

УДК 621.321

## Разработка моделей для расчета параметров трансформатора преобразователя частоты с фольговыми обмотками с учетом вытеснения тока

А.В. Стулов<sup>1</sup>, А.И. Тихонов<sup>2</sup>, И.А. Трофимович<sup>1</sup>, К.В. Семенова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Трансформер», Московская обл., г. Подольск, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>3</sup> Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС

E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru, i.trofimovich@mail.ru, skv1\_70@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Особенностью трансформаторов для частотных преобразователей энергии является значительное влияние эффекта вытеснения тока на добавочные потери и индуктивность рассеяния на повышенных частотах (400–800 Гц), особенно при использовании фольговых обмоток. Существующие инженерные методики расчета параметров таких трансформаторов не позволяют учитывать эффекты вытеснения тока в фольговых обмотках, а предложенная ранее авторами методика расчета фольговых обмоток не адаптирована к высоким частотам. В связи с этим актуальной является разработка моделей для расчета преобразовательных трансформаторов на основе расчетов магнитного поля.

**Материалы и методы:** Использован пакет MSOffice, в который внедрена библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib. Система уравнений динамики трансформатора формируется по методу контурных токов и решается методом Рунге-Кутты. Результаты расчета сравниваются с результатами приемосдаточных испытаний опытного образца трансформатора в лаборатории ООО «Трансформер».

**Результаты:** Разработана полевая динамическая модель для расчета параметров трансформатора преобразователя частоты с фольговыми обмотками, позволяющая учитывать влияние эффекта вытеснения тока на индуктивность рассеяния и добавочные потери, что повышает точность поверочного расчета. Произведен расчет однофазного трансформатора, питающегося от преобразователя частоты в диапазоне 400–800 Гц. Исследовано влияние частоты на процессы в фольговой обмотке. Изготовлен и испытан опытный образец сухого трансформатора ОСПЧ–296/10, параметры которого соответствуют требованиям технического задания заказчика.

**Выводы:** Разработанные модели трансформаторов повышенной частоты с фольговыми обмотками, а также методы численного исследования и созданные программные средства были использованы при производстве трансформаторов преобразователей частоты. Результаты расчета подтверждены в ходе приемосдаточных испытаний. Данные средства могут выступать основным инструментом проектировщиков трансформаторов, питающихся от частотных преобразователей.

**Ключевые слова:** эффект вытеснения тока, повышенная частота, фольговые обмотки, магнитное поле, электрическая схема замещения.

## Development of models for calculating parameters of converter transformers with foil windings taking into account current displacement

A.V. Stulov<sup>1</sup>, A.I. Tikhonov<sup>2</sup>, I.A. Trofimovich<sup>1</sup>, K.V. Semenova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LLC «Transformer», Moscow region, Podolsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>3</sup> Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense

E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru, i.trofimovich@mail.ru, skv1\_70@mail.ru

### Abstract

**Background:** Transformers for energy frequency converters, especially those with foil windings, have a distinguishing feature: current displacement has a significant effect on additional losses and leakage inductance at higher frequencies (400–800 Hz). The existing engineering methods for calculating parameters of such transformers do not account for the effects of current displacement in foil windings, and the method of calculating foil windings previously proposed by the authors [8] is not adapted to high frequencies. Therefore, it is important to develop models for calculating converter transformers based on magnetic field measurement.

**Materials and methods:** The MS Office package with an integrated library of finite element magnetic field modeling EMLib was used. The system of equations of the transformer dynamics was formed by the method of contour currents and was solved by the Runge-Kutta method. The calculation results were compared with those of the acceptance tests of the prototype transformer made in the laboratory of LLC «Transformer».

**Results:** A field dynamic model has been developed for calculating the parameters of a frequency converter transformer with foil windings, accounting for the influence of the current-displacement effect on leakage inductance and additional losses, thus increasing the accuracy of the verification calculation. A single-phase transformer, powered by a frequency converter in the 400–800 Hz range, has been calculated. The influence of frequency on processes in a foil winding has been investigated. A prototype of the dry transformer OCHCH-296/10 has been manufactured and tested, with parameters meeting the requirements of the customer's technical specification.

**Conclusions:** The developed models of high-frequency transformers with foil windings, as well as numerical research methods and software tools have been used to produce frequency converter transformers. The calculation results have been confirmed by the acceptance tests. These devices can act as the main tool for designers of transformers powered by frequency converters.

**Key words:** current displacement effect, higher frequency, foil-wound windings, magnetic field, electrical equivalent circuit.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2017.6.025-032

**Введение.** Программные средства проектирования трансформаторов общего назначения в настоящее время достигли достаточно серьезного уровня. Несмотря на это, вопросы, связанные с проектированием трансформаторов, работающих в схеме с преобразователями частоты, остаются актуальными. Из отечественных работ, посвященных исследованию электромагнитных процессов в трансформаторах повышенной частоты, можно отметить работы Л.Л. Тира [1], В.В. Вологодина, А.Е. Слухоцкого [2], Ю.В. Денисова [3], П.Н. Матханова, Л.З. Гоголицына [4], из современных исследователей – С.С. Вдовина [5]. В иностранной литературе стоит отметить работы таких авторов, как Fu Wong [9], Abed N.Y., Mohammed O.A. [10], Jazebi S. De León F. [11]. В этих работах приведены теоретические и экспериментальные данные по расчету трансформаторов, работающих в схеме с преобразователями частоты и несинусоидальными формами напряжения. Необходимо отметить, что в перечисленных работах не упоминаются фольговые конструкции обмоток, находящие все более широкое применение в современной практике проектирования и производства трансформаторов ввиду своей технологичности [8]. В то же время, как выясняется, в фольговых обмотках влияние эффекта вытеснения тока приводит к увеличению плотности тока в торцевых областях фольги (ленты). Данный эффект возрастает с ростом частоты. Поэтому в трансформаторах повышенной частоты эта проблема встает особенно остро. Если учесть также, что некоторые трансформаторы проектируются с повышенной индуктивностью рассеяния, то обозначенная проблема становится определяющей.

В частности, одной из подобных задач является проектирование, изготовление и испытание опытного образца однофазного сухого трансформатора ОСПЧ-296/10, питающегося от частотного преобразователя ИРБИ912-250/130-0,4 и предназначенного для питания озонатора П-198. Параметры технического задания на проектирование приведены в таблице. Величина и форма выходного напряжения преобразователя частоты приведены на рис. 1.

Следует отметить, что при частоте 800 Гц напряжение короткого замыкания данного трансформатора составляет  $u_k = 96 \%$ , а при частоте 400 Гц –  $u_k = 48 \%$ . То есть рассеяние очень значительное, что говорит о существенном влиянии эффекта вытеснения то-

ка. Общепринятых апробированных методик расчета для данного случая не существует. Кроме того, непростой задачей является и использование современных САЕ-систем (например, Maxwell) для расчета трансформатора такого рода.

№	Параметр	Значение
1	Номинальная мощность, кВА	296
2	Номинальное напряжение, кВ:	
	– обмотка НН	0,37
	– обмотка ВН	10
3	Число фаз	1
4	Частота, Гц	400–800
5	Индуктивность рассеяния $L_{0s}$ , мкГн	$88 \pm 10 \%$
6	Ток ХХ, не менее	10 %

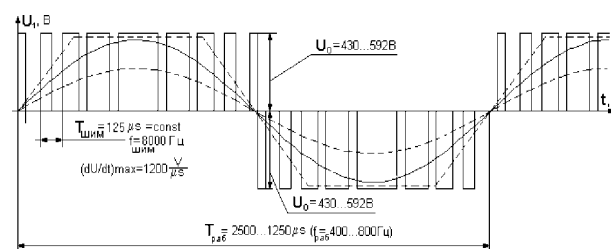


Рис. 1. Величина и форма выходного напряжения преобразователя ИРБИ912-250/130-0,4

В связи с этим необходима разработка методики расчета напряжения и потерь короткого замыкания (КЗ), предназначенной для использования в САПР силовых трансформаторов повышенной частоты с фольговыми обмотками НН.

**Методы исследования.** Для построения методики расчета были использованы теоретические положения, изложенные в [7, 8], предполагающие использование серий расчета магнитного поля на основе комбинированных моделей и библиотеки моделирования магнитного поля EMLib.

В ходе проектного расчета трансформатора было предложено решение, предполагающее использование фольговой обмотки низшего напряжения (ОНН) с числом витков  $w_1 = 13$ , выполненной из 13 концентров (по одному витку в центре) с каналами между каждым концентром (рис. 2). Обмотка высшего напряжения (ОВН) выполнена непрерывной.

Для расчета напряжения и потерь КЗ использована электрическая схема замещения, представленная на рис. 3 и соответствующая опыту КЗ.

Каждый из  $nk = 13$  концентров условно разбивается на  $ns = 11$  элементарных секций, состоящих из одного витка и соединенных параллельно. С незначительной погрешностью можно считать, что в пределах каждого концентрира эти параллельные секции не контактируют друг с другом через торцевые поверхности и электрический контакт осуществляется лишь при переходе от одного концентрира к другому.

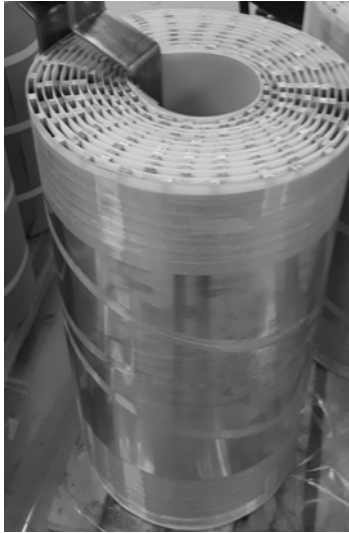


Рис. 2. ОНН трансформатора ОСПЧ-296/6

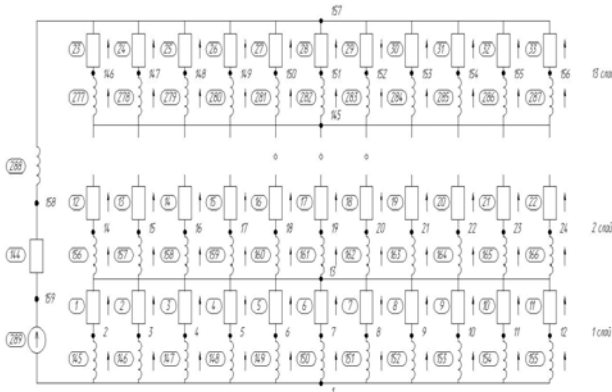


Рис. 3. Разветвленная электрическая схема замещения трансформатора ОСПЧ-296/6 в опыте короткого замыкания

Сопротивления  $s$ -й секции  $k$ -го концентрира рассчитываем по формуле

$$R_{ks} = \frac{R_1}{w_1} w_k \cdot nk, \quad (1)$$

где  $R_1$  – омическое сопротивление ОНН;  $w_k = 1$  – число витков в  $k$ -м концентре.

Приведенное сопротивление ОВН в схеме на рис. 3 рассчитывается по формуле

$$R'_2 = R_2 \frac{w_1}{w_2}, \quad (2)$$

где  $R_2$  – реальное сопротивление ОВН.

Система уравнений по методу контурных токов для схемы рис. 3 имеет вид

$$\begin{cases} u(t) + \sum_{k=1}^{nk} e_{k1} + e'_2 = i_1 R'_2 + i_1 \sum_{k=1}^{nk} R_{k1} - \sum_{k=1}^{nk} \sum_{r=2}^{ns} R_{k1} i_{kr}, \\ e_{ks} - e_{k1} = R_{ks} i_{ks} - R_{k1} i_1 + R_{k1} \sum_{r=2}^{ns} i_{kr} \end{cases} \begin{matrix} s=ns \\ s=2 \end{matrix} \begin{matrix} k=nk \\ k=1 \end{matrix}, \quad (3)$$

где  $e'_2$  – приведенная ЭДС, наводимая в ОНН;  $k$  – счетчик концентров;  $s$  – счетчик элементарных расчетных секций.

Система уравнений (3) приводится к виду

$$\begin{cases} \sum_{q=1}^n \left( L_{1q} \frac{dj_q}{dt} \right) = u(t) - i_1 R'_2 - i_1 \sum_{k=1}^{nk} R_{k1} + \sum_{k=1}^{nk} \sum_{r=2}^{ns} R_{k1} i_{fp(k,r)}, \\ \sum_{q=1}^n \left( L_{ksq} \frac{dj_q}{dt} \right) = R_{k1} i_1 - R_{ks} i_{fp(k,s)} - R_{k1} \sum_{r=2}^{ns} i_{fp(k,r)} \end{cases} \begin{matrix} s=ns \\ s=2 \end{matrix} \begin{matrix} k=nk \\ k=1 \end{matrix}, \quad (4)$$

где

$$L_{1q} \approx \frac{\Delta \Psi'_2}{\Delta i_q} + \sum_{k=1}^{nk} \frac{\Delta \Psi_{k1}}{\Delta i_q}, \quad L_{ksq} \approx \frac{\Delta \Psi_{sk}}{\Delta i_q} - \frac{\Delta \Psi_{s1}}{\Delta i_q} \quad (5)$$

– коэффициенты индуктивной связи контуров с током, определяемые из расчета магнитного поля методом конечных элементов;  $\Psi$  – потокосцепления соответствующих контуров;  $n = (ns - 1)nk + 1$  – количество независимых контуров;

$$fp(k, s) = (k - 1)(ns - 1) + s \quad (6)$$

– функция пересчета двойного индекса (номер концентрира, номер секции) в одинарный (номер контура с током);

$$fk(p) = \text{int} \left( \frac{p-2}{ns-1} \right) + 1 \quad (7)$$

– функция расчета первой позиции двойного индекса из одинарного;

$$fs(p) = p - fp(fk(p), 2) + 2 \quad (8)$$

– функция расчета второй позиции двойного индекса из одинарного.

Расчет коэффициентов (5) осуществляется с помощью библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib. Для этого в среде MSExcel создана подсистема автоматической генерации модели, рассчитанной на произвольное количество и геометрические размеры концентров и расчетных секций. Фрагмент сгенерированной модели представлен на рис. 4.

Вычисление коэффициентов (5) осуществляется с помощью макроса VBA, реализующего серию расчетов магнитного поля средствами библиотеки EMLib (рис. 5).

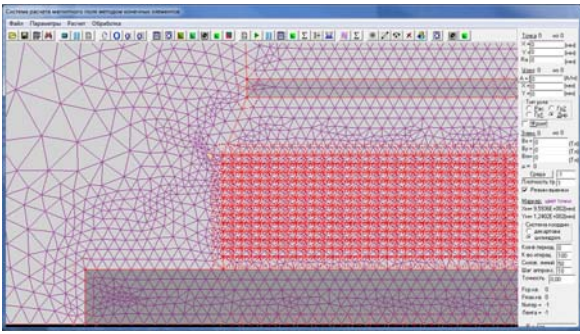


Рис. 4. Фрагмент конечно-элементной модели окна трансформатора ОСГЧ

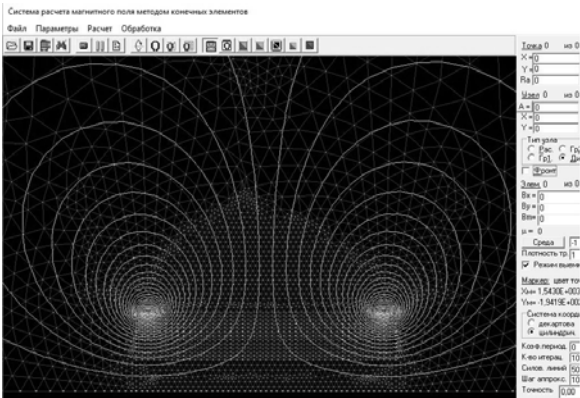


Рис. 5. Результат единичного расчета магнитного поля с использованием библиотеки EMLib

Построенная таким образом система уравнений (4) преобразуется к каноническому виду Коши

$$\left[ \frac{di}{dt} \right] = [L]^{-1} [U] \quad (9)$$

и решается методом Рунге-Кутты с постоянным шагом интегрирования. Результатом решения являются мгновенные значения тока трансформатора  $i(t)$  и токов контуров в зависимости от времени. По ним рассчитываются зависимости от времени мгновенных токов в расчетных сечениях  $i_{ks}(t)$  при подаче на вход напряжения КЗ.

**Результаты исследования.** Полученная из расчета кривая изменения мгновенных значений тока трансформатора в опыте КЗ  $i(t)$  приведена на рис. 6.

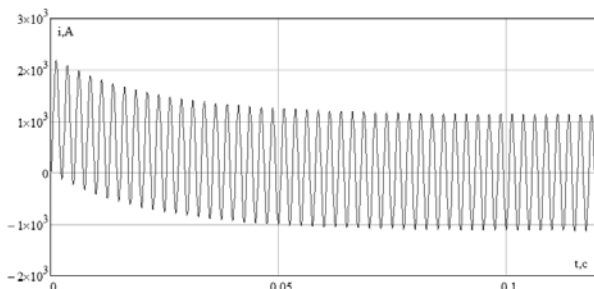


Рис. 6. Изменение во времени тока в ОНН при подаче на вход напряжения КЗ

На рис. 7 приведено распределение мгновенных значений токов в расчетных сечениях разных концентраторов при  $t = 0,12$  с, то есть после завершения переходного процесса. Эффект вытеснения тока наиболее существенно сказывается на последнем концентре ОНН, где ток течет практически только по торцевым областям концентратора.

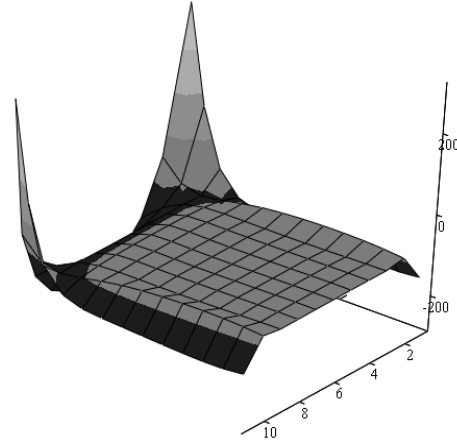


Рис. 7. Распределение мгновенных значений токов в расчетных сечениях при  $t = 0,12$  с

Картина распределения мгновенных значений тока в последнем концентре за три последних периода приведена на рис. 8, 9. Хотя в каждый момент времени по концентру протекает тот же ток, что и по другим концентраторам, но, ввиду различия фаз токов в соседних расчетных сечениях последнего концентратора, амплитуда токов в каждой расчетной секции достигает значений в 350 А при амплитудном значении тока всей обмотки  $i_m = 1131$  А.

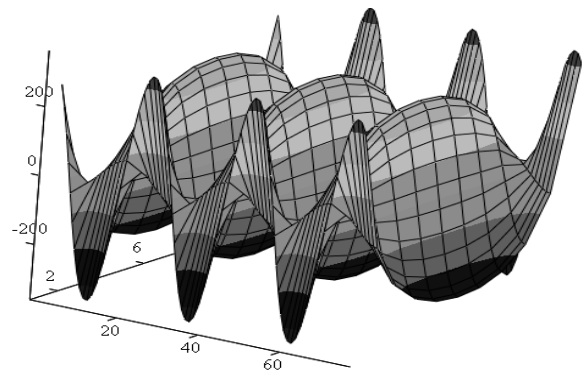


Рис. 8. Распределение мгновенных значений токов в расчетных сечениях последнего концентратора на трех последних периодах

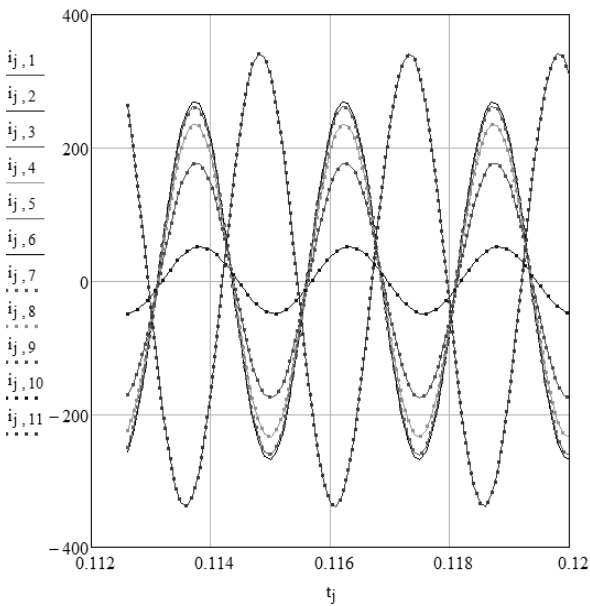


Рис. 9. Графики мгновенных значений токов в расчетных сечениях последнего центра на трех последних периодах

Это приводит к тому, что распределение по расчетным сечениям действующих значений тока в опыте короткого замыкания оказывается таким (рис. 10), что наиболее нагруженным в тепловом отношении становится именно последний 13-й цилиндр, что еще более явно демонстрируют кривые распределения теплотер по расчетным сечениям фольговой обмотки (рис. 11), которые в определенном смысле повторяют характер кривых на рис. 10, но с учетом квадратичной зависимости от токов.

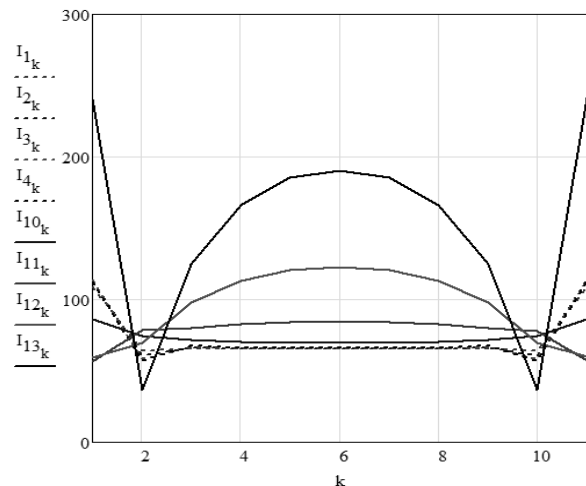


Рис. 10. Распределение по расчетным сечениям и центрам действующих значений тока

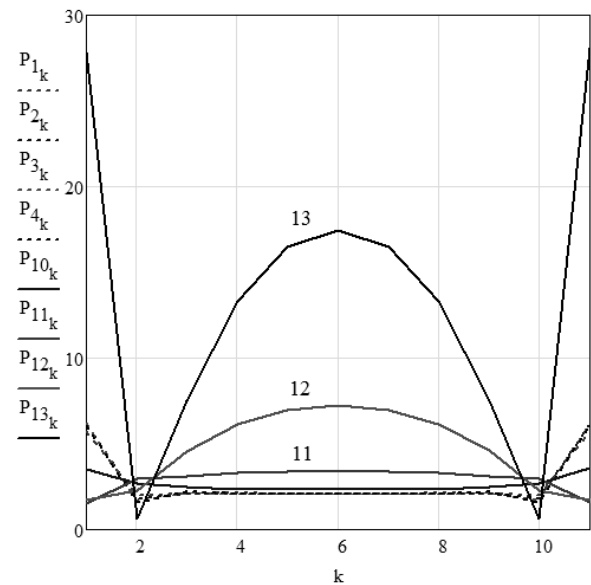


Рис. 11. Распределение по расчетным сечениям и центрам теплотер

Подбирая  $u_k$  таким образом, чтобы результирующий ток был равен номинальному току трансформатора, получаем в итоге уточненное значение напряжения КЗ. Уточненные потери КЗ находим суммируя потери во всех расчетных сечениях и потери в ОВ:

$$P_k = \sum_{k=1}^{nk} \sum_{s=1}^{ns} I_{ks}^2 R_{ks} + I_1^2 R'_2 K_{d2}, \quad (10)$$

где  $K_{d2}$  – коэффициент добавочных потерь, найденный по стандартной инженерной методике [12].

Следует отметить, что коэффициент добавочных потерь  $K_d$  в фольговых обмотках НН существенно зависит от частоты  $f$ . В частности, на рис. 12 приведена полученная на данной модели кривая:

$$K_d(f) = \frac{\sum_{k=1}^{nk} \sum_{s=1}^{ns} I_{ks}^2 R_{ks}}{I_1^2 R_1}, \quad (11)$$

где  $R_1$  – омическое сопротивление ОНН.

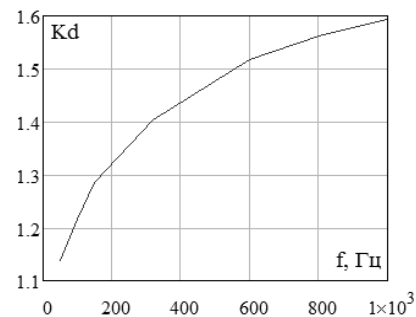


Рис. 12. Зависимость коэффициента добавочных потерь в фольговой обмотке от частоты

Полученная кривая может быть использована при проектировании аналогичных трансформаторов с фольговыми обмотками. Однако не следует забывать, что на данный

коэффициент существенно влияет расположение и геометрия обмотки ВН.

Аналогичным образом полученная кривая зависимости индуктивности рассеяния трансформатора от частоты  $L(f)$  представлена на рис. 13. Влияние эффекта вытеснения тока приводит к некоторому изменению индуктивности, что невозможно учесть при использовании современных инженерных методик расчета.

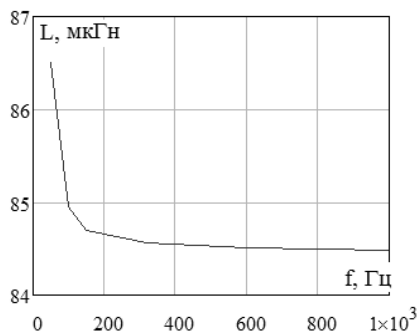


Рис. 13. Зависимость индуктивности рассеяния трансформатора от частоты

По полученным расчетным данным был изготовлен и испытан опытный образец трансформатора (рис. 14).

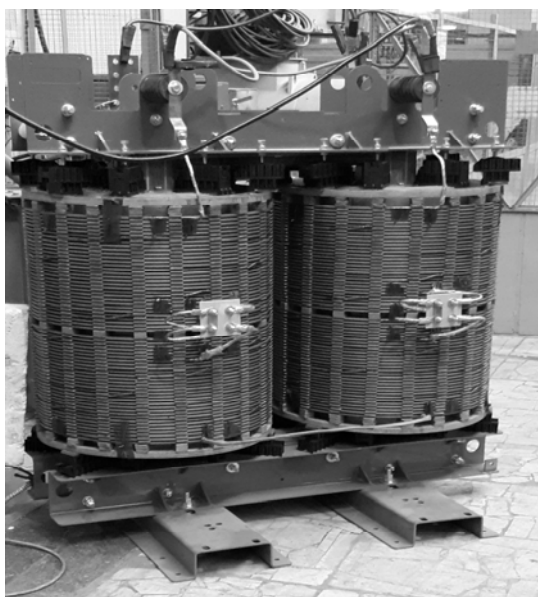


Рис. 14. Опытный образец трансформатора ОСПЧ-296/10

По результатам приемосдаточных испытаний опытного образца получено расхождение с расчетом по индуктивности рассеяния

$$\delta L_{\sigma} = \frac{L_{\sigma\text{э}} - L_{\sigma\text{р}}}{L_{\sigma\text{э}}} 100\% = \frac{91,6 - 87,6}{91,6} 100\% = 4,3\%, \quad (12)$$

где  $L_{\sigma\text{э}}$ ,  $L_{\sigma\text{р}}$  – индуктивности рассеяния, полученные экспериментальным и расчетным путем соответственно.

При этом полученное значение мало зависит от точности модели, определяемой количеством расчетных секций в центре  $ns$ .

Расхождение результатов измерения потерь короткого замыкания с расчетным значением оказалось более существенным. Причем результат расчета существенно зависел от точности модели. При этом расхождение с экспериментом с ростом точности модели асимптотически стремилось к  $\delta P_k = 15\%$ . Данное расхождение объясняется, по-видимому, тем, что предложенная модель не учитывает вытеснения тока в ОВН и коэффициент  $K_{\sigma 2}$  в (10) выбирался по [12], что вряд ли оправдано при повышенных частотах.

**Выводы.** Разработанная модель позволяет с необходимой степенью точности проводить численный расчет одного из основных параметров преобразовательного трансформатора, рассчитанного на  $f = 400 - 800$  Гц, а именно индуктивности рассеяния, а следовательно, и напряжения короткого замыкания. Есть основания утверждать также, что данная модель может быть использована для уточненного расчета потерь короткого замыкания, а следовательно, и коэффициента добавочных потерь в фольговых обмотках. В то же время данная модель должна быть доработана в вопросах уточненного расчета потерь короткого замыкания в обмотках из круглого и прямоугольного провода на повышенных частотах, что не может быть отражено в рамках предложенного математического аппарата.

Трансформатор, спроектированный с использованием предложенной методики, в полной мере соответствует техническому заданию заказчика. Предлагаемые модели и методы могут быть использованы при проектировании серий специальных трансформаторов: с фольговыми обмотками НН; с большим рассеянием, работающих на повышенной частоте.

Разработанные и использованные в проектировании модели трансформаторов повышенной частоты с фольговыми обмотками, а также методы численного исследования и созданные программные средства доказали свою эффективность и могут выступать основным инструментом проектировщиков в процессе создания трансформаторов, питающихся от частотных преобразователей.

#### Список литературы

1. Тир Л.Л. Трансформаторы для установок индукционного нагрева повышенной частоты. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 240 с.
2. Вологдин В.В., Слухоцкий А.Е. Трансформаторы для высокочастотного нагрева. – М.: Машгиз, 1957.
3. Денисов Ю.В. Трансформатор высокой частоты без самоиндукции рассеяния во вторичной обмотке // Электричество. – 1940. – № 6.

4. **Матханов П.Н., Гоголицын Л.З.** Расчет импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия, 1980. – 112 с.

5. **Вдовин С.С.** Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.

6. **Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.** Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

7. **Стулов А.В., Тихонов А.И., Корнев И.А.** Подсистема САПР для расчета потерь короткого замыкания в фольговых обмотках распределительных трансформаторов с учетом вытеснения тока // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 71–74. doi: 10.17588/2072-2672.2015.2.071-074

8. **Тихонов А.И.** Математическое моделирование электромагнитных процессов в фольговых обмотках трансформаторов и токоограничивающих реакторов. – Иваново, 2015. – 79 с.

9. **Fu Wong.** High frequency transformer for switching mode power supply, Ph.D. dissertation, Griffith University, Australia, March 2004.

10. **Abed N.Y., Mohammed O.A.** Physics-based high-frequency transformer modeling by finite elements // IEEE Trans. Magn. – Aug. 2010. – Vol. 46, no. 8. – P. 3249–3252.

11. **Jazebi S. De León F.** Duality-Based Transformer Model Including Eddy Current Effects in the Windings // IEEE Transactions on power delivery. – October 2015. – Vol. 30, no. 5. – P. 2312–2320.

12. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

#### References

1. Tir, L.L. *Transformatory dlya ustanovok induktsionnogo nagreva povyshennoy chastoty* [Transformers for high-frequency inductance heating equipment]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1961. 240 p.

2. Vologdin, V.V. Slukhotsky, A.E. *Transformatory dlya vysokochastotnogo nagreva* [Transformers for high-frequency heating]. Moscow, Mashgiz, 1957.

3. Denisov, Yu.V. Transformator vysokoy chastoty bez samoinduksii rasseyaniya vo vtorichnoy obmotke [High frequency transformer without magnetic leakage self-induction in the secondary winding]. *Elektrichestvo*, 1940, no. 6.

4. Matkhanov, P.N., Gogolitsyn, L.Z. *Raschet impul'snykh transformatorov* [Calculation of pulse transformers]. Leningrad, Energiya, 1980. 112 p.

5. Vdovin, S.S. *Proektirovanie impul'snykh transformatorov* [Design of pulse transformers]. Leningrad, Energoatomizdat, 1991. 208 p.

6. Kalantarov, P.L., Tseitlin, L.A. *Raschet induktivnostey* [Calculation of inductance]. Leningrad, Energoatomizdat, 1986. 488 p.

7. Stulov, A.V., Tikhonov, A.I., Kornev, I.A. Pod-sistema SAPR dlya rascheta poter' korotkogo замыкания в фольговых обмотках распределительных трансформаторов с учетом вытеснения тока [The CAD subsystem of distribution transformers for calculation of load losses in foil windings accounting for current displacement]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 71–74. doi: 10.17588/2072-2672.2015.2.071-074.

8. Tikhonov, A.I. *Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v fol'govykh obmotkakh transformatorov i tokoogranichivayushchikh reaktorov* [Mathematical modeling of electromagnetic processes in foil-wound windings of transformers and current-limiting reactors]. Ivanovo, 2015. 79 p.

9. Fu, Wong. High frequency transformer for switching mode power supply, Ph.D. dissertation, Griffith University, Australia, March 2004.

10. Abed, N.Y., Mohammed, O.A. Physics-based high-frequency transformer modeling by finite elements. *IEEE Trans. Magn.*, Aug. 2010, vol. 46, no. 8, pp. 3249–3252.

11. Jazebi, S. De León F. Duality-Based Transformer Model Including Eddy Current Effects in the Windings. *IEEE Transactions on power delivery*, October 2015, vol. 30, no. 5, pp. 2312–2320.

12. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 528 p.

*Стулов Алексей Вадимович*,  
ООО «Трансформер»,  
кандидат технических наук, заместитель генерального директора по техническому развитию,  
e-mail: alxstl@mail.ru  
*Stulov Aleksei Vadimovich*,  
LLC «Transformer»,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Deputy CEO for Technical Development,  
e-mail: alxstl@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики,  
e-mail: ait@dsn.ru  
*Tikhonov Andrei Ilyich*,  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of the Physics Department,  
e-mail: ait@dsn.ru

*Трофимович Иван Анатольевич*,  
ООО «Трансформер»,  
главный конструктор,  
e-mail: i.trofimovich@mail.ru

*Trofimovich Ivan Anatolyevich,*  
LLC «Transformer»,  
Chief Designer,  
e-mail: i.trofimovich@mail.ru

*Семенова Ксения Васильевна,*  
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности объектов защиты,  
e-mail: skv1\_70@mail.ru

*Semenova Ksenia Vasilyevna,*  
Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Fire Safety of Protected Objects,  
e-mail: skv1\_70@mail.ru