

*Елисеева А.А.,
старший преподаватель кафедры физики, электротехники и
электроэнергетики*

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Россия, г. Пятигорск

*Палий В.А.,
старший преподаватель кафедры физики, электротехники и
электроэнергетики*

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Россия, г. Пятигорск

*Щикунов Н.Н.,
Магистрант, Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Россия, г. Пятигорск*

ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Аннотация: В статье рассматривается сравнительный анализ влияния схемы соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора на искажение симметрии первичных и вторичных линейных и фазных напряжений, так же методика определения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов.

Ключевые слова: векторная диаграмма, симметричный режим работы, несимметричный режим работы, короткое замыкание, нулевая последовательность.

Annotation: The article considers a comparative analysis of the influence of the connection scheme of a three-phase two-winding transformer on the distortion

of the symmetry of primary and secondary linear and phase voltages, as well as a method for determining the resistance of the zero sequence of transformers.

Key words: vector diagram, symmetric mode of operation, asymmetric mode of operation, short circuit, zero sequence.

Трансформаторы распределительных подстанций 6 – 10/0,4 кВ практически всегда работают на несимметричную нагрузку, поэтому их вторичные напряжения (\bar{U}_2) в различных фазах получаются неодинаковыми. В общем случае для любой фазы «j» они выражаются алгебраической разностью между напряжениями в режиме холостого хода (\bar{U}_{20j}) и падениями напряжения прямой, обратной, и нулевой последовательностей:

$$\bar{U}_{2j} = \bar{U}_{20j} - \Delta\bar{U}_{2j(1)} - \Delta\bar{U}_{2j(2)} - \Delta\bar{U}_{2(0)}$$

где – индексами в скобках обозначены симметричные составляющие.

Для упрощения анализа примем за основную фазу «А», опустим ее индексы в обозначениях симметричных составляющих, и выразим через них все составляющие других фаз, а также совместим вектора напряжений прямой последовательности. Для этого умножим все составляющие фаз «В» и «С» на единичные операторы поворота e^{j120° и e^{-j120° соответственно [1, 2]:

$$\begin{cases} \bar{U}_{2A} = \bar{U}_{20} - \Delta\bar{U}_{2(1)} - \Delta\bar{U}_{2(2)} - \Delta\bar{U}_{2(0)} \\ \bar{U}_{2B} = \bar{U}_{20} - \Delta\bar{U}_{2(1)} - \Delta\bar{U}_{2(2)}e^{-j120^\circ} - \Delta\bar{U}_{2(0)}e^{j120^\circ} \\ \bar{U}_{2C} = \bar{U}_{20} - \Delta\bar{U}_{2(1)} - \Delta\bar{U}_{2(2)}e^{j120^\circ} - \Delta\bar{U}_{2(0)}e^{-j120^\circ} \end{cases}$$

где: $k_{2I} = I_{2(2)} / I_{2(1)}$ – модуль и основной аргумент коэффициента обратной

последовательности токов нагрузки;

$Z_k = r_k + jx_k$ – сопротивление короткого замыкания трансформатора.

На рис. 1 показана векторная диаграмма, соответствующая первому уравнению этой системы. Модули $\Delta U_{2(2)}$ различных фаз равны между собой, а треугольники падения напряжений в фазах «В» и «С» развернуты по отношению к треугольнику фазы «А» на $\mp 120^\circ$. В режиме холостого хода приведенное значение вторичного напряжения равно первичному напряжению: $U_{1ном} = U'_{20}$, поэтому напряжение короткого замыкания можно выразить следующим образом: $u_k = I_{2ном} z_k / U_{20}$, а $\Delta U_{2(2)}$ определить, как $\Delta U_{2(2)} = k_{21} \beta u_k U_{20}$. Угол между векторами \bar{U}_{21} и $\Delta \bar{U}_{2(2)}$ равен: $\gamma_{A2} = \phi_k - (\phi_{21} - \alpha_2)$.

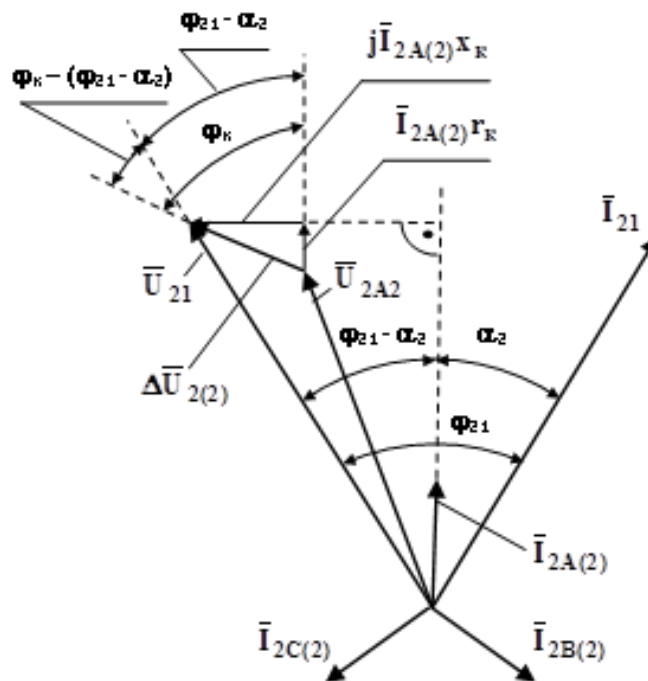


Рисунок 1. Определение выходного напряжения трансформатора с учетом токов обратной последовательности.

На основании этого по теореме косинусов составляем уравнение:

$$U_{2A2}^2 = U_{21}^2 + (k_{21} \beta u_k U_{20})^2 - 2U_{20} U_{21} k_{21} \beta u_k \cos(\phi_k - (\phi_{21} - \alpha_2))$$

Для определения напряжений в фазах «В» и «С» в уравнении (6) необходимо изменить аргумент: $\gamma_{B2} = \gamma_{A2} + 120^\circ$; $\gamma_{C2} = \gamma_{A2} - 120^\circ$. Чтобы

определить пределы, в которых могут изменяться вторичные напряжения, обратимся к графической интерпретации их уравнений (рис. 2).

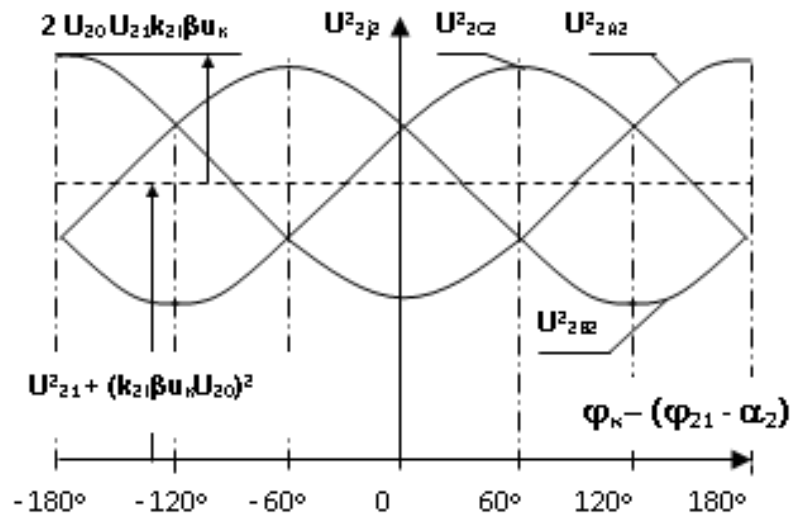


Рисунок 1. Зависимости квадратов модулей несимметричных фазных напряжений.

При неизменных значениях ϕ_k и ϕ_{21} переменные составляющие являются функциями аргумента α_2 . При любом его значении есть пределы изменения наибольшего, среднего и наименьшего напряжения. При $0 \leq \phi_k - (\phi_{21} - \alpha_2) \leq 60^\circ$ напряжение в фазе «А» имеет наименьшее значение ($U_{нм}$), в фазе «В» – среднее ($U_{ср}$), и в фазе «С» – наибольшее ($U_{нб}$). Подставляя в уравнение (6) значения углов γ_j , получаем:

$$\sqrt{U_{21}^2 + (k_{21}\beta_u U_{20})^2} - k_{21}\beta_u U_{20} U_{21} \geq U_{2нм2} \geq U_{21} - k_{21}\beta_u U_{20}$$

$$\sqrt{U_{21}^2 + (k_{21}\beta_u U_{20})^2} + k_{21}\beta_u U_{20} U_{21} \geq U_{2ср2} \geq \sqrt{U_{21}^2 + (k_{21}\beta_u U_{20})^2} - k_{21}\beta_u U_{20} U_{21}$$

$$U_{21} + k_{21}\beta_u U_{20} \geq U_{2нб2} \geq \sqrt{U_{21}^2 + (k_{21}\beta_u U_{20})^2} + k_{21}\beta_u U_{20} U_{21}$$

При $60^\circ \leq \phi_k - (\phi_{21} - \alpha_2) \leq 120^\circ$ наибольшим будет напряжение в фазе «С», средним – в фазе «А», наименьшим – в фазе «В», но пределы изменения $U_{нм}$, $U_{ср}$ и $U_{нб}$ остаются прежними. Применение неравенств (7) – (9) позволяет изображать внешние характеристики трансформаторов в виде областей возможных значений фазных напряжений (рис. 3).

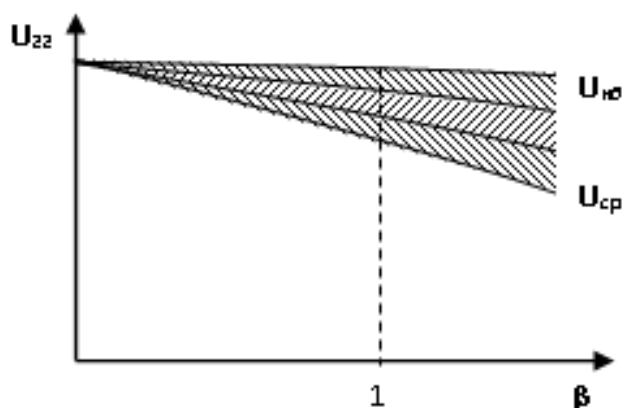


Рисунок 3. Области возможных значений фазных напряжений при отсутствии токов нулевой последовательности

Поскольку модуль коэффициента обратной последовательности не превышает единицы, вторичное напряжение можно вычислять по приближенной формуле:

$$U_{2j2} = U_{21} \left(1 - \frac{U_{20}}{U_{21}} k_{21} \beta u_{\kappa} \cos \gamma_{j2} \right) + \frac{(U_{20} k_{21} \beta u_{\kappa})^2}{2U_{21}}$$

Обычно: $k_{21} \leq 0,3$ [4,5], при этом: $\frac{1}{2} \left(\frac{U_{20}}{U_{21}} k_{21} \beta u_{\kappa} \right)^2 \ll \frac{U_{20}}{U_{21}} k_{21} \beta u_{\kappa}$, и в уравнении (10) можно ограничиться первой частью.

При отсутствии составляющих нулевой последовательности центр звезды несимметричных фазных напряжений совпадает с центром тяжести треугольника линейных напряжений [1,2,4], и связь между ними можно получить по формулам решения треугольников [2,3]:

$$\begin{cases} U_{2BC2} = \sqrt{2(U_{2B2}^2 + U_{2C2}^2) - U_{2A2}^2} \\ U_{2CA2} = \sqrt{2(U_{2C2}^2 + U_{2A2}^2) - U_{2B2}^2} \\ U_{2AB2} = \sqrt{2(U_{2A2}^2 + U_{2B2}^2) - U_{2C2}^2} \end{cases}$$

Для однофазных потребителей напряжения необходимо определять с учетом всех составляющих. При наиболее распространенном соединении обмоток трансформаторов по схеме Y/Y_0 отношение модулей сопротивлений нулевой последовательности и короткого замыкания составляет: $\frac{z_0}{z_{\kappa}} = 9 - 12$, и

падения напряжения нулевой последовательности значительно больше, чем обратной [4, 5]. Этот случай представляет наибольший интерес.

Анализ внешних характеристик целесообразно вести учитывая в первую очередь не обратную, а нулевую последовательность. Для системы координат, в которой совмещены вектора напряжений и токов прямой последовательности напряжения, полученные вычитанием составляющих падений напряжения прямой и нулевой последовательностей из напряжения холостого хода, по аналогии с системой уравнений (5) имеют вид:

$$\begin{cases} \bar{U}_{2A0} = \bar{U}_{21} - \Delta\bar{U}_{2(0)} = \bar{U}_{21} - k_{0I} \beta I_{2ном} e^{j\alpha_0} Z_0 \\ \bar{U}_{2B0} = \bar{U}_{21} - \Delta\bar{U}_{2B(0)} = \bar{U}_{21} - k_{0I} \beta I_{2ном} e^{j(\alpha_0+120^\circ)} Z_0 \\ \bar{U}_{2C0} = \bar{U}_{21} - \Delta\bar{U}_{2C(0)} = \bar{U}_{21} - k_{0I} \beta I_{2ном} e^{j(\alpha_0-120^\circ)} Z_0 \end{cases}$$

где $k_{0I} = I_{2(0)} / I_{2(1)}$, α_0 – модуль и основной аргумент коэффициента нулевой последовательности токов нагрузки; Z_0 – полное сопротивление нулевой последовательности трансформатора.

Векторная диаграмма, соответствующая первому уравнению этой системы, показана на рис. 4.

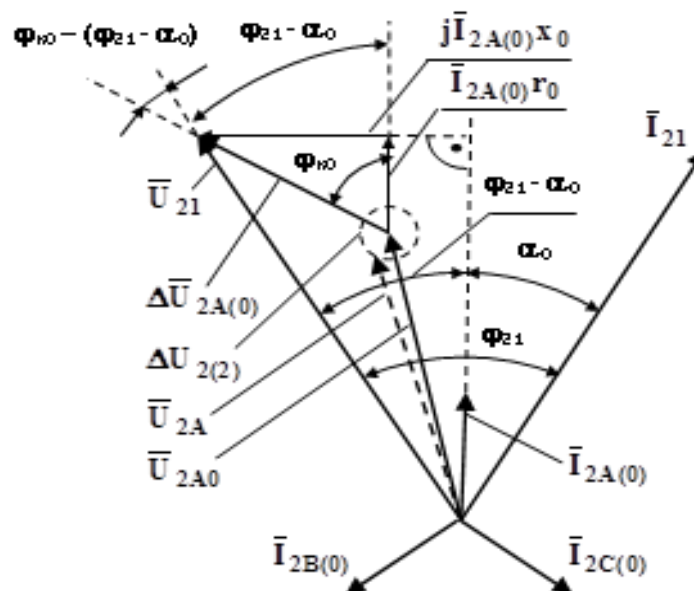


Рисунок 4. Определение выходного напряжения трансформатора с учетом токов нулевой последовательности

Модули падений напряжения нулевой последовательности $\Delta U_{2(0)}$ равны между собой и зависят от отношения $z^*_{0} = \frac{z_0}{z_k}$. Их можно найти по значению u_k : $\Delta U_{2(0)} = z^*_{0} k_{0I} \beta u_k U_{20}$. В полном треугольнике напряжений фазы «А» определены стороны U_{21} и $\Delta U_{2(0)}$, а угол между ними составляет: $\gamma_{A0} = \phi_{k0} - (\phi_{21} - \alpha_0)$. Аргументы других фаз при этом равны: $\gamma_{B0} = \gamma_{A0} + 120^\circ$ и $\gamma_{C0} = \gamma_{A0} - 120^\circ$, а уравнение для вычисления вторичных напряжений имеет вид:

$$U_{2j0} = \sqrt{U_{21}^2 + (z^*_{0} k_{0I} \beta u_k U_{20})^2 - 2U_{20}U_{21}z^*_{0} k_{0I} \beta u_k \cos \gamma_j}$$

При значительной несимметрии модули падений напряжения нулевой последовательности $\Delta U_{2(0)} = z^*_{0} k_{0I} \beta u_k U_{20}$ могут иметь довольно большое значение. В то же время, падения напряжения обратной последовательности оказывают на конечный результат относительно малое влияние, поэтому модули вторичных напряжений можно выразить в виде областей возможных значений. Геометрическим местом концов их векторов являются для каждой фазы окружности с радиусом, равным модулю $\Delta U_{2(2)}$ (рис. 4). Типичные для этого случая характеристики показаны на рис. 5.

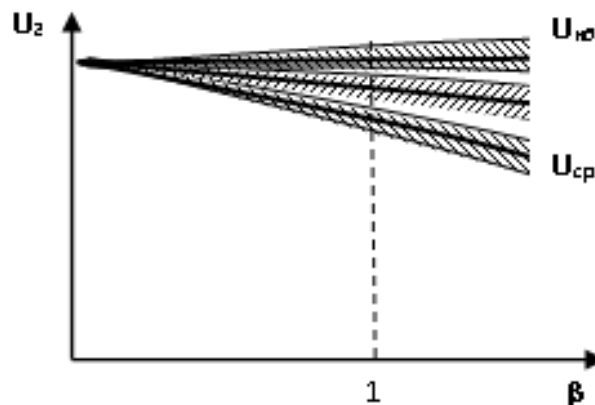


Рисунок 5. Области возможных значений фазных напряжений при наличии токов нулевой последовательности

Вследствие того, что величина $\Delta U_{2(2)}$ мала по сравнению с $\Delta U_{2(1)}$ и $\Delta U_{2(0)}$, области вероятных значений не пересекаются. Тем более справедливо

соотношение: $\Delta U_{2(2)} \ll U_{2j}$, поэтому погрешность по сравнению с точными вычислениями U_{2j} , очень мала и при реальных значениях коэффициентов загрузки β и несимметрии токов по обратной последовательности k_{21} не превышает 1%.

Полученные в результате формулы (5) – (13) могут использоваться и в том случае, если постоянными остаются значения коэффициента загрузки β , а в качестве переменных выступают модули коэффициентов несимметрии k_{21} , k_{01} или их аргументы, что представляет интерес при расчетах режимов несимметричной нагрузки трансформаторов.

Использованные источники:

1. Александров Н.Н. Электрические машины и микромашины. – М.: Колос, 1983. – 384 с.
2. Кобозев В.А., Коваленко П.В. Расчет комплексных показателей несимметрии напряжений в электрических сетях // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №4. с. 50 – 53.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: 1967.
4. Пястолов А.А. Научные основы эксплуатации электросилового оборудования. – М.: Колос, 1968. – 224 с.
5. Косоухов Ф.Д. Расчёт падений напряжения и потерь мощности в сельских распределительных сетях при несимметрии токов: Учеб. пособие. – Л.: ЛСХИ, 1982. – 73 с.