

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСПОЗИЦИИ ОБМОТКИ В ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕМ РЕАКТОРЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОЙ ЛЕНТЫ

А.И. ТИХОНОВ, Г.В. ПОПОВ, доктора техн. наук, А.В. ИВАНОВ, асп.

Рассмотрено решение задачи расчета распределения тока в реакторе из алюминиевой ленты с учетом эффекта вытеснения тока при наличии разбиения фазной обмотки на галеты с транспонированием проводника. Выявлено, что транспозиция не приводит к выравниванию тока по высоте обмотки.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, транспонирование массивного проводника, математическое моделирование.

WINDING TRANSPOSITION FEATURES IN CURRENT-LIMITING REACTOR MADE FROM ALUMINIUM TAPE

A.I. TIKHONOV, G.V. POPOV, Doctors of Engineering, A.V. IVANOV, Post Graduate Student

The authors consider the solution of calculation tasks of current distribution in the reactor made from aluminium tape with the current displacement effective with phase winding decomposition on the deck transposition conductor. It is proved that transposition doesn't cause the current equalization according to the winding height.

Keywords: short-circuit current, transposition of massive conductor, mathematical modelling.

Одно из наиболее важных достоинств математического моделирования – возможность выявления таких особенностей исследуемых явлений, которые невозможно предсказать на основе классических представлений. В качестве примера приведем результаты исследования способов совершенствования конструкции токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты.

Токоограничивающие реакторы используются для снижения токов короткого замыкания энергосистем. В настоящее время осуществляются попытки снизить их себестоимость путем использования прогрессивных технологий изготовления обмоток из алюминиевой ленты. Однако, как показывает практика и результаты математического моделирования [1, 2, 3], в обмотках реактора из ленты сильны эффекты вытеснения тока (рис. 1), что приводит к разрушению изоляции из-за перегрева торцевых частей обмотки.

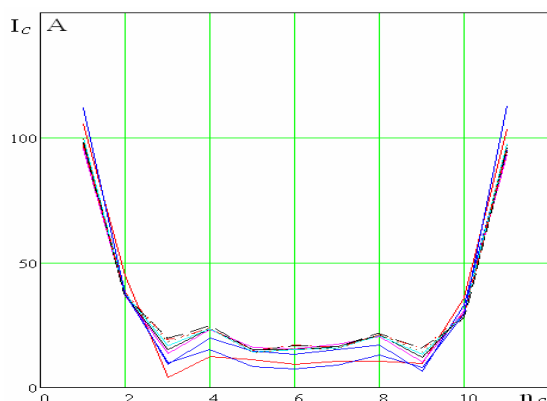


Рис. 1. Эпюры распределения тока по высоте ленты в разных концентраторах фазной обмотки реактора из ленты

Традиционно в таких случаях для уменьшения вытеснения тока используется транспонирование

массивного проводника. Это приводит к идее разбиения обмотки реактора галеты с транспонированием проводника в охлаждающих каналах (рис. 2, 3). Этот прием можно было бы технологически проработать при условии получения ожидаемого эффекта – выравнивания распределения тока по высоте проводника.

Математическая модель фазной обмотки реактора из ленты, позволяющая учесть эффекты вытеснения тока, подробно рассмотрена в [1, 2, 3]. Модель была переработана, после чего стало возможным рассчитывать несколько фазных обмоток, построенных из отдельных галет с транспозицией и без. Для случая трех галет схема замещения имеет вид, представленный на рис. 3.

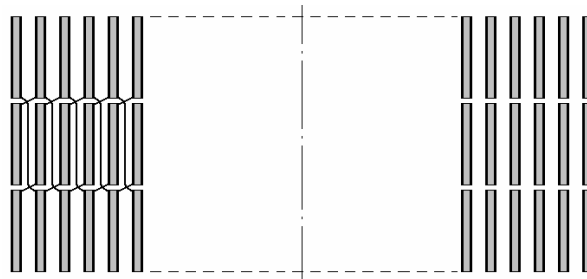


Рис. 2. Сечение транспонированной фазной обмотки реактора из ленты

Каждая из nf галет обмотки в пределах каждого из ns концентраторов мысленно разбивается на nk расчетных секций (рис. 3, $nf = 3$, $ns = 6$, $nk = 5$). Система уравнений в символьном виде по методу контурных токов имеет следующий вид:

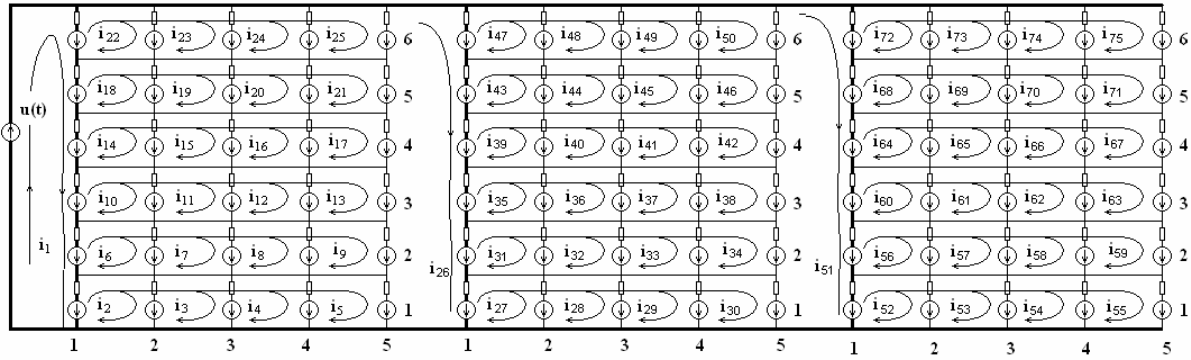


Рис. 3. Схема трехфазной обмотки реактора из алюминиевой ленты

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{q=1}^n \left(\sum_{s=1}^{ns} \frac{\partial \Psi_{ms1}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q + i_{fp(m,1,1)} \cdot \sum_{s=1}^{ns} R_{ms1} + \\ & + R_0 \cdot \sum_{q=1}^{nf} i_{fp(q,s,r)} - \sum_{s=1}^{ns} \sum_{r=2}^{nk} R_{ms1} \cdot i_{fp(m,s,r)} = \dot{U}, \\ & \sum_{q=1}^n \left(\frac{\partial \Psi_{msk}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{ms1}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q - R_{ms1} \cdot i_{fp(m,1,1)} + \\ & + R_{msk} \cdot i_{fp(m,s,k)} + R_{ms1} \cdot \sum_{r=2}^{nk} i_{fp(m,s,r)} = 0 \end{aligned} \right. \left. \begin{array}{l} m=1 \\ \dots \\ m=nf \\ k=2 \\ \dots \\ k=nk \\ s=1 \\ \dots \\ s=ns \end{array} \right.$$

В матричной форме данная система уравнений принимает вид

$$[i] = [Z]^{-1} [\dot{U}], \quad (1)$$

где $[Z]$ – квадратная матрица полных сопротивлений; $[i]$ – вектор контурных токов; $[\dot{U}]$ – вектор напряжений.

Коэффициенты матрицы $[Z]$ рассчитываются по формулам:

1) при $p - (fm(p) - 1) \cdot n = 1$

$$Z_{p,q} = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{s=1}^{ns} \left(j\omega \frac{\partial \Psi_{fm(p),s,1}}{\partial i_q} + \left\{ \begin{array}{l} R_{fm(p),s,1} \forall \{q | q = p\} \\ 0 \forall \{q | q \neq p\} \end{array} \right\} \right) - \\ & \left\{ \begin{array}{l} R_{fm(p),fs(q),1} \forall \{q | p+1 \leq q \leq p+n-1\} \\ 0 \forall \{q | -(p+1 \leq q \leq p+n-1)\}; \end{array} \right. \end{aligned} \right.$$

2) при $p - (fm(p) - 1) \cdot n \neq 1$

$$Z_{p,q} = \left\{ \begin{aligned} & j\omega \left(\frac{\partial \Psi_{fm(p),fs(p),fk(p)}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{fm(p),fs(p),1}}{\partial i_q} \right) + \\ & \left\{ \begin{array}{l} -R_{fm(p),fs(p),1} \forall \{q | q - (fm(p) - 1) \cdot n = 1\} \\ R_{fm(p),fs(p),1} \forall \left\{ q \left| \begin{array}{l} fm(q) = fm(p) \wedge fs(q) = fs(p) \wedge \\ \wedge 2 \leq fk(q) \leq nk \end{array} \right. \right\} \\ 0 \forall \left\{ q \left| \begin{array}{l} q - (fm(p) - 1) \cdot n \neq 1 \wedge (fm(q) \neq fm(p) \vee \\ \vee fs(q) \neq fs(p) \vee \neg(2 \leq fk(q) \leq nk)) \end{array} \right. \right\} \end{array} \right. \\ & \left. + \left\{ \begin{array}{l} R_{fm(p),fs(p),fk(p)} \forall \{q | q = p\} \\ 0 \forall \{q | q \neq p\}. \end{array} \right. \right. \end{aligned} \right.$$

Здесь сопротивления R и потокосцепления Ψ имеют тройные индексы: первый – номер галеты; второй – номер концентратора; третий – номер расчетной секции; количество уравнений для одной галеты: $n = (nk - 1)ns + 1$; общее количество уравнений: $nu = n \cdot nf$; функция пересчета тройного индекса секции в одинарный номер контура: $fp(m, s, k) = (m - 1) \cdot (ns \cdot (nk - 1) + 1) + (s - 1) \cdot (nk - 1) + k$; функция расчета первого слагаемого тройного индекса по одинарному номеру контура:

$$fm(p) = \text{int} \left(\frac{p - 1}{ns \cdot (nk - 1) + 1} \right) + 1;$$

для второго слагаемого:

$$fs(p) = \text{int} \left(\frac{p - 2 - (ns \cdot (nk - 1) + 1) \cdot (fm(p) - 1)}{nk - 1} \right) + 1;$$

для третьего слагаемого:

$$fk(p) = p - fp(fm(p), fs(p), 2) + 2;$$

коэффициент индуктивной связи секции с индексами msk с током q -го контура равен сумме взаимных индуктивностей данной секции со всеми nq секциями, входящими в q -й контур:

$$\frac{d\Psi_{msk}}{\partial i_q} = \sum_{r=1}^{nq} K_r \frac{d\Psi_{msk}}{\partial i_r}, \quad (2)$$

где m – номер галеты; s – номер концентратора; k – номер расчетной секции в концентрате; $K_r = 1$, если направление обхода q -го контура совпадает с положительным направлением r -й секции, в противном случае $K_r = -1$.

Матрица напряжений строится из элементов

$$\dot{U}_q = \left\{ \begin{array}{l} \dot{U} \forall \{p | p - (fm(p) - 1) \cdot n = 1\}, \\ 0 \forall \{p | p - (fm(p) - 1) \cdot n \neq 1\}, \end{array} \right.$$

где \dot{U} – напряжение, поданное на обмотку.

Как предложено в [3], частные производные $d\Psi_{msk} / \partial i_r$ в (2) рассчитывались с использованием зависимости $L(R_1, R_2, X)$, построенной по результатам серии численных расчетов магнитного поля, создаваемого контуром, аппроксимированной трехмерными сплайнами (R_1 – радиус контура с током; R_2 – радиус индуктивно связанного контура; X – расстояние между контурами по оси).

Учет транспонирования проводника осуществлялся при построении системы уравнений (1) путем соответствующего пересчета индексов

расчетных секций при переходе из одного центра в другой. Количество галет, на которые разбивается обмотка, не ограничено. Алгоритм расчета был реализован в среде MatLab.

Анализ результатов серии расчетов позволил сделать ряд выводов:

1. Как и ожидалось, картина распределения тока по высоте обмотки при наличии разбиения обмотки на галеты без транспонирования (рис. 4) мало отличается от картины, полученной без разбиения на галеты (рис. 5) (рис. 3, 4, по оси X откладывается номер расчетной секции по высоте проводника, по оси Y – номер центра). При этом эффект вытеснения тока принципиально не устраняется.

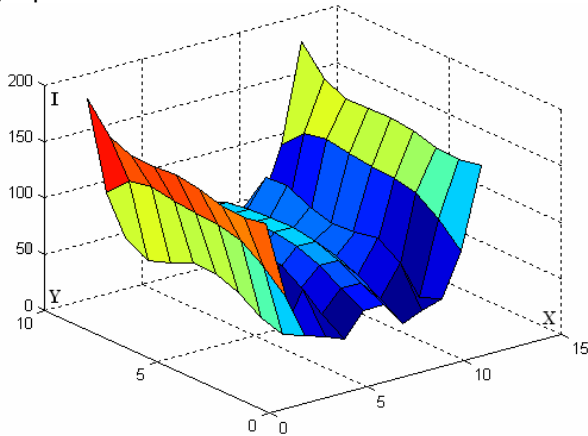


Рис. 4. Распределение тока I по высоте проводника (ось X) и центрам (ось Y) при разбиении фазной обмотки на три галеты без транспонирования

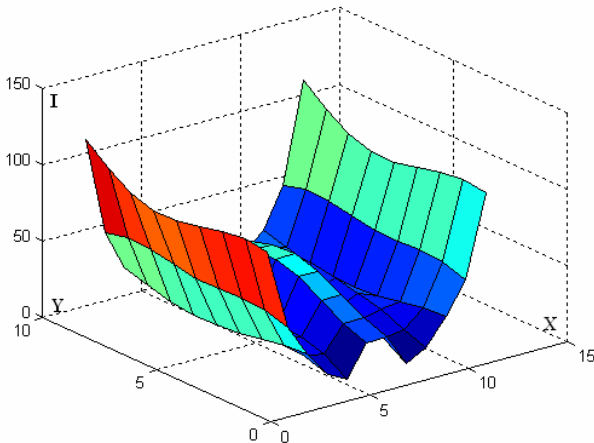


Рис. 5. Распределение тока I по высоте проводника (ось X) и центрам (ось Y) в случае без разбиения фазной обмотки на галеты

2. Картина распределения тока в обмотке, разбитой на галеты с транспонированием (рис. 6), не устраняет эффекта вытеснения тока. Этот вывод является неожиданным, так как на первый взгляд противоречит теории. Применение других схем транспозиции также не дает эффекта выравнивания тока.

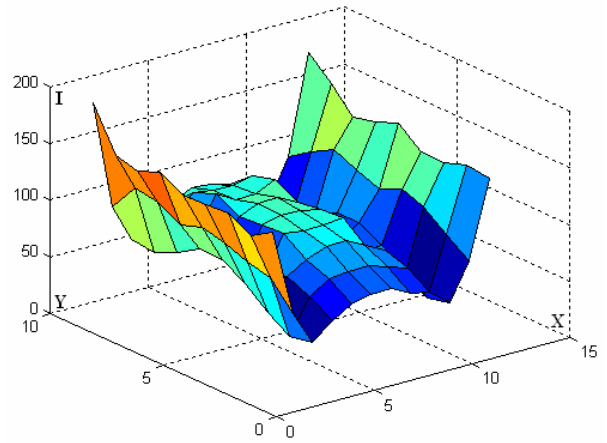


Рис. 6. Распределение тока I по высоте проводника (ось X) и центрам (ось Y) при разбиении фазной обмотки на три галеты с транспонированием

3. Полученный эффект объясняется особым распределением активной и реактивной составляющих тока, протекающего по разным расчетным секциям (рис. 7). Анализ показывает, что полученный эффект, делающий транспозицию проводника неэффективной, возникает только при малом значении омического сопротивления реактора, по сравнению с его индуктивным сопротивлением. При увеличении омического сопротивления транспозиция приводит к ожидаемому эффекту.

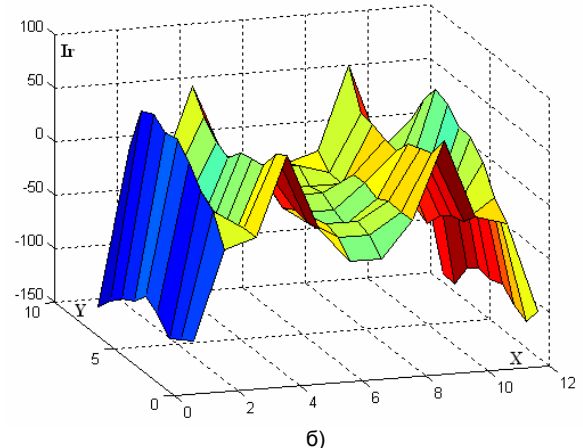
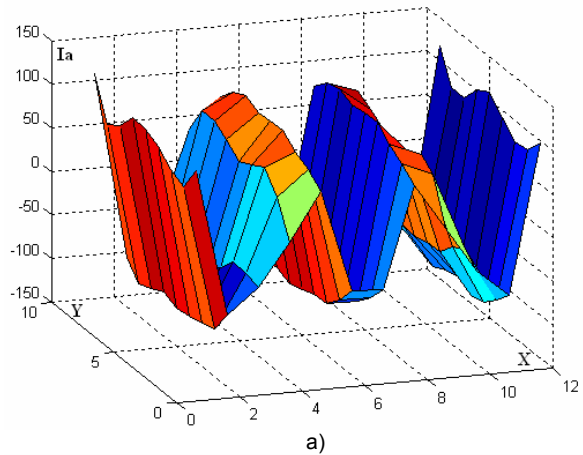


Рис. 7. Распределение активной I_a (а) и реактивной I_r (б) составляющих тока по высоте проводника (ось X) и центрам (ось Y) в транспонированной обмотке

Таким образом, при малом омическом сопротивлении проводника транспозиция не приводит к желаемому эффекту, что требует поиска новых решений. Вывод получен на основе результатов математического моделирования, что позволило избежать излишних затрат на создание опытных образцов продукции.

Список литературы

1. **Тихонов А.И., Иванов А.В.** Использование библиотеки моделирования магнитного поля при расчете реактора

Тихонов Андрей Ильич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой физики,
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

Попов Геннадий Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности,
телефон (4932) 26-99-39,
e-mail: popov@bjd.ispu.ru

Иванов Александр Валерьевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности,
телефон (4932) 26-99-37,
e-mail: bjd@ispu.ru

из алюминиевой ленты // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 25–28.

2. **Тихонов А.И., Иванов А.В.** Расчет и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010.

3. **Тихонов, А.И., Попов Г.В., Иванов А.В.** Система автоматизированного проектирования токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 55–58.