

Безъязычный В.С., Троицкий А.И.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ УСЛОВНО-ПОСТОЯННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДУЛЯ «ТРАНСФОРМАТОР – НАГРУЗКА» С ДВОЙНЫМ ПРИВЕДЕНИЕМ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Распределительные электрические сети – совокупность модулей, каждый из которых включает в себя трансформатор с его нагрузкой. Чем точнее выполнено исследование отдельного модуля, тем достовернее будет результат по их совокупности. В известных в этой области исследованиях используют Т-, Г-образные приведенные схемы замещения модулей. Наиболее точные результаты исследований оказываются при использовании Т-образных схем, но для совокупности модулей затруднено их свёртывание. Г-образные схемы с идеальными трансформаторами предоставляют возможность свёртывать совокупности модулей не только в сетях одного, но и разных классов напряжений. Однако при этом пренебрегают потерями в обмотке высокого напряжения (ВН). Гипотеза исследований заключена в том, чтобы использовать одновременно преимущества обеих схем замещения. Цель исследований – определить зависимость электропотребления модулем и потерь в трансформаторе от характера нагрузки и совершенствовать их расчёты на предмет эффективности модулей. Для целей исследования использован метод условно-постоянных коэффициентов (УПК), разработанный в ЮРГПУ (НПИ), а также двойное приведение параметров Г-образной схемы замещения модуля по аналогии с асинхронными электродвигателями в системах электропривода. Моделирование режимов электропотребления методом УПК с использованием программного комплекса MathCad позволило решить некоторые актуальные задачи в системах электроснабжения. Например, как на основе каталожных данных по коэффициенту рассеяния обмоток ВН и НН выбирать энергосберегающий трансформатор на стадии проектирования или реконструкции систем электроснабжения. Результаты исследования внедрены в городских электрических сетях г. Майкопа и в учебный процесс.

Ключевые слова: схема замещения, модуль «трансформатор – нагрузка», двойное приведение параметров, потребление и потери мощности, электрические сети, метод УПК.

ВВЕДЕНИЕ

Методы расчётов распределительных сетей постоянно совершенствуются. Например, в работах М.А. Шакирова [1-3] представлена новая теория трансформатора, базирующаяся на понятии вектора Пойтинга, и предложены методы с использованием 2Т- и 4Т-образных схем замещения трансформаторов. Метод условно-постоянных коэффициентов (УПК) разработан на предмет наиболее точного определения потребления и потерь электрической энергии [4, 5]. Его дальнейшее развитие выполнено в работах [3, 6-8].

При расчетах режимов электрических сетей, в целях упрощения свёртывания схем, применяют Г-образную схему замещения, пренебрегая потерями в обмотке высокого напряжения (ВН). Известно, что Т-образная схема замещения является наиболее точной [9-13]. Поскольку через силовые трансформаторы осуществляются транзиты больших потоков мощностей, а число их трансформаций при передаче от генераторов до приемников составляет 4-6 раз, то эту погрешность необходимо учитывать. Для чего рекомендуется метод УПК при использовании Г-образной схемы замещения модуля с двойным приведением её параметров [8].

ПОТРЕБЛЕНИЕ МОЩНОСТИ МОДУЛЕМ «ТРАНСФОРМАТОР – НАГРУЗКА» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ Г-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ С ДВОЙНЫМ ПРИВЕДЕНИЕМ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ

Полная мощность \dot{S}_{TH} модуля «трансформатор – нагрузка» (далее по тексту – «модуля») равна

$$\dot{S}_{\text{TH}} = 3U_1^2 Y_{\text{1ВХ}}^*, \quad (1)$$

где U_1 – абсолютное значение напряжения на сетевых зажимах фазы трансформатора; $Y_{\text{1ВХ}}^*$ – входная сопряженная проводимость одной фазы модуля.

Согласно работам [12, 14] входное сопротивление цепи сетевой катушки воздушного трансформатора увеличивается при подключении в цепь нагрузочной катушки приёмника за счёт вносимого им сопротивления. Поскольку оно имеет положительную вещественную часть, отрицательную мнимую часть, то подключение к нагрузочной катушке приёмника приводит к увеличению активного и уменьшению реактивного входного сопротивления цепи сетевой катушки [13] при активно-индуктивном характере нагрузки.

У трансформатора с магнитопроводом закономерность в части вносимого нагрузкой сопротивления сохраняется. При увеличении индуктивной нагрузки снижается совокупное индуктивное сопротивление модуля. Задача отыскания оптимального соотношения между индуктивными сопротивлениями трансформатора и нагрузки требует решения. В качестве критериев приняты потребление мощности модулем и потери мощности в нём.

В отличие от воздушных трансформаторов, входное сопротивление фазы трансформатора с магнитопроводом определяют, используя Т-образную или Г-образную схему замещения с приведением параметров обмотки низкого (НН) и нагрузки к ВН.

При расчетах режимов электрических сетей, в целях удобства свёртывания не только цепей одного напряжения, но и различных напряжений, используют

Г-образную схему замещения одной фазы трансформатора, пренебрегая потерями в обмотке ВН. Их учет возможен при использовании Т-образной схемы замещения. При применении Г-образной схемы с идентичной, как у Т-образной схемы, точностью по критерию потерь в работе [7] предложено двойное приведение параметров Г-образной схемы замещения двухобмоточных трансформаторов по аналогии с асинхронными электродвигателями в системах электропривода [11].

Г-образная схема замещения с двойным приведением параметров одной фазы модуля

В этом случае схема замещения одной фазы модуля имеет вид, показанный на **рис. 1** [8]:

На **рис. 1** приняты следующие обозначения:

- \dot{U}_1 – комплексное напряжение фазы на сетевых зажимах трансформатора;
- Z_0 – полное сопротивление ветви намагничивания;
- Z_1 – полное сопротивление рассеяния обмотки ВН трансформатора;
- Z'_2 – приведенное к ВН полное сопротивление рассеяния обмотки НН;
- Z'_n – приведенное к ВН полное сопротивление нагрузки;
- \dot{I}_2 – ток в цепи нагрузки схемы замещения одной фазы модуля с двойным приведением её параметров;
- \dot{I}_0 – ток в ветви намагничивания;
- \dot{I}_1 – линейный ток модуля;
- K_1 – комплексный коэффициент двойного приведения,

$$K_1 = \frac{Z_1 + Z_0}{Z_0}. \tag{2}$$

Поскольку $Z_1 \ll Z_0$, модуль K_1 имеет значение несколько большее единицы, при этом разница между абсолютным значением K_1 и единицей составляет тысячные доли. Аргумент у K_1 – угол сдвига между ЭДС и напряжением обмотки ВН. Хотя его величина составляет доли градуса, при умножении сопротивлений на коэффициент приведения изменяется их характер.

На основе схемы замещения (см. **рис. 1**) определены входные проводимость $Y_{\text{МВ}}^{\Gamma}$ (вывод её формулы здесь не приводится) и сопротивление $Z_{\text{ТВ}}^{\Gamma}$ модуля, являющееся обратной величиной входной проводимости:

$$Y_{\text{МВ}}^{\Gamma} = \frac{Z_0 + Z'_2 + Z'_n}{Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n}; \tag{3}$$

$$Z_{\text{МВ}}^{\Gamma} = \frac{Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n}{Z_0 + Z'_2 + Z'_n}. \tag{4}$$

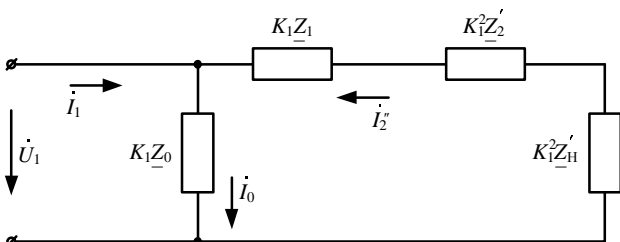


Рис. 1. Г-образная схема замещения одной фазы модуля с двойным приведением её параметров

Полная мощность модуля при использовании Г-образной схемы замещения с двойным приведением её параметров

Линейный ток в сетевой обмотке модуля равен частному от деления напряжения фазы на сопротивление $Z_{\text{ТВ}}^{\Gamma}$, а полная мощность модуля $\dot{S}_{\text{М}}$ пропорциональна квадрату абсолютного значения тока в сетевой обмотке и входному сопротивлению:

$$\dot{S}_{\text{М}} = 3I_{\text{М}}^2 Z_{\text{МВ}}^{\Gamma} = 3 \frac{U_1^2 |A|^2 B}{|B|^2 A};$$

$$A = Z_0 + Z'_2 + Z'_n;$$

$$B = Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n.$$

Сократим числитель и знаменатель дроби правой части последней формулы на комплексное алгебраическое выражение $(Z_0 + Z'_2 + Z'_n)$, после чего она принимает следующий вид:

$$\dot{S}_{\text{М}} = 3U_1^2 \frac{(Z_0^* + (Z'_2)^* + (Z'_n)^*) B}{|B|^2}, \tag{5}$$

где $Z_0^* + (Z'_2)^* + (Z'_n)^*$ – сумма сопряжённых сопротивлений ветви намагничивания и нагрузочной ветви фазы модуля.

Выполним некоторые преобразования в числителе дроби правой части формулы (5). В результате получим тождество:

$$\begin{aligned} & (Z_0^* + (Z'_2)^* + (Z'_n)^*) \times \\ & \times [Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n] = \\ & = A_1 + B_1 (Z'_n)^2 + B_{2\text{М}} r'_n + B_3 x'_n + \\ & + j [A_2 + D_1 (Z'_n)^2 + D_2 r'_n + D_{3\text{М}} x'_n], \end{aligned}$$

где $B_{2\text{М}} = Z_0^2 + 2B_2$, $D_{3\text{М}} = Z_0^2 + 2D_3$, $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, D_1, D_2, D_3$ – условно постоянные коэффициенты (УПК), представляющие собой алгебраические выражения, в состав которых входят сопротивления схемы замещения на **рис. 1**. Формулы УПК приведены в **приложении**.

Полные комплексные сопротивления знаменателя дроби в правой части формулы (5) подменим их алгебраической формой записи, а также выполним ряд алгебраических преобразований, введя дополнительно ещё некоторые обозначения:

$$\begin{aligned} & |Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n|^2 = \\ & = |G + B_1 r'_n - D_1 x'_n + j (H + D_1 r'_n + B_1 x'_n)|^2, \end{aligned} \tag{6}$$

где $G = 0,5 (B_2 - D_3)$; $H = 0,5 (D_2 + B_3)$.

Доказательство тождества (6) и вычисление квадрата абсолютного значения комплексного выражения под знаком модуля правой части тождества (6) громоздки, здесь не приводятся. При этом были использованы следующие УПК: A_3, C_1, C_2, C_3 (см. **приложение**).

С учётом принятых выше УПК формула полной мощности модуля принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{S}_m &= 3U_1^2 \frac{E + jF}{T}; \\ E &= A_1 + B_1 (\underline{Z}'_n)^2 + B_{2m} r'_n + B_3 x'_n; \\ F &= A_2 + D_1 (\underline{Z}'_n)^2 + D_2 r'_n + D_{3m} x'_n; \\ T &= A_3 + C_1 (\underline{Z}'_n)^2 + C_2 r'_n + C_3 x'_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Её компоненты активная и реактивная мощности соответственно равны реальной и мнимой составляющим комплексного выражения правой части равенства (7). Практическое использование формулы (7) возможно, если определены приведенные к ВН значения полного сопротивления нагрузки и его ортогональных составляющих. В условиях эксплуатации, как правило, известны активная и реактивная мощности нагрузки, заданные либо суточным графиком за наиболее загруженную смену, либо статическими характеристиками. Это препятствие устранимо, если для определения приведенных к ВН ортогональных составляющих и модуля сопротивления нагрузки применить формулы

$$\begin{aligned} r'_n &= U_1^2 \frac{P_n}{P_n^2 + Q_n^2}; \\ x'_n &= U_1^2 \frac{Q_n}{P_n^2 + Q_n^2}; \\ Z'_n &= \sqrt{(r'_n)^2 + (x'_n)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

и возможности блока программного комплекса Mathcad, позволяющего производить операции как со скалярными, так и с матричными величинами и легко адаптирующегося под решения спектра поставленных задач (изменения расчетных параметров).

Использование модели (7) значительно расширяют возможности исследования режимов модуля, что является безусловным преимуществом метода УПК в сравнении с другими известными методами.

ПОТЕРИ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ Г-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ С ДВОЙНЫМ ПРИВЕДЕНИЕМ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ

Потери мощности в трансформаторе складываются из потерь в ветвях намагничивания и в нагрузочных его ветвях, за исключением потерь и полных мощностей фаз нагрузки:

$$\Delta \dot{S}_\tau = 3(\underline{Z}_1 K_1 + \underline{Z}'_2 K_1^2) |i_2''|^2 + 3 \underline{Z}_0 K_1 |i_0|^2. \quad (9)$$

Первое слагаемое в правой части формулы (9) – нагрузочные потери, второе слагаемое – потери в режиме холостого хода полной мощности трансформатора.

Выполним в правой части равенства (9) алгебраические преобразования, аналогичные преобразованиям для равенства (5), получим значения потерь полной мощности в трансформаторе в нагрузочном режиме его работы, которое по форме записи аналогично уравнению (7), с той лишь разницей, что в нём произошла подмена B_{2m} и D_{3m} на УПК B_2 и D_3 .

Так как входное сопротивление модуля с использованием Г-образной схемы замещения с двойным приведением её параметров оказалось равным входно-

му сопротивлению Т-образной схемы замещения [4, 5], то формулы потерь в трансформаторе в обоих случаях оказались идентичными.

Метод УПК разработан на кафедре «Электроснабжение и электропривод» ЮРГПУ (НПИ) в 2014 году при использовании Т-образной схемы замещения в целях исследования влияния характера нагрузки на потери мощности в трансформаторах. Успешно апробирован в ряде магистерских диссертаций и при выполнении исследований аспирантами и докторантом кафедры. Материалы по использованию метода УПК составляют значительную часть учебных пособий [4, 5]. Моделирование режимов электропотребления методом УПК с использованием программного комплекса MathCad позволило решить ряд актуальных задач энергосбережения в системах электроснабжения. Например, в статье [6] наглядно показано, как на основе каталожных данных по коэффициенту рассеяния обмоток ВН и НН следует выбирать наиболее энерго-сберегающий трансформатор при проектировании или реконструкции систем электроснабжения.

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ МОДУЛЯ И ЕЁ ПОТЕРЬ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ $\underline{Z}_1 \approx \underline{Z}'_2$

Поскольку обмотки НН и ВН одной фазы стержневого трансформатора расположены коаксиально на стержнях магнитопровода, то в силу закона полного тока приведенное сопротивление обмотки НН несколько меньше сопротивления обмотки ВН. В подавляющем большинстве исследований, например в работах [4, 5, 13], их считают равными. Т-образная схема замещения одной фазы трансформатора становится симметричной, а математические модели – проще, что важно при программировании, так как УПК также принимают более компактный вид.

При этом допущении из равенства (4), если учесть формулу (3), следует, что входное сопротивление трансформатора приближённо равно $2\underline{Z}_1$, поскольку $\underline{Z}_1 / \underline{Z}_0 \rightarrow 0$ в силу неравенства $\underline{Z}_1 \ll \underline{Z}_0$, а абсолютная погрешность

$$\Delta = \frac{1 - Z_0}{Z_0 + Z_1} \quad (10)$$

зависит от коэффициента связи обмоток НН и ВН ($K_{св}$): $\Delta = 1 - K_{св}^2$. Относительная погрешность при определении сопротивлений рассеяния составляет сотые доли процента. Погрешность определения потерь в трансформаторе мощностью 25 кВА, напряжением 10 кВ при использовании Г-образной схемы замещения 1-й фазы трансформатора с одинарным приведением её параметров к ВН в сравнении со случаем двойного приведения её параметров составила 2 % по активной мощности, 1,5 % – по реактивной.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В РАБОТЕ

Модели потребления полной мощности модуля и её потерь в трансформаторе существенно расширяют возможности исследования как нормальных, так и особых режимов потребления электроэнергии в электрических распределительных сетях. В этом заключается научная новизна исследований, выполненных в данной

работе. Их применение позволяет более скрупулёзно определять потери как в самих трансформаторах, так и в их нагрузке, а также решать целый ряд специфических вопросов систем электроснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Классическая двухчленная формула потерь активной мощности, как сумма потерь мощности холостого хода (ХХ) и потерь короткого замыкания (КЗ), умноженных на квадрат коэффициента загрузки трансформатора, к сожалению, не позволяет анализировать влияние её характера. Метод УПК устраняет этот недостаток, кроме того, с его помощью возможно исследование особых режимов модуля ДТН [4, 5].

Поскольку в электрических системах и сетях широко используют Г-образную схему замещения, то оказалось целесообразным адаптировать метод УПК к расчётам с использованием Г-образной схемы замещения. Причём, таким образом, что результаты расчётов соответствовали бы расчётам по Т-образной схеме.

ПРИЛОЖЕНИЕ

$$A_1 = Z_0^2 (r_1 + r_2') + (Z_2')^2 (r_0 + r_1) + 2r_1 (r_0 r_2' + x_0 x_2');$$

$$A_2 = Z_0^2 (x_1 + x_2') + (Z_1')^2 (x_0 + x_1) + 2x_1 (r_0 r_2' + x_0 x_2');$$

$$A_3 = Z_0^2 Z_1^2 + Z_0^2 (Z_2')^2 + Z_1^2 (Z_2')^2 + 2Z_0^2 (r_1 r_2' + x_1 x_2') + 2Z_1^2 (r_0 r_2' + x_0 x_2') + 2(Z_2')^2 (r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$B_1 = r_0 + r_1;$$

$$B_2 = 2r_0 r_1 + 2r_0 r_2' + 2r_1 r_2';$$

$$B_3 = 2x_0 r_1 + 2r_0 x_2' + 2r_1 x_2';$$

$$C_1 = Z_0^2 + Z_1^2 + 2(r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$C_2 = 2Z_0^2 (r_0 + r_2') + 2Z_1^2 (r_0 + r_2') + 4r_2' (r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$C_3 = 2Z_0^2 (x_0 + x_2') + 2Z_1^2 (x_0 + x_2') + 4x_2' (r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$D_1 = x_0 + x_1;$$

$$D_2 = 2r_0 x_1 + 2x_0 r_2' + 2x_1 r_2';$$

$$D_3 = 2x_0 x_1 + 2x_0 x_2' + 2x_1 x_2';$$

$$B_{2.m} = Z_0^2 + 2r_0 r_1 + 2r_0 r_2' + 2r_1 r_2' = Z_0^2 + 2B_2;$$

$$D_{3.m} = Z_0^2 + 2x_0 x_1 + 2x_0 x_2' + 2x_1 x_2' = Z_0^2 + 2D_3;$$

$$G = 0,5(B_2 - D_3);$$

$$H = 0,5(D_2 + B_3); \quad L = r_0 + r_2';$$

$$M = x_0 + x_2'.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакиров М.А. 2Т-образные схемы замещения трансформатора // Электричество. 2010. № 5. С. 19-36.
2. Шакиров М.А. Вектор Пойтинга и новая теория трансформатора. Ч.1 // Электричество. 2014. № 9. С. 52-59.
3. Шакиров М.А. Вектор Пойтинга и новая теория трансформатора. Ч.2 // Электричество. 2014. № 10. С. 53-65.
4. Троицкий А.И., Костинский С.С. Безопасная и энергоэффективная эксплуатация систем электроснабжения: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. 244 с.
5. Троицкий А.И., Кравченко О.А. Энергосбережение в системах электроснабжения: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. 323 с.
6. Оценивание энергоэффективности трансформаторов по КПД и коэффициенту связи обмоток в зависимости от нагрузки / А.И. Троицкий, С.С. Костинский, В.В. Тропин, Н.И. Цыгулёв // Известия вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 5. С. 44-49. doi: 10.17213/0136-3360-2018-5-44-49.
7. Безязычный В.С. Двойное приведение параметров Г-образной схемы замещения двухобмоточных трансформаторов // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. Т. 1. С. 236-239.
8. Безязычный В.С., Костинский С.С., Троицкий А.И. Исследование энергоэффективности модуля «двухобмоточный трансформатор – нагрузка наружного освещения» методом условно-постоянных коэффициентов // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность: материалы научной конференции. Астрахань: Сорокин Р.В., 2020 С. 20-31.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
10. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2012. 648 с.
11. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
12. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 392 с.
13. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие / Ермуратский П.В., Косякин А.А., Листвин В.С., Нетушил А.В. М.: Высш. шк., 1986. 248 с.
14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. М.: Гардарики, 2006. 702 с.

Поступила в редакцию 15 января 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH BY THE METHOD OF CONDITIONAL CONSTANTS COEFFICIENTS OF THE TRANSFORMER – LOAD MODULE WITH DOUBLE REDUCTION OF ITS PARAMETERS

Vladimir S. Bezyazychnyy

Postgraduate Student, Power engineering department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Anatoliy I. Troitskiy

D.Sc. (Engineering), Professor, Power engineering department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Electrical distribution networks is a set of modules, each of which includes a transformer with its load. The more accurately the study of an individual module is performed, the more reliable the result will be in total. In well-known studies in this field, T-shaped and L-shaped reduced module substitution schemes are used. The most accurate research results are obtained when using T-shaped schemes, but for a set of modules, their folding is difficult. L-shaped circuits with ideal transformers provide the ability to roll up sets of modules not only in networks of the same classes, but also different voltage classes. However, the losses in the high-voltage winding (HV) are neglected. The hypothesis of the research lies in the fact that the benefits of the both circuits could be used at the same time.

The purpose of the research is to determine the dependence of the power consumption of the module and the losses in the transformer on the nature of the load and to improve their calculations for the efficiency of the modules. For the purposes of the study, the method of conditionally constant coefficients (CPC) developed at the SRSPU (NPI) was used, as well as the double reduction of the parameters of the L-shaped module replacement circuit by the analogy with asynchronous electric motors in electric drive systems.

Modeling of power consumption modes by the CPC method using the MathCad software package allowed us to solve some actual problems in power supply systems. For example, the choice of an energy-saving transformer at the stage of design or reconstruction of power supply systems based on the catalog data on the scattering coefficient of HV and HH windings.

The results of the study are implemented in the city electric networks of Maykop and in the educational process.

Keywords: substitution scheme, transformer – load module, double reduction of parameters, power consumption and loss, electrical networks, CPC method.

REFERENCES

1. Shakirov M.A. 2T-shaped transformer substitution schemes. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2010, no. 5, pp. 19-36. (In Russian)
2. Shakirov M.A. Poyting vector and the new theory of the transformer. Part 1. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2014, no. 9, pp. 52-59. (In Russian)
3. Shakirov M.A. Poyting vector and the new theory of the transformer. Part 2. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2014, no. 10, pp. 53-65. (In Russian)
4. Troitskiy A.I., Kostinskiy S.S. *Bezopasnaya i energoeffektivnaya ekspluatatsiya sistem elektrosnabzheniya* [Safe and energy-efficient operation of power supply system], Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2016. 244 p. (In Russian)

5. Troitskiy A.I., Kravchenko O.A. *Energoberezhenie v sistemakh elektrosnabzheniya* [Energy saving in power supply system]. Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2018. 323 p. (In Russian)
6. Troitskiy A.I., Kostinskiy S.S., Tropin V.V., Tsygulev N.I. Evaluation of the energy efficiency of transformers by efficiency and the coupling coefficient of windings depending on the load. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2018, vol. 61, no. 5, pp. 44-49. (In Russian). doi: 10.17213/0136-3360-2018-5-44-49.
7. Bez"yazychnyy V.S. Double reduction of the parameters of the L-shaped substitution circuit of two-winding transformers. *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi"* [Materials of the XI International Scientific and Technical Conference "Electric power industry through the eyes of youth"]. Stavropol North-Caucasus Federal University Publ., 2020, pp. 236-239. (In Russian)
8. Bez"yazychnyy V.S., Kostinskiy S.S., Troitskiy A.I. Study of the energy efficiency of the module "two-winding transformer – load of outdoor lighting" by the method of conditionally constant coefficients. *Materialy nauchnoy konferentsii "Energoeffektivnost'. Tsenologiya. Ekologiya i energobezopasnost"* [Materials of the scientific conference "Energy efficiency. Cenology. Ecology and energy security"]. Astrakhan, Sorokin R.V. Publ., 2020, pp. 20-31. (In Russian)
9. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electric machines. Introduction to electrical engineering. DC machines and transformers]. St. Petersburg, Peter Publ., 2008. 320 p. (In Russian)
10. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Transmission and distribution of electric power]. Moscow, KNORUS Publ., 2012. 648 p. (In Russian)
11. Ilyinsky N.F., Moskalenko V.V. *Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie* [Electric drive: energy and resource saving]. Moscow, Publishing center "Academy", 2008. 208 p. (In Russian)
12. Leites L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 392 p. (In Russian)
13. Ermuratskiy P.V., Kosyakin A.A., Listvin V.S., Netushil A.V. *Spravochnoe posobie po elektrotekhnike i osnovam elektroniki* [Reference manual on electrical engineering and the basics of electronics]. Moscow, Higher School of Economics Publ., 1986. 248 p. (In Russian)
14. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi*. [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2006. 702 p. (In Russian)

Безъязычный В.С., Троицкий А.И. Исследование методом условно-постоянных коэффициентов модуля «трансформатор – нагрузка» с двойным приведением его параметров // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 16-20. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-16-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-16-20)

Bezyazychnyy V.S., Troitskiy A.I. Research by the Method of Conditional Constants Coefficients of the Transformer – Load Module with Double Reduction of its Parameters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 16-20. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-16-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-16-20)