сокращается. В табл. 1 в качестве примера приведены значения w_{k2} при различных σ для $S = 80$ *Мва*. 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 $S = 80$ *Мва*, $\sigma = 0{,}25$, $w_{k2} = 1$, $\sigma_р = 800$ *кг/см²*.

Отсутствие точки пересечения x_1' и $x_1 = f(y_2)$ для некоторых значений σ и w_{k2} объясняется, очевидно, наличием условия определенной механической нагрузки при коротком замыкании. Дело в том, что с ростом σ и w_{k2}, величина радиального усилия также растет (рис. 3, для $S=16000$ *ква*). Поэтому вполне определенному значению σ_p соответствуют вполне определенные сочетания σ и w_{k2}. И останов машины по этой причине происходил только для бо́льших 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.

Таблица 1

$\sigma, \frac{вт}{см^2}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,5
	—	—	—	—	0,25
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$w_{к2}$	0,75	0,75	0,75	0,75	—
	1,0	1,0	1,0	—	—
	1,5	1,5	—	—	—
	2,0	—	—	—	—

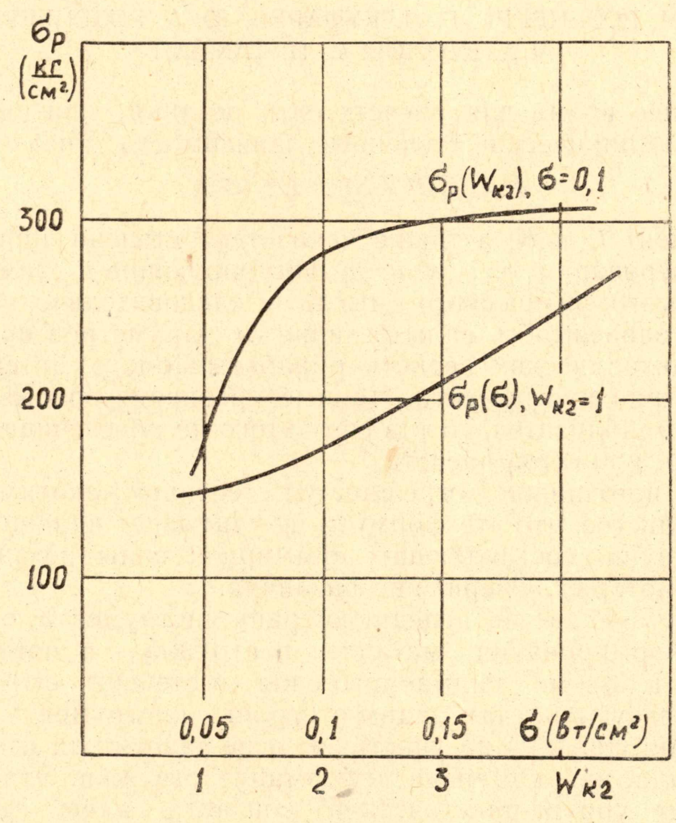

Рис. 3.

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-I».

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Дель, В. П. Краснов. Технико-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.