

Орловський І. А., Блохін І. В.

Синтез математичної моделі двохмасової електромеханічної системи з люфтом у вигляді модифікованої рекурентної нейронної мережі

За даними режиму роботи обладнання розроблено методику синтезу математичної моделі у вигляді модифікованої рекурентної нейронної мережі двомасової електромеханічної системи, що містить двигун постійного струму послідовного збудження, пружність, демпфування і люфт у механічній передачі.

Ключові слова: математична модель, рекурентна нейронна мережа, люфт, двомасова електромеханічна система, двигун постійного струму послідовного збудження.

Orlovsky I. A., Blokhin I. V.

Synthesis of mathematical model of two-mass electromechanical system with backlash in the form of modified recurrent neural network

Based on the equipment operating data the technique of mathematical model synthesis has been developed in the form of a modified recurrent neural network of the two-mass electromechanical system including a DC motor of series excitation, elasticity, damping and backlash in the mechanical transmission.

Key words: mathematical model, recurrent neural network, backlash, two-mass electromechanical systems, DC motor of series excitation.

УДК 621.3.01:519.876.5

С. М. Тиховод канд. техн. наук, Э. В. Власенко канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

При моделировании переходных процессов в магнитоэлектрических схемах замещения трансформаторов с целью учета магнитных потоков рассеяния предложено в магнитную цепь вводить дополнительные ветви с управляемыми источниками МДС. Коэффициенты управления источников МДС рекомендуется вычислять по изложенной методике.

Ключевые слова: моделирование, магнитоэлектрические схемы замещения, магнитные потоки рассеяния.

В состав современных электротехнических комплексов входят электромагнитные устройства, такие как трансформаторы, реакторы, а также другие сложные электротехнические устройства. При коммутациях в таких комплексах наблюдаются весьма большие броски токов, вводящие магнитные системы в режимы, близкие к насыщению стали. При этом на активные части электромагнитных устройств воздействуют отрицательные факторы – большие механические усилия, локальные температурные нагревы, перенапряжения и др. В ряде случаев нестационарные электромагнитные процессы приводят к аварийности трансформаторного оборудования [1]. Поэтому оценка бросков токов в переходных режимах электротехнических комплексов является актуальной задачей.

Обычно динамические процессы магнитных полей в таких электромагнитных устройствах, как трансформаторы и реакторы, оцениваются автономно, то есть

без учета сложных схем, в которые они включены. Для анализа электромагнитных полей используются такие программные пакеты, как ANSYS [2], COMSOL [3] и др. Эти пакеты позволяют выполнять моделирование трехмерных магнитных полей в переходных режимах при условии, что к электромагнитным устройствам подключается только очень простая электрическая цепь. Другой отрицательной стороной этих пакетов является их чрезмерно высокая стоимость. Например, стоимость лицензии на пользование пакетом ANSYS составляет примерно 1 млн. гривен. Поэтому в настоящее время моделирование переходных процессов в таких электрических комплексах целесообразно проводить методами теории электрических и магнитных цепей, которые взаимодействуют между собой. Объединенная магнитная и электрическая цепь составляют так называемую магнитоэлектрическую цепь, которая моделируется как единая цепь [4].

Покажем, как обычно формируется магнитоэлектрическая цепь. На рис. 1 изображена магнитная ветвь, на которой расположена катушка индуктивности. Ток, протекающий по катушке, создает согласно закону Ампера в магнитной ветви магнитодвижущую силу (МДС), равную $-Ni$, где N – число витков катушки, i – сила тока в катушке. Магнитный поток, пересекающий витки катушки, создает в катушке ЭДС индукции, равную $N \cdot d\Phi / dt$. Таким образом, электрические и магнитные ветви связаны между собой, что учитывается введением в схему замещения управляемых источников напряжения. Если магнитная ветвь линейна, то участок магнитопровода имеет магнитное сопротивление, определяемое выражением: $R = \ell / (S\mu_0\mu)$, где ℓ – длина магнитной ветви, S – площадь поперечного сечения магнитной ветви, μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода. Если магнитная ветвь нелинейная, то участок магнитопровода замещается двумя элементами R_n , E_n , значения которых в точке (Φ, U_{m1}) определяются с помощью характеристики намагничивания [4]

$$R_n = \left. \frac{dU_m}{d\Phi} \right|_{U_m = U_{m1}} ; E_n = U_{m1} - \Phi_1 R_n$$

При моделировании электромагнитных процессов с помощью магнитоэлектрических схем замещения источниками магнитодвижущих сил (МДС) обычно считают катушки [4–5]. Величину МДС вычисляют интегрально по закону Ампера (полного тока). В тех случаях, когда магнитная проницаемость магнитопроводов велика и магнитными потоками рассеяния можно пренебречь, такое допущение значительных погрешностей не дает. В режиме полного насыщения магнитной системы магнитная цепь теряет всякий смысл. Однако в режимах, близких к насыщению ферромагнит-

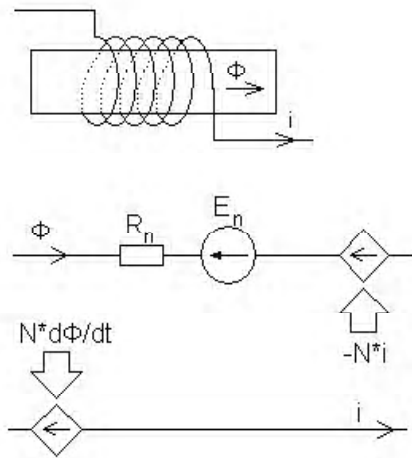


Рис. 1. Магнитная ветвь, связанная с токовой обмоткой, и ее схема замещения: Φ – магнитный поток магнитной ветви; i – ток, протекающий по обмотке

ных элементов магнитопроводов, можно использовать понятие магнитной цепи, если ввести в магнитоэлектрическую схему замещения дополнительные ветви, замыкающие магнитные потоки рассеяния. В эти магнитные ветви также необходимо вводить дополнительные источники МДС. При наличии магнитных ветвей, замыкающих потоки рассеяния, МДС в стержнях уже нельзя рассчитывать по закону полного тока.

Целью данной статьи является разработка методики моделирования распределенных источников МДС в магнитоэлектрических схемах замещения трансформаторов, реакторов и других электромагнитных устройствах.

Одной из характеристик магнитного поля является скалярный магнитный потенциал φ_m , который связан с проекцией напряженности H_s магнитного поля на направление s выражением

$$H_s = \frac{\partial \varphi_m}{\partial s} \tag{1}$$

Если магнитное поле создано некоторым контуром радиуса R с током I (см. рис. 2), то в любой точке наблюдения A скалярный потенциал φ_m может быть вычислен по известной формуле [6]:

$$\varphi_m = \frac{I}{4\pi} \Omega_A + \text{const} \tag{2}$$

где Ω_A – телесный угол, под которым виден контур тока из точки наблюдения A .

Константа, входящая в формулу (2), определяется из условия: на какой поверхности скалярный магнитный потенциал испытывает скачок, равный I . Разность магнитных потенциалов между двумя точками дает магнитное напряжение.

Телесный угол Ω_A для кругового витка можно вычислить следующим образом. Пусть точка наблюдения A имеет координаты x_A, y_A, z_A (см. рис. 3).

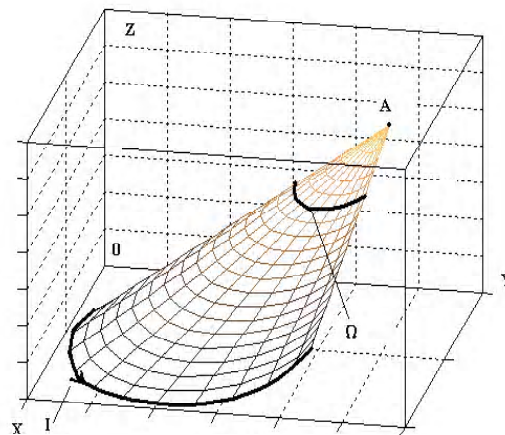


Рис. 2. К определению скалярного магнитного потенциала, созданного витком с током

Тогда элемент поверхности $dS = r \cdot dr \cdot d\varphi$ в плоскости, параллельной плоскости XOY с координатой $z = z_a$, будет виден из точки наблюдения A под телесным углом $d\Omega$:

$$d\Omega = \frac{dS \cos\beta}{\rho^2} = \frac{rdrd\varphi(z_A - z_a)}{\rho^3}, \quad (3)$$

где r – расстояние от центра витка до элемента dS ; x_a, y_a, z_a – координаты элемента dS ; ρ – расстояние от элемента dS до точки наблюдения.

Подставим в выражение (3) зависимость ρ от координат и проинтегрируем. В результате получим в выражении (4) телесный угол, под которым виток виден из точки наблюдения

$$\Omega_A = (z_A - z_a) \int_0^R r dr \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\left[(x_A - r \cos\varphi - x_c)^2 + (y_A - r \sin\varphi - y_c)^2 + (x_A - z_a)^2 \right]^{3/2}} + \text{Const}, \quad (4)$$

где x_a, y_a – координаты центра витка.

Интеграл в выражении (4) может быть вычислен аналитически. Однако, если контур с током имеет сложную форму, то интеграл аналитически не всегда вычисляется, но его легко можно определить численными методами.

Если задать $\text{Const}=0$, то значение телесного угла Ω_A в выражении (4) испытывает скачок, равный 4π при переходе через поверхность, ограниченную витком. При $z_A = (+0)$ $\Omega_A = 2\pi$, а при $z_A = (-0)$ $\Omega_A = -2\pi$.

Выберем константу в выражении (4) так, чтобы магнитное напряжение U_m между любыми точками исследуемого пространства не испытывало скачков. При токе витка в 1 А скачок магнитного напряжения U_m между двумя точками может быть равен или +1 или -1, если обе точки расположены по разные стороны плоскости витка. Если же какая-то точка лежит в плоскости витка, то скачок магнитного напряжения U_m между двумя точками может быть или +0,5 или -0,5. Чтобы

магнитное напряжение непрерывно изменялось между любыми точками пространства, из магнитного напряжения U_m , как разности магнитных потенциалов, скачок необходимо вычитать. На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма выбора константы при определении магнитного напряжения, созданного витком с током $I=1$, между двумя произвольными точками 1 и 2.

Таким образом, в пространстве магнитной системы трансформатора можно задать достаточное число точек и определить магнитное напряжение между любой парой смежных точек, создаваемое всеми обмотками трансформатора.

Для примера рассмотрим виток радиуса $R=0,15$ м с током $I=1$ А, расположенный в плоскости XOY . Зададим последовательный ряд точек в пространстве, показанный на рис. 5.

Пусть расстояние между смежными точками одинаково и равно 0,1 м. Вычислим магнитные напряжения U_m между последовательностью смежных точек, выполняя обход по часовой стрелке.

Распределение магнитных напряжений между последовательностью смежных точек показано на рис. 6. Алгебраическая сумма всех магнитных напряжений по замкнутому контуру равна току в витке, то есть $\sum U_m = 1$. Это подтверждает то, что вычисленные магнитные напряжения удовлетворяют закону полного тока.

Вычислим магнитное напряжение, созданное круговой цилиндрической обмоткой, содержащей N_s слоев и N_r витков в каждом слое. Пусть ось обмотки расположена параллельно оси z , причем Z_{a1} – координата нижней части обмотки, Z_{a2} – координата верхней части обмотки, r_{a1}, r_{a2} – внутренний и внешний радиусы обмотки. Тогда для витка, имеющего номер

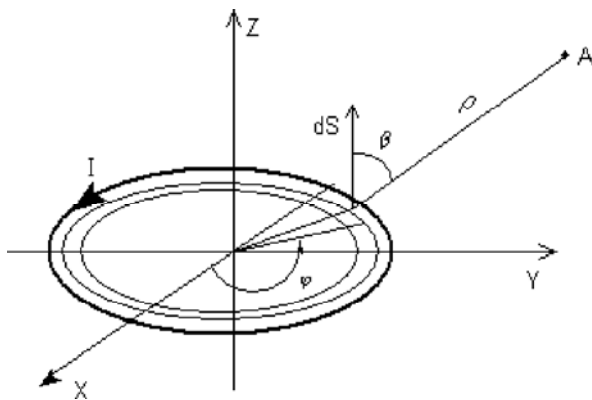


Рис. 3. Вычисление скалярного магнитного потенциала, созданного витком с током

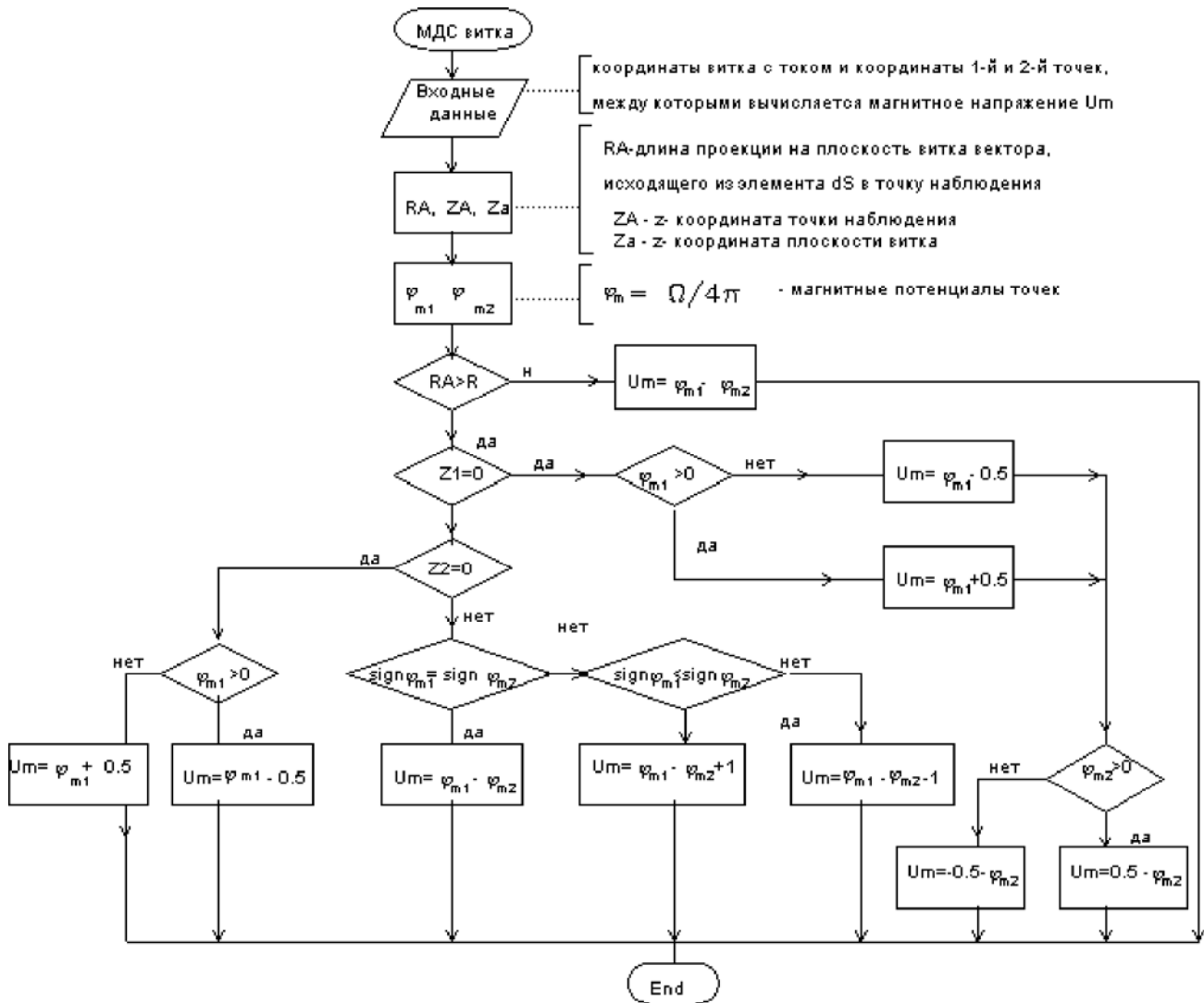


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения магнитного напряжения, созданного круговым витком с током

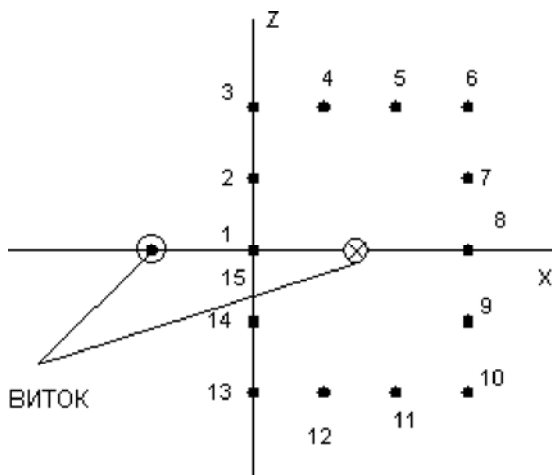


Рис. 5. Виток с током в разрезе и набор точек, между которыми вычисляется магнитное напряжение

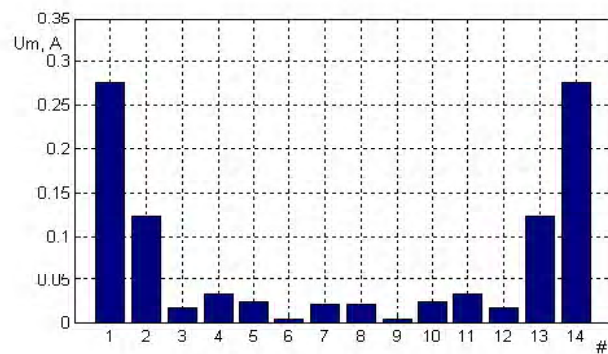


Рис. 6. Распределение магнитных напряжений, созданных одним витком, между последовательностью смежных точек (контур охватывает проводник)

слоя n_s и номер витка в ряду n_r , текущее значение координаты по оси z и текущий радиус витка равны:

$$z_k = (0,5 + n_r - 1) \cdot \frac{H}{N_r} + Z_{a1};$$

$$r_k = (0,5 + n_s - 1) \cdot \frac{\Theta}{N_s} + r_{a1},$$

где $H = Z_{a2} - Z_{a1}$; $\Theta = r_{a2} - r_{a1}$.

Блок-схема алгоритма вычисления МДС тока цилиндрической обмотки приведена на рис. 7. МДС вычисляется между набором заданных точек пространства. Логика этого алгоритма состоит в том, что в магнитном напряжении, созданном всей катушкой с током, учитывается вклад каждого витка. Магнитное напряжение, созданное одним витком, определяется согласно алгоритму, показанному на рис. 4.

Все вычисленные магнитные напряжения в магнитозлектрической схеме замещения имитируются дополнительными управляемыми токами катушек источниками МДС.

Расчет по предложенному алгоритму МДС, созданной обмоткой для системы N точек, показанной на рис. 5, представлен на рис. 8. В расчете принято: $Z_{a1} = -0,15$ м; $Z_{a2} = 0,15$ м; $r_{a1} = 0,1$ м; $r_{a2} = 0,2$ м.

Алгебраическая сумма всех магнитных напряжений по замкнутому контуру равна току в витке 1 А, умноженному на число витков: $\sum U_m = 20$, то есть закон полного тока соблюдается.

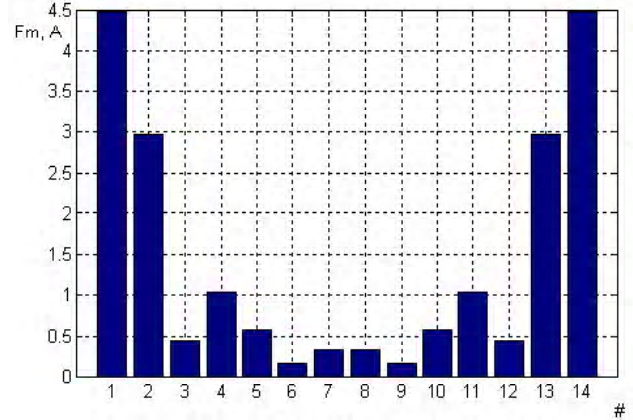


Рис. 8. Распределение магнитных напряжений, созданных цилиндрической обмоткой, между последовательностью смежных точек (контур охватывает все проводники обмотки)

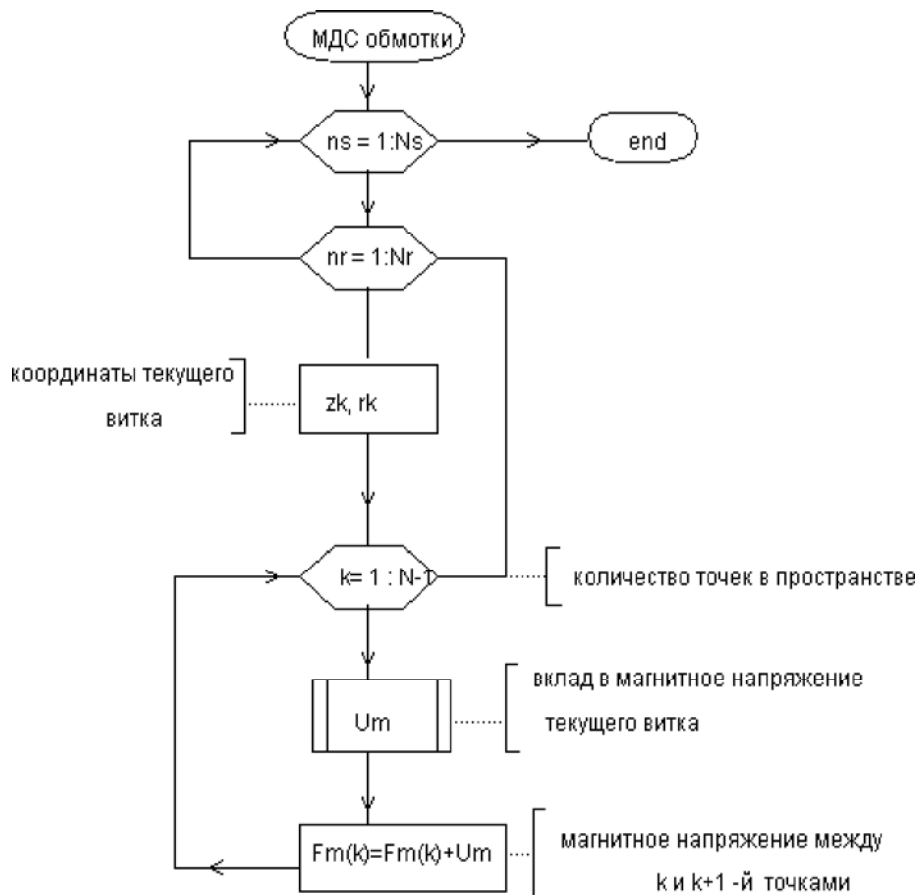


Рис. 7. Блок-схема алгоритма определения магнитного напряжения, созданного цилиндрической обмоткой с током

Во многих случаях обмотки имеют прямоугольную форму с закругленными углами. Вычислим магнитное напряжение, созданное обмоткой с направляющей, показанной на рис. 9.

Как и в случае с круговой цилиндрической обмоткой, рассмотрим вначале один виток в виде прямоугольника с закругленными углами. Главным размером витка назовем длину A большей стороны. Длину меньшей стороны B выразим через размер A : $B = k_B \cdot A$. Радиус закругления углов также выразим через размер A : $R_1 = k_R \cdot A$.

Чтобы воспользоваться разработанным алгоритмом вычисления МДС, необходимо иметь зависимость длины радиус-вектора r от угла φ . Рассмотрим показанную на рис. 10 одну четвертую часть фигуры рис. 9.

При $0 < \varphi < \varphi_1$ имеем зависимость

$$r = \frac{A}{2 \cos \varphi}, \quad (5)$$

при $\varphi_2 < \varphi < \pi/2$ имеем зависимость

$$r = \frac{B}{2 \sin \varphi}. \quad (6)$$

Получим зависимость $r(\varphi)$ при $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$ в первом квадранте. Для этого рассмотрим треугольник

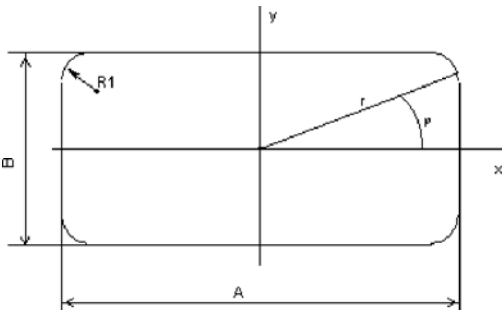


Рис. 9. Направляющая прямоугольной обмотки

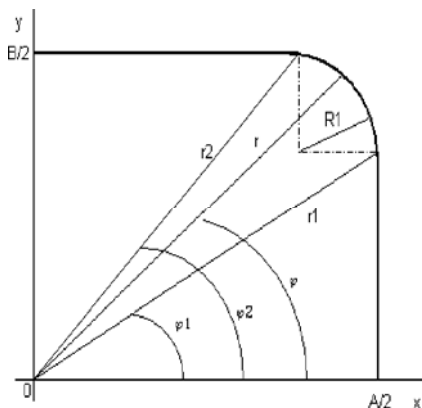


Рис. 10. К определению $r(\varphi)$

($0, 0', a$) (рис. 11). Учитывая, что $\psi = \varphi - \varphi_c$, согласно теореме синусов имеем

$$\frac{R_1}{\sin \psi} = \frac{r}{\sin \alpha} = \frac{R_c}{\sin(\psi + \alpha)}, \quad (7)$$

откуда

$$r = \frac{\sin \alpha}{\sin \psi} R_1. \quad (8)$$

Согласно второму равенству в (7) имеем:

$$\sin(\alpha + \psi) = \frac{R_c}{R_1} \sin \psi. \quad (9)$$

После преобразований уравнения (9) получаем:

$$m \sin^2 \alpha + n \sin \alpha + \ell = 0, \quad (10)$$

где

$$m = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \psi} + 1; \quad n = -\frac{2R_c}{R_1 \operatorname{tg} \psi}; \quad \ell = \left(\frac{R_c}{R_1}\right)^2 - 1.$$

Решение уравнения (10) дает зависимость $\sin \alpha$ от ψ . Использование зависимости $\sin \alpha(\psi)$ с учетом (8) дает зависимость $r(\psi)$.

Для $\varphi < \varphi_c$ имеем $\psi = -\varphi + \varphi_c$, следовательно, можно в общем случае писать

$$\psi = |\varphi - \varphi_c|.$$

Для других четвертей имеем:

При $\varphi_2 < \varphi \leq \pi - \varphi_2$

$$r = \frac{B}{2 \sin \varphi}, \quad \text{где } \varphi = \psi - \varphi_1. \quad (11)$$

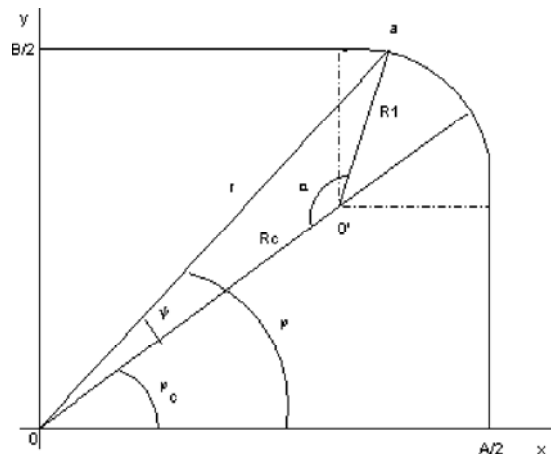


Рис. 11. К определению $r(\varphi)$ при $\varphi_c < \varphi < \varphi_2$

При $\pi - \varphi_1 < \varphi \leq \pi$

$$r = \frac{A}{2 \cos(\pi - \varphi)}. \quad (12)$$

Для всех углов 3-го и четвертого квадрантов ($\varphi > \pi$) будем использовать $\varphi = \varphi - \pi$.

$$\Omega_A = (z_A - z_a) \iint_S \frac{r(a, \varphi) dr d\varphi}{\left[(x_A - r(a, \varphi) \cos \varphi - x_c)^2 + (y_A - r(a, \varphi) \sin \varphi - y_c)^2 + (x_A - z_a)^2 \right]^{3/2}}, \quad (13)$$

где a – переменная величина, изменяющаяся от нуля до A , задающая главный размер текущего прямоугольника с закругленными углами; S – поверхность витка-прямоугольника с закругленными углами.

Интеграл (13) можно легко вычислить численным методом, например методом трапеций, и получить значение магнитного скалярного потенциала в произвольной точке. Применяв алгоритм, аналогичный приведенному на рис. 4, получим способ вычисления магнитного напряжения между любыми двумя точками пространства.

Рассмотрим теперь обмотку, состоящую из витков прямоугольной формы с закругленными углами и содержащую N_s слоев и N_r витков в каждом слое. Пусть ось обмотки расположена параллельно оси z , причем Z_{a1} – координата нижней части обмотки, Z_{a2} – координата верхней части обмотки, r_{a1} , r_{a2} – внутренний и внешний размер обмотки большей стороны, x_c, y_c – координаты центра витка.

Требуется для системы точек, координаты которых заданы в массиве C , определить магнитные напряжения, созданные током всех витков обмотки прямоугольной формы между всеми смежными точками. Алгоритм определения системы магнитных напряжений, созданной обмоткой прямоугольной формы, похож на алгоритм для катушки цилиндрической формы, показанный на рис. 7. Данный алгоритм начинается с циклов прохода по виткам катушки по слоям и по рядам. Далее отдельно обрабатывается каждый виток. Для текущего витка задаются координаты и размеры. Поскольку для каждого витка предстоит определение телесного угла Ω из ряда точек наблюдения, то для всех витков предварительно вычисляется зависимость длины радиус-вектора r от центра витка до линии витка от азимутального угла φ при изменении размера витка A_k от нуля до A . Результаты сохраняются в массивах fm и rm .

По разработанному алгоритму составлена компьютерная программа. В виде примера для катушки, имеющей параметры $Z_{a1} = -0,15$; $Z_{a2} = 0,15$; $r_{a1} = 0,15$; $r_{a2} = 0,25$; $x_c = 0,1$; $y_c = 0$;

Таким образом, по заданным значениям главного размера A , а также коэффициентов k_b , определяющих размер малой стороны и радиус закругления углов, получили зависимость длины радиус-вектора от азимутального угла φ . С помощью зависимости $r(\varphi)$ вычислим интеграл (13) для вычисления телесного угла:

$N_s = 2$; $N_r = 10$; $k_b = 0,5$; $kr = 0,2$ вычислены магнитные напряжения для всех смежных точек контура, показанных на рис. 5. Результаты расчета показывают, что алгебраическая сумма магнитных напряжений по замкнутому контуру равна 10 А, так как контур охватывает половину витков, а сила тока в витках задана 1 А, то есть закон полного тока выполняется.

Таким образом, мы рассмотрели методику расчета МДС между любыми точками в пространстве, создаваемой обмотками цилиндрической и прямоугольной формы. В тех режимах, когда магнитными потоками рассеяния пренебречь нельзя, в магнитоэлектрическую схему замещения магнитной цепи необходимо вводить дополнительные ветви, замыкающие потоки рассеяния. В таких случаях величину МДС уже нельзя вычислять интегрально по закону полного тока. В каждую магнитную ветвь необходимо включать источник МДС со значением, рассчитанным с помощью разработанной методики.

Для примера рассмотрим однофазный трансформатор. Фрагмент его конструкции в разрезе показан на рис. 12. Ввиду симметрии показана половина конструк-

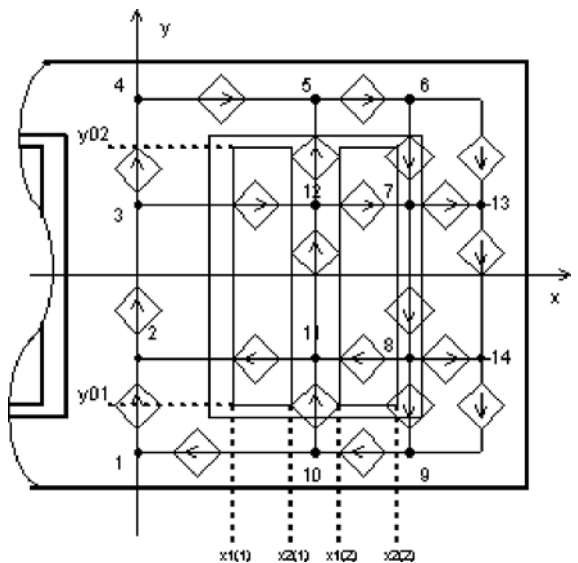


Рис. 12. Фрагмент конструкции однофазного трансформатора в разрезе. Указаны узлы магнитной цепи и управляемые источники МДС

ции. На магнитной системе указаны точки, которые следует использовать как узлы магнитной цепи. Между этими узлами показаны источники МДС, управляемые токами обмоток. Коэффициенты управления источников МДС, управляемых токами обмоток, вычисляются по изложенной методике.

Выводы

1. В режимах, близких к насыщению ферромагнитных элементов магнитопроводов, можно использовать понятие магнитной цепи, если ввести в магнитоэлектрическую схему замещения дополнительные ветви, замыкающие магнитные потоки рассеяния, в которые включаются управляемые источники МДС.

2. Коэффициенты управления распределенных источников МДС рекомендуется вычислять по изложенной методике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зиновкин, В. В.* Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в неактивных деталях электротехнического оборудования / В. В. Зи-

новкин, М. Ю. Залужный // Вісник КДУ. – 2010. – № 3. – С. 65–69.
 2. *Вишняков, С. В.* Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. Учебное пособие / С. В. Вишняков, Н. М. Гордюхина, Е. М. Федорова. – М.: МЭИ, 2004. – 63 с.
 3. COMSOL Multiphysics (Femlab). Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/femlab>
 4. *Тиховод, С. М.* Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / С. М. Тиховод // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 16–23.
 5. *Шакиров, М. А.* Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения / Г. Н. Шакиров // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 15–27.
 6. *Круг, К. А.* Основы электротехники: в 2-х т. Т. 1. Физические основы электротехники / К. А. Круг // М. Л.: Государственное энергетическое издательство. – 1946. – 472 с.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2011.

Тиховод С. М., Власенко Е. В.

Комп’ютерне моделювання розподілених магніторушійних сил в магнітоелектричних схемах заміщення електротехнічних комплексів

При моделюванні перехідних процесів в магнітоелектричних схемах заміщення трансформаторів з метою обліку магнітних потоків розсіяння запропоновано в магнітне коло вводити додаткові гілки з керованими джерелами МДС. Коефіцієнти керування джерел МДС рекомендується обчислювати за викладеною методикою.

Ключові слова: моделювання, магнітоелектричні схеми заміщення, магнітні потоки розсіяння.

Tikhovod S. M., Vlasenko E. V.

Computer simulation of distributed magnetomotive forces in equivalent magnetoelectric circuits of electrotechnical complexes

When modeling transients in magnetoelectric equivalent circuits of transformers, it is proposed to include additional branches with controlled MMF sources into the magnetic circuit in order to allow for dispersion magnetic fluxes. It is recommended to calculate the control ratio of MMF sources according to the described procedure.

Key words: modeling, magnetoelectric equivalent circuits, dispersion magnetic fluxes.

УДК 612.315

О. Г. Волкова

Запорожский национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК НА КОНТАКТАХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

В данной статье исследовано образование поверхностных пленок на разрывных контактах коммутационных устройств. Показан механизм образования продуктов загрязнения в трансформаторном масле и динамика их осаждения на контактной системе.

Ключевые слова: контактор, трансформаторное масло, контакты, электрическая дуга.

Переходное электрическое сопротивление контактов, которое является основной причиной потерь энер-

гии при прохождении тока через контактное соединение, увеличивается со временем эксплуатации незави-