

Полученные результаты были использованы на практике при расчете тиристорных преобразователей частоты от 2,5 до 44 кГц и внедренных в промышленную эксплуатацию Белорусским институтом инженеров железнодорожного транспорта на ряде заводов страны. Преобразователь на 2,5 кГц имеет следующие данные: мощность 250 кВт;  $d = 0,8$ ;  $k = 0,51$ ;  $d_n = 0,2$ ;  $C = 4C_k$ ;  $L_d = 10L$  (рис.1), охлаждение <sup>з</sup> водяное, <sup>н</sup>габариты 900 x 1500 x 2500 мм.

### Л и т е р а т у р а

1. Беркович Е.И. и др. Тиристорные преобразователи высокой частоты. Л., 1973.
2. Промышленное применение токов высокой частоты. - Труды ВНИИ ТВЧ, вып. 7. М.-Л., 1966.
3. Применение токов высокой частоты в электротермии. Под ред. А.Е.Слухоцкого. Л., 1973.
4. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. - Труды УАИ, вып. 91. Уфа, 1976.
5. Кацнельсон С.М. и др. Последовательный тиристорный инвертор. Авт.свид. № 547019. - Бюл.изобрет. 1977, №6.
6. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. - Труды УАИ, вып. 22. Уфа, 1971.

УДК 621.3.052.33

Э.В.Купчинова,  
Т.Т.Розум, канд.техн.наук

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Условия симметрии в трехфазных цепях с изолированной нейтралью могут не выполняться в силу различных причин. В результате происходит смещение потенциала нейтральной точки и приемника относительно центра треугольника линейных напряжений, и симметрия фазных напряжений нарушается.

Рассмотрим простую методику графоаналитического исследования режимов работы трехфазной цепи. Класс решаемых задач ограничен случаем, когда

$$Z_A = mze^{j\varphi}; m = \text{var}; \varphi = \text{var}; Z_B = Z_C = ze^{j\alpha} = \text{const.}$$

Выражение напряжения смещения нейтрали [1]

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

после подстановки комплексных э.д.с. и проводимостей, несложных преобразований и нормирования приводится к виду

$$\dot{U}'_{nN} = \frac{\dot{U}_{nN}}{E} = \frac{e^{-j\varphi} - me^{-j\alpha}}{e^{-j\varphi} + 2me^{-j\alpha}} \quad (1)$$

Для дальнейшего анализа вводим величину  $\Delta = \varphi - \alpha$ . Подставляя в (1) вместо угла  $\alpha$  разность  $\varphi - \Delta$ , получим

$$\dot{U}'_{nN} = \frac{1 - me^{-j\Delta}}{1 + 2me^{-j\Delta}} \quad (2)$$

На основании (2) можно построить на комплексной плоскости два семейства кривых, параметрами которых будут значения переменных  $m = \frac{Z_A}{Z}$  и  $\Delta = \varphi - \alpha$ . Для упрощения построений целесообразно преобразовать (2), выделив вещественную и мнимую части:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re} \dot{U}'_{nN} &= \frac{1 - 2m^2 + m \cos \Delta}{1 + 4m^2 + 4m \cos \Delta}; \\ \operatorname{Im} \dot{U}'_{nN} &= - \frac{3m \sin \Delta}{1 + 4m^2 + 4m \cos \Delta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

На рис. 1 по формулам (3) построены названные семейства кривых: первое удовлетворяет условию  $m = \text{const}$ , а второе  $\Delta = \text{const}$ . Кривые  $m = \text{const}$  представляют окружности, центры которых расположены на вещественной оси. При  $m = 0,5$  окружности вырождаются в прямую линию, параллельную мнимой оси и проходящую через точку 0,25. Когда  $\Delta$  стремится к  $\pm 180^\circ$ , точка  $n$  уходит в бесконечность, т.е.

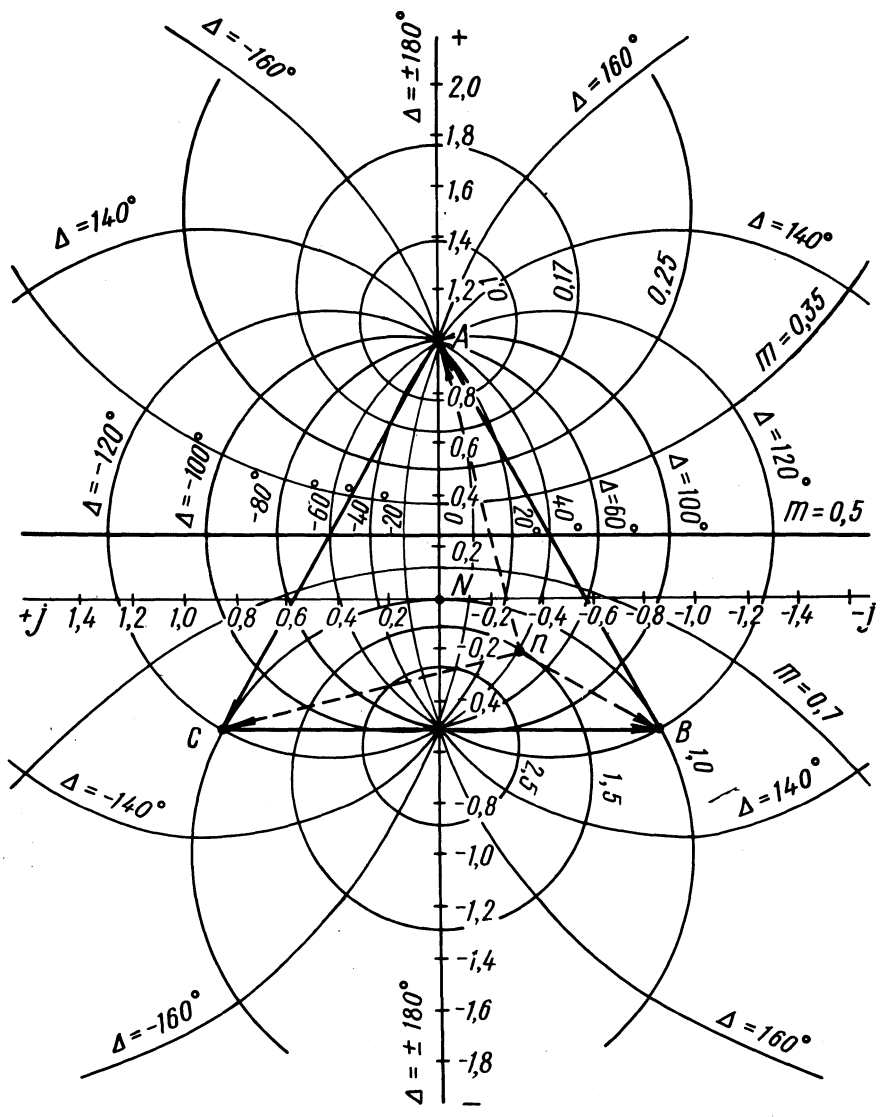


Рис. 1.

$U_{nN}$  и фазные напряжения приобретают бесконечно большие значения. В реальных цепях условие  $\Delta = 180^\circ$  недостижимо, поэтому все напряжения конечны, хотя и испытывают резкое увеличение. Физически оно объясняется резонансными явлениями.

Характер кривых  $m = \text{const}$  свидетельствует, что они могут быть описаны на комплексной плоскости уравнением окружности

$$\dot{U}'_{nN}(m, \Delta) = K(m) + R(m) e^{jf(\Delta)}. \quad (4)$$

Траектории семейства кривых  $\Delta = \text{const}$  также являются окружностями, центры которых расположены на прямой, проходящей через точку  $+0,25$  параллельно мнимой оси. С возрастанием  $\Delta$  радиусы окружностей увеличиваются. Кривые  $\Delta = \text{const}$  описываются уравнением

$$\dot{U}'_{nN}(m, \Delta) = \dot{K}_1(\Delta) + R_1(\Delta) e^{jf_1(\Delta)}. \quad (5)$$

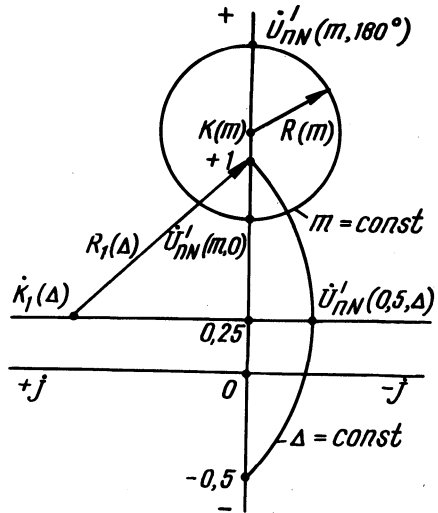


Рис. 2.

Для определения  $K(m)$ ,  $R(m)$ ,  $\dot{K}_1(\Delta)$  и  $R_1(\Delta)$  применен искусственный прием, основанный на геометрических соотношениях между радиусом окружности, координатой ее центра и координатами характерных точек траектории.

На рис. 2 показаны две траектории, соответствующие некоторым значениям  $m$  и  $\Delta$ , и отмечены точки с координатами  $\dot{U}'_{nN}(m, 0)$ ,  $\dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ)$  и  $\dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)$ . Искомые величины связаны с координатами точек соотношениями

$$\left. \begin{aligned} K(m) &= \frac{\dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ) + \dot{U}'_{nN}(m, 0)}{2} ; \\ R(m) &= \frac{|\dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ) - \dot{U}'_{nN}(m, 0)|}{2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

для окружностей семейства  $m = \text{const}$  и

$$\left| \text{Im } K_1(\Delta) - \text{Im } \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) \right| = R_1(\Delta); [\text{Im } K_1(\Delta)]^2 + 0,75^2 = R_1^2(\Delta) \quad (7)$$

для окружностей семейства  $\Delta = \text{const}$ . Решая последние соотношения относительно искомых величин, получим

$$\left. \begin{aligned} \text{Im } K_1(\Delta) &= \frac{\text{Im}^2 \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) - 0,5625}{2 \text{Im} \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)} ; \\ R_1(\Delta) &= \frac{\text{Im}^2 \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) + 0,5625}{2 |\text{Im} \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)|} . \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В соответствии с (2)

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_{nN}(m, 0) &= \frac{1-m}{1+2m}; \quad \dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ) = \frac{1+m}{1-2m} ; \\ \text{Im } \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) &= - \frac{0,75 \sin \Delta}{1 + \cos \Delta} . \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя выражения (9) в (6) и (8), получим формулы для определения радиусов окружностей и их центров:

$$R(m) = \frac{3m}{|1-4m^2|}; \quad K(m) = \frac{1+2m^2}{1-4m^2}; \quad (10)$$

$$R_1(\Delta) = \frac{0,75}{|\sin \Delta|}; \quad \text{Im } K_1(\Delta) = 0,75 \text{ ctg} \Delta. \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) позволяют построить оба семейства окружностей с желаемым шагом параметров  $m$  и  $\Delta$ , пользуясь лишь циркулем.

Приведенная диаграмма (рис. 1) дает наглядное представление о совместном влиянии  $m$  и  $\Delta$  на режим работы несимметричной трехфазной цепи, у которой в двух фазах включены одинаковые сопротивления. Диаграмма позволяет аналитический расчет заменить графическим, сводящимся к измерению необходимых расстояний. В качестве примера рассмотрим решение следующей задачи:

$$U_{\text{л}} = 500 \text{ В}; Z_{\text{А}} = 150 e^{j30^\circ} \text{ Ом}; Z_{\text{В}} = Z_{\text{С}} = 100 e^{-j30^\circ} \text{ Ом.}$$

Нейтральная точка  $n$  (рис. 1) определяется пересечением ок-

ружностей  $m = \frac{Z_{\text{А}}}{Z_{\text{В}}} = 1,5$  и  $\Delta = \varphi - \alpha = 60^\circ$ . Измеряя рас-

стояния от точки  $n$  до вершин и центра треугольника линейных напряжений, находим нормированные значения фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали:

$$U_{\text{а}}' = 1,27; U_{\text{б}}' = 0,64; U_{\text{с}}' = 1,21; U_{\text{нN}}' = 0,375.$$

Абсолютные значения напряжений:

$$U_{\text{а}} = U_{\text{а}}' \frac{U_{\text{л}}}{3} = 366,7 \text{ В}; U_{\text{б}} = U_{\text{б}}' \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 184,8 \text{ В};$$

$$U_{\text{с}} = U_{\text{с}}' \frac{U_{\text{л}}}{3} = 349,3 \text{ В}; U_{\text{нN}} = U_{\text{нN}}' \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 108,3 \text{ В};$$

#### Л и т е р а т у р а

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1, М., 1970.