

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА РАМОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Крюкова Н.В., Гелярговская О.А., Данько В.Г., д.т.н., Лупиков В.С., д.т.н., Серета А.Г., к.т.н.  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедры "Общая электротехника",  
"Математическое моделирование и компьютерная математика", "Электрические аппараты"  
тел. (0572) 707-68-64, E-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua.

*Обґрунтовано методику розрахунку магнітного моменту рамкової конструкції електротехнічного пристрою. Методика включає розрахунок електрорушійних сил взаємних індуктивностей лінійних ділянок рамкової конструкції і контурів силового кола за одержаними аналітичними співвідношеннями, складання схеми заміщення рамкової конструкції, її модифікацію відповідно до методу М-схем, розрахунок складових магнітних моментів незалежних контурів цієї схеми і їх підсумовування окремо для косинусних і синусних складових струмів рамкової конструкції.*

*Обоснована методика определения магнитного момента рамочной конструкции электротехнического устройства. Методика включает расчет электродвижущих сил взаимных индуктивностей линейных участков рамочной конструкции и контуров силовой цепи по полученным аналитическим соотношениям, составление схемы замещения рамочной конструкции, ее модификацию по методу М-схем, расчет составляющих магнитных моментов независимых контуров этой схемы и их суммирование отдельно для косинусных и синусных составляющих токов рамочной конструкции.*

### ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного решения проблемы электромагнитной совместимости электротехнических устройств [1] со слаботочными элементами автоматики и контроля требуется учет многих факторов, которые не учитывались ранее как из-за малости их значений, так и необходимости физической интерпретации и моделирования отдельных явлений. При этом разработчики электротехнических устройств (ЭТУ) не всегда могут предвидеть эти "подводные камни", поскольку существующие методы проектирования попросту не учитывают этих явлений. В частности, при разработке ЭТУ со сниженными уровнями внешнего магнитного поля (ВМП) не учитывается влияние последовательности чередования фаз питания на его уровень. Так, экспериментально было установлено, что при изменении последовательности чередования фаз питания на входе трехфазного распределительного устройства величина его максимального магнитного момента (ММ) в режиме работы, характеризующемся определенном сочетании одновременно включенных фидеров, может меняться в 2-3 раза. В работе [2] на простом примере магнитного взаимодействия плоского трехфазного шинпровода и замкнутого коротко контура, имитирующего рамочную конструкцию каркаса шкафа, дано объяснение этого эффекта. Рассматривая ММ в виде двух составляющих, обусловленных протеканием токов по токопроводам силовой цепи распределительного устройства и индуцированных токов в рамочной конструкции его шкафа, теоретически было установлено, что пространственный сдвиг векторов этих составляющих зависит от порядка следования фаз питания. Как следствие, результирующий ММ, определяемый геометрическим суммированием векторов этих составляющих, меняется по величине. Причиной сдвига является несимметричное расположение токопроводов относительно рамочной конструкции. А следствием является различный коэффициент взаимной индуктивности при прямой и обратной последовательности чередования фаз питания.

В настоящее время учет влияния последовательности чередования фаз питания на ММ на стадии проектирования распределительного устройства невозможно осуществить в силу отсутствия приемлемой методики

для расчета коэффициентов взаимной индуктивности силовых токопроводов и рамочной конструкции. Основные сложности связаны с тем, что известные соотношения [3] пригодны только для численных расчетов простых контуров, располагающихся в параллельных плоскостях и обтекаемых переменным током. Для практического использования необходимо учесть сложную пространственную конфигурацию как шинпровода, так и рамочной конструкции.

Цель работы – обоснование методики определения ММ для рамочной конструкции ЭТУ.

В качестве допущений принимается, что шинпроводы силовой цепи и перемычки рамочной конструкции могут рассматриваться как отрезки тонких линий, проходящих по их продольной оси. При анализе не учитываются нелинейные эффекты, связанные с наличием ферромагнитных масс в конструкции ЭТУ, и не оценивается влияние токов рамочной конструкции на токи силовой цепи, не учитывается поверхностный эффект и предполагается, что все режимы работы ЭТУ установившиеся.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конечной целью разрабатываемой методики является определение составляющей ММ, создаваемого рамочной конструкцией. Расчет составляющей ММ, создаваемого токопроводами силовой цепи ЭТУ, может проводиться известными методами, например, по методу модифицированных схем замещения (М-схем) [4]. Метод позволяет выделить укрупненные источники – независимые контуры силовой цепи, минимальное число которых полностью характеризует ММ ЭТУ с учетом временных сдвигов (фаз) токов во всех режимах работы. При этом ММ произвольного независимого контура характеризуется вектором, пространственное направление которого совпадает с вектором площади контура, а величина численно равна произведению тока и площади контура. Так как ток контура изменяется по закону синуса с частотой сети и его мгновенное значение зависит от амплитуды и временной фазы, ММ также является синусоидальной функцией. В случае, когда размеры контура невелики по сравнению с расстоянием, где рассматривается его

магнитное действие, контур можно рассматривать как пульсирующий источник ММ и описывать пространственно-временной функцией

$$m(t) = S \cdot i(t) = S \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = M_m \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где  $m(t)$  – мгновенное значение вектора ММ контура;  $t$  – момент времени;  $S$  – вектор площади контура;  $i(t)$  – мгновенное значение тока контура;  $I_m$  – амплитуда тока;  $\omega$  – круговая частота сети;  $\varphi$  – начальная фаза тока контура;  $M_m$  – амплитуда вектора ММ.

Пространственное направление вектора ММ этого источника совпадает с направлением вектора площади контура, частота пульсаций равна частоте сети, а размах пульсаций характеризуется амплитудой.

В общем случае ММ контуров с переменными токами представляется в виде трех источников (плоских обмоток), оси которых ориентированы по ортогональным осям координат, а временные фазы отличаются. В свою очередь, ММ каждого из источников можно представить в виде комплексной величины  $\dot{M}_u$ , фаза которой  $\varphi_u$  совпадает с фазой обмотки (1)

$$\dot{M}_u = M_{mu} \cdot e^{j\varphi_u} = M_{mu} \cdot \cos \varphi_u + M_{mu} \cdot \sin \varphi_u, \quad (2)$$

где  $M_m$ ,  $\varphi_u$  – амплитуда и фаза ММ;  $u$  – ось координат.

Для единообразия описания ММ рамочную конструкцию необходимо представить также в виде системы контуров с токами, индуцированными в ней системой токов силовой цепи ЭТУ.

С точки зрения электрических цепей, рамочная конструкция представляет сложную электрическую цепь и может характеризоваться множеством различных вариантов независимых контуров. При разработке методики определения ММ для контуров рамочной конструкции необходимо выбрать базовый элемент, определить его характеристики как источника поля, построить модель рамочной конструкции и описать ее ММ.

В качестве такого базового элемента в данной работе выбран линейный участок рамочной конструкции, по которому протекает индуцированный силовой цепью ток. Для упрощения математического описания принимаются следующие допущения:

- конфигурация токопроводов силовой цепи, их токи частоты сети и фазы считаются известными;
- участки токопроводов силовой цепи и линейные участки элементов рамочной конструкции представляются системой кусочно-линейных отрезков (нитей), ориентированных вдоль одной из ортогональных координатных осей, и их положение однозначно определены для конкретной конструкции ЭТУ;
- при определении индуцированных токов в элементах рамочной конструкции от токопроводов силовой цепи справедлив принцип суперпозиции;
- для частоты сети можно пренебречь эффектом близости элементов рамочной конструкции и токопроводов силовой цепи;
- считается, что ЭТУ питается системой токов одной фазы, если это специально не оговорено.

Используя такую модель, ставятся задачи определения величины и направления индуцированного тока линейного отрезка контура, определения независимых контуров рамочной конструкции и расчет их ММ в соответствии с (2).

## 2 КОЭФФИЦИЕНТ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ОТРЕЗКОВ

Для характеристики магнитного воздействия контуров обычно используется понятие коэффициента вза-

имной индуктивности. Например, для двух контуров (рис. 1) коэффициент взаимной индукции  $L_{21}$  равен

$$L_{21} = \Psi_{1M} / i_2, \quad (3)$$

где  $\Psi_{1M}$  – поток первого контура, обусловленный током  $i_2$  второго контура.

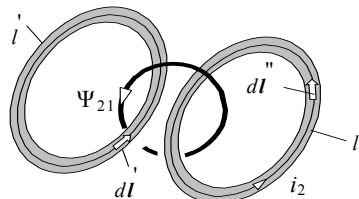


Рис. 1

Однако прямой расчет  $L_{21}$  по формуле (3) неудобен, так как операции по определению потока  $\Psi_{1M}$  указаны неявно. Представляя поток  $\Psi_{1M}$  как результат интегрирования нитей тока второго контура

$$\Psi_{1M} = \int l_{21} \cdot di_2'', \quad (4)$$

где  $l_{21}$  – взаимная индуктивность нитей тока первого  $i_1$  и второго  $i_2''$  контуров, и подставляя это выражение в (3) получается известная формула для расчета коэффициента их взаимной индуктивности [3]:

$$L_{21} = \frac{1}{i_1 \cdot i_2} \int_{i_1} di_1' \int_{i_2} l_{21} \cdot di_2'', \quad (5)$$

Входящая в (4) и (5) взаимная индуктивность нитей тока  $l_{21}$  определяется по формуле [3]

$$l_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l'} \oint_{l''} \frac{dl' \cdot dl''}{D} \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

где  $dl'$  и  $dl''$  – элементы длины первого и второго контуров (рис. 1);  $D$ ,  $\alpha$  – расстояние и угол между этими элементами;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Сомножитель  $\cos \alpha$  в (6) характеризует скалярное произведение векторов отрезков  $dl'$  и  $dl''$ .

Для принятого допущения о взаимной перпендикулярности отрезков контуров силовой цепи и рамочной конструкции сомножитель  $\cos \alpha$  может принимать значения 0, 1, -1. Нулевые значения коэффициента относятся к случаям, когда направления интегрирования по отрезкам совпадают, либо противоположны. Например, для плоских контуров с взаимно перпендикулярными сторонами (рис. 2) для отрезков 1 и 2  $\cos \alpha = 1$ , а для отрезков 2 и 3  $\cos \alpha = -1$ .

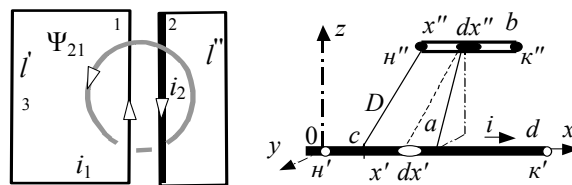


Рис. 2

Важно отметить, что в случае взаимной перпендикулярности линейных участков контуров их  $\cos \alpha = 0$  и их взаимная индуктивность  $l_{21}$  в соответствии с соотношением (6) также равна нулю. Это условие выполняется независимо от того, вдоль каких ортогональных осей ориентированы отрезки.

Отсюда следует полезное **правило 1**:

при условии взаимной перпендикулярности от-

резков контуров силовой цепи и рамочной конструкции достаточно определять коэффициенты взаимных индуктивностей для параллельных участков.

Пусть имеется пара параллельных отрезков, принадлежащих силовой цепи и рамочной конструкции. Для простоты полагается, что отрезки расположены параллельно оси  $x$  (рис. 3). Первый отрезок отмечен точками начала  $n'$  и конца  $k'$ , имеет длину  $d$  и обтекается током в направлении от начала к концу. Начало первого отрезка располагается в начале системы координат 0. Второй отрезок отмечен точками начала  $n''$  и конца  $k''$ , имеет длину  $b$  и его начало смещено по оси  $x$  на расстояние  $c$ .

С учетом принятых допущений отрезки рассматриваются как параллельные нити и согласно (6) взаимная индуктивность  $L_{21} = l_{21}$  представляется в виде

$$L_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^d \int_c^{c+b} \frac{dx' \cdot dx''}{D}, \quad (7)$$

где  $x'$ ,  $x''$  – элементы длин первого и второго отрезков, отсчитываемые в направлении оси  $x$ ;  $D$  – расстояние между элементами интегрирования,

$$D = \sqrt{(x'' - x')^2 + a^2}, \quad (8)$$

Выполнив необходимые преобразования и подстановки пределов интегрирования в (7) с учетом (8) получено следующее аналитическое соотношение для коэффициента взаимной индуктивности  $L_{21}$  двух параллельных отрезков

$$L_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{q=1}^4 (-1)^{q+1} \left[ v_q \cdot \ln \left( v_q + \sqrt{v_q^2 + a^2} \right) - \sqrt{v_q^2 + a^2} \right], \quad (9)$$

$$v_q = \begin{cases} c+b & \text{при } q=1; \\ c & \text{при } q=2; \\ c-d & \text{при } q=3; \\ c+b-d & \text{при } q=4. \end{cases}$$

Достоинством полученного аналитического соотношения (9) является возможность расчета коэффициента взаимной индуктивности без вычисления интегралов и отсутствие привязки к оси координат.

В случае расположения отрезков (1 и 2) вдоль осей координат условия параллельности имеют вид:

$$|\cos \alpha_{u1}| = |\cos \alpha_{u2}|; \quad (10)$$

где  $\alpha_{u1}$ ,  $\alpha_{u2}$  – углы между отрезками (1 и 2) и осью координат  $u$  ( $u = x, y, z$ ).

Для заданных координат начал ( $x_n, y_n, z_n$ ) и концов ( $x_k, y_k, z_k$ ) отрезков косинусы в формуле (10) определяются по известным соотношениям [5]:

$$\cos \alpha_{ui} = a_{ui} / A_i. \quad (11)$$

Входящие в (11) величины определяются соотношениями:

$$a_{ui} = u_{ki} - u_{ni}; \quad A_i = \sqrt{a_{xi}^2 + a_{yi}^2 + a_{zi}^2};$$

$$u = x, y, z; \quad i = 1, 2.$$

### 3 ЭДС ВЗАМОИНДУКЦИИ ОТРЕЗКА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ КОНТУРОМ

Классическое представление взаимной индукции основано на рассмотрении воздействия магнитного потока, созданного одним контуром с током, на другой контур. При этом ЭДС взаимной индукции, наводимая во втором контуре, определяет его ток. В слу-

чае рамочной конструкции ее токопроводящие перегородки образуют сложную систему контуров, связанных с первым токовым контуром. И определение ЭДС взаимной индукции, наводимых в этих контурах представляет собой сложную задачу. Это связано и с предварительным выбором набора независимых контуров, направлений их обхода для определения знака коэффициента взаимной индуктивности и необходимостью увязки направлений токов контуров с направлением их обхода при интегрировании в соответствии с соотношениями вида (6) или (7). Часть этих вопросов можно решить на основе анализа распределения ЭДС взаимной индукции, наводимой частью контура с током (линейным отрезком) в частях простейшей рамочной конструкции.

Пусть имеется прямоугольный контур, состоящий из четырех последовательно включенных участков (ветвей 1-4), как показано на рис. 3, а, и пронумерованных в направлении против часовой стрелки начиная с участка, параллельного участку силовой цепи.

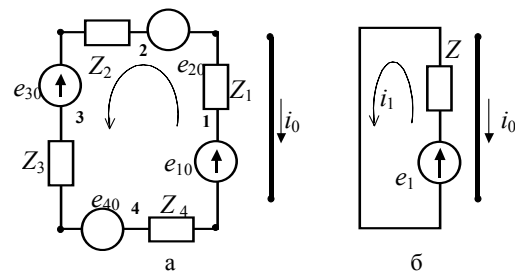


Рис. 3

Коэффициенты взаимной индуктивности ветвей определяются соотношением (9). С учетом того, что 2-й и 4-й участки расположены перпендикулярно участку силовой цепи, их коэффициенты равны 0. Используя известное соотношение для ЭДС взаимной индукции, наводимые в первой и третьей ветвях рамочной конструкции током  $i_0$ , равны:

$$e_{10} = -\frac{d\Psi_{10}}{dt} = -L_{10} \cdot \frac{di_0}{dt}, \quad e_{30} = -\frac{d\Psi_{30}}{dt} = L_{30} \cdot \frac{di_0}{dt}, \quad (12)$$

где  $L_{10}$ ,  $L_{30}$  – коэффициенты взаимной индуктивности соответственно первой и третьей ветвей рамочной конструкции и участка силовой цепи с током  $i_0$ .

Учитывая, что  $L_{20} = L_{40} = 0$ , ЭДС взаимной индукции для ветвей 2 и 4 равны нулю,

$$e_{20} = e_{40} = 0. \quad (13)$$

В рассматриваемом случае можно найти результирующую ЭДС взаимной индукции контура рамочной конструкции с участком силовой цепи, используя принцип суперпозиции и учитывая знаки в (12) и величины составляющих в (13),

$$e_1 = \sum_{n=1}^4 e_{n0} = e_{10} - e_{30}, \quad (14)$$

где  $n$  – номер ветви.

Учитывая, что величина коэффициента взаимной индуктивности параллельных отрезков обратно пропорциональна расстоянию между ними, что учтено в (7), можно определить знак результирующей ЭДС в соотношении (14). Так как отрезок 1 рамочной конструкции расположен ближе к отрезку силовой цепи, по сравнению с более удаленным отрезком 3, то  $e_{10} > e_{30}$ . В этом случае результирующая ЭДС контура имеет знак большей по величине ЭДС, в данном случае  $e_{10}$ .

Отсюда следует **правило 2**:

для контура, состоящего из последовательно соединенных ветвей, результирующая ЭДС взаимной индуктивности определяется суммированием ЭДС отрезков, параллельных отрезку с током силовой цепи.

Достоинством использованного подхода при расчете коэффициентов взаимной индуктивности по участкам контуров, является возможность их последующего суммирования при формировании контура рамочной конструкции из ветвей.

При необходимости индуцированный ток в контуре рамочной конструкции, может быть найден по закону Ома при известном сопротивлении ветвей

$$\underline{Z} = \sum_{n=1}^4 \underline{Z}_n = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4, \quad (15)$$

где  $\underline{Z}_n$  – полное комплексное сопротивление ветви с номером  $n$ .

Следует обратить внимание на то, что в записи соотношения (15) все ветви оказывают электрическое сопротивление току, а источниками ЭДС являются только две ветви, 1-я и 3-я. В действительности, это противоречие кажущееся, так как в формулах (13) и (14) присутствуют составляющие ЭДС от одного участка контура. Очевидно, что другие участки контура, среди которых обязательно присутствуют и перпендикулярно расположенные к нему, будут создавать ЭДС взаимной индукции и в тех участках контура рамочной конструкции, где при рассмотрении они были приняты равными нулю.

#### 4 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ РАМОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для расчета ММ рамочной конструкции предлагается представить ее в виде электрической схемы замещения. Ветви этой схемы соответствуют участкам (линейным отрезкам при принятых допущениях) рамочной конструкции. В качестве источников в этой схеме выступают источники ЭДС ветвей. Для каждой ветви схемы полная ЭДС определяется суммированием ЭДС, индуцированных всеми отрезками силовой цепи, расположенными параллельно данному отрезку рамы,

$$e_n = \sum_{j=1}^J e_{nj}, \quad (16)$$

где  $j$  – номер отрезка контура силовой цепи,  $j = (\overline{1, J})$ .

Полные электрические сопротивления ветвей рассчитываются исходя из геометрии, удельных электрических и магнитных параметров материала рамы соответствующих участков рамочной конструкции.

Используя топологические свойства электрической схемы можно выделить систему независимых контуров с токами с числом контуров.

В соответствии с законом электромагнитной индукции, каждая ЭДС, индуцируемая в контуре рамочной конструкции исходным магнитным потоком отрезка с током силовой цепи, создают ток ( $i_1$  на рис. 2), магнитный поток которого стремится уменьшить исходный магнитный поток. На основе этого формулируется **правило 3**:

направление составляющей ЭДС, индуцируемой отрезком силовой цепи с током в выделенной ветви схемы, противоположно направлению тока отрезка.

На рис. 4,а приведена простейшая схема рамочной конструкции в виде "проволочного" куба. В центральном сечении куба, параллельном лицевой стороне, расположен контур, один из отрезков которого с номером  $j$  обтекает ток  $i_j$ . Наведенные этим от-

резком ЭДС взаимной индукции присутствуют только в ветвях 1, 3, 9 и 11, параллельных отрезку с током, и обозначены соответственно  $e_{1j}$ ,  $e_{3j}$ ,  $e_{9j}$  и  $e_{11j}$  (рис. 4,б).

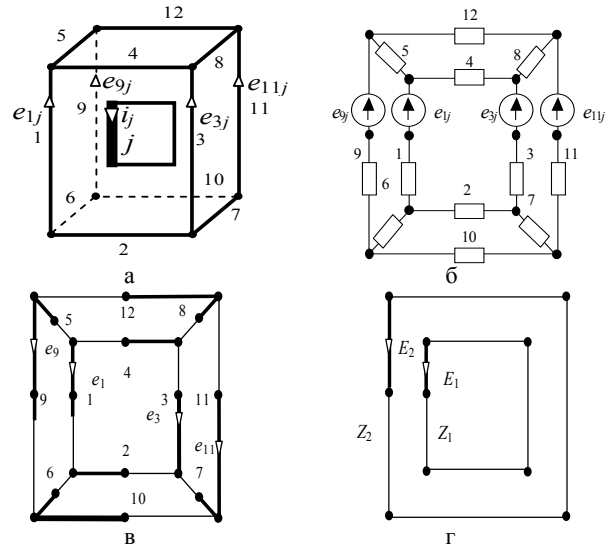


Рис. 4

На рис. 4,в приведен граф электрической схемы. В каждой ветви графа утолщенными линиями отмечены компоненты источников ЭДС, а тонкими – сопротивления. Для источников ЭДС, отличных от нуля, показаны направления их действия, которые учитываются при определении токов контуров схемы. В соответствии с теорией [6], число независимых контуров схемы  $N$  определяется по формуле

$$N = a - b + 1, \quad (17)$$

где  $a$ ,  $b$  – числа ветвей и узлов графа. Для данного графа существует пять независимых контуров (соприкасающихся непересекающихся контуров на рис. 4,в). При условии симметричного расположения токового контура относительно рамочной конструкции, значения полных ЭДС взаимной индукции в ребрах 1, 3, 9 и 11 отвечают соотношению

$$e_1 = -e_3 = e_9 = -e_{11}. \quad (18)$$

Учитывая (18), можно показать, что токи будут протекать только в двух контурах схемы, образованных ветвями 1–4 и 9–12. Причем, направления токов в контурах по часовой стрелке и противоположно направлению тока в исходном контуре силовой цепи (рис. 4,а). Эти контуры показаны на рис. 4,г. Результирующие ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  независимых контуров в соответствии с (16) равны:

$$E_1 = e_1 - e_3; \quad (19)$$

$$E_2 = e_9 - e_{11}.$$

Полные сопротивления этих контуров обозначены  $Z_1$  и  $Z_2$ . При известных величинах ЭДС (19) и сопротивлений по закону Ома определяются значения токов этих контуров.

В случае, когда контур с током силовой цепи располагается несимметрично относительно центра рамочной конструкции, ЭДС взаимной индукции перераспределяются на ее участках. В этом случае ЭДС ветвей будут отличаться, и в общем случае токи будут протекать во всех пяти контурах схемы.

Реальные рамочные конструкции ЭТУ содержат множество перегородок как между внешними ребрами, так и внутри шкафа. В качестве примера на рис. 5,а приведена конструкция комплектного устройства SV-TS 8 фирмы RITTAL (Германия) [7].

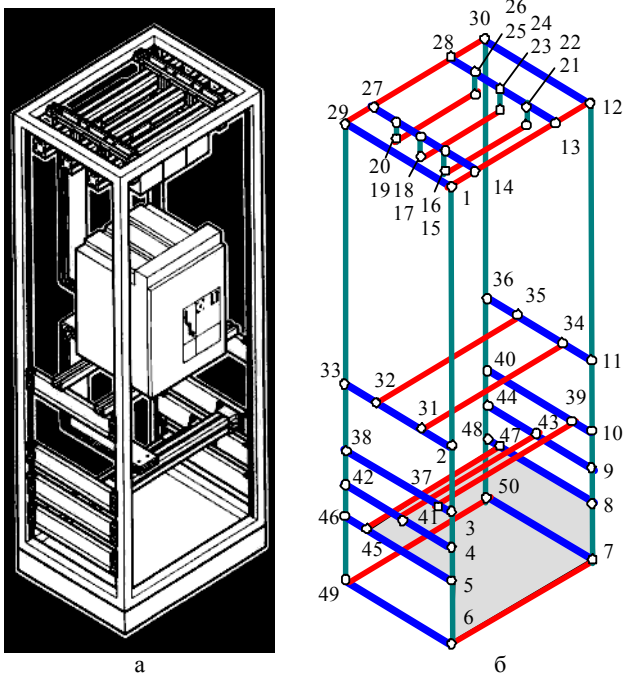


Рис. 5

С учетом принятых допущений на рис. 5,б показана "проволочная" рамочная конструкция этого шкафа, повторяющая в масштабе конфигурацию элементов рамы на рис. 5,а. Для удобства построения графа этой рамочной конструкции, ее узлы пронумерованы,  $b = 50$ . Соответствующий этой рамочной конструкции граф показан на рис. 6. Дерево графа показано утолщенными линиями. Число ветвей  $a = 72$ , а число независимых контуров согласно (17) равно  $N = 23$ . Замыкающие ветви образуют контуры и на рис. 6 эти контуры отмечены числами в кружках.

Анализ показывает, что независимые контуры могут иметь сложную пространственную конфигурацию и их выбор по условию простоты (плоская конфигурация) не всегда возможен. Для примера на рис. 6 и рис. 5,б выделен контур с номером 23.

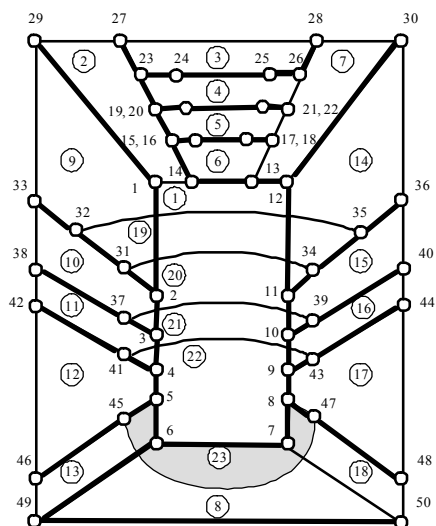


Рис. 6

Для нахождения токов схемы используются известные методы составления системы компонентных и топологических уравнений графа и решения матричных уравнений [6]. Применение графов позволяет

формализовать процесс выделения независимых контуров рамочной конструкции и нахождения их токов. Формализация заключается в том, что описание сложных пространственных конфигураций контуров фактически сводится к перечислению ветвей, образующих плоские токовые контуры графа при формировании системы уравнений.

### 5 МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ РАМОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для расчета ММ рамочной конструкции предлагается использовать метод модифицированных схем замещения (метод М-схем) [4]. Метод основан на модификации электрической схемы (графа) путем введения в каждую ветвь элемента площади. Для ветви схемы рамочной конструкции элемент площади определяется следующим образом: его величина численно равна площади контура, образованного участком рамы и радиусами, соединяющими точки начала и конца с геометрическим центром ЭТУ, а направление в пространстве совпадает с вектором площади контура. Преобразование исходной схемы (графа) к системе независимых контуров производится по установленным правилам [4]. Элемент площади независимого контура схемы равен сумме элементов площадей ветвей, составляющих контур.

Мгновенное значение ММ контура равно произведению мгновенного значения тока и пространственного вектора площади контура. Результирующий ММ рамочной конструкции при этом может быть получен для мгновенных значений токов контуров рамочной конструкции. Однако при этом возникают сложности с анализом и компенсацией ММ ЭТУ с учетом рамочной конструкции. Это связано с тем, что, используя прием разделения токов силовой цепи ЭТУ на косинусные и синусные составляющие, анализ фактически сводится к рассмотрению двух групп однофазных источников ММ. При этом исключаются сложности определения результирующего ММ для каждой из групп. На этом свойстве строится и компенсация ММ ЭТУ по шести независимым составляющим, называемых дипольной структурой [8] и соответствующих косинусным и синусным составляющим ортогональных пространственных компонент векторов ММ групп источников.

Операция нахождения результирующего ММ по составляющим ММ контуров для рамочной конструкции требует учета следующих особенностей.

Во-первых, даже для однофазных токов силовой цепи токи контуров рамочной конструкции будут иметь различные фазовые сдвиги, определяемые различием полных сопротивлений их контуров.

Во-вторых, в случае трехфазных токов ЭТУ представление их в виде двух групп однофазных источников (питаемых косинусными и синусными составляющими токов силовой цепи) фазовые сдвиги токов контуров рамочной конструкции будут различными и эти системы в общем случае уже не будут независимыми.

Преодолеть эти сложности можно, если вначале провести расчет токов контуров силовой цепи, а затем разделить их на две группы независимых токов, сдвинутых во времени на 90 эл. град. между собой. При анализе результирующего ММ ЭТУ и рамочной конструкции целесообразно фазу токов одной группы выбрать соответствующей косинусной составляющей токов силовой цепи, а второй группы – синусной составляющей токов.

С учетом этого исходная система М-схем контуров рамочной конструкции разбивается на две группы, фазы которых соответствуют косинусной и си-

нусной составляющим токов силовой цепи ЭТУ. Это позволяет выполнить суммирование ММ контуров рамочной конструкции также для шести составляющих, соответствующих составляющим дипольной структуры источников силовой цепи ЭТУ.

В качестве примера на рис. 7 приведена система М-схем для  $K$  независимых контуров рамочной конструкции с учетом разбиения токов на две группы, отмеченных индексами  $c$  – для косинусных и  $s$  – для синусных составляющих токов. Элемент площади  $S$  на схеме обозначен в виде части окружности, примыкающей к ветви контура.

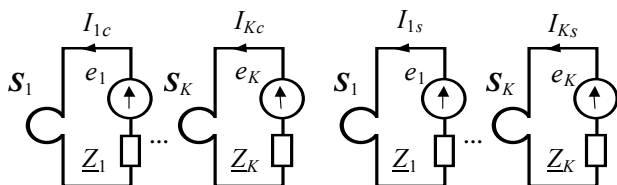


Рис. 7

Составляющие ММ рамочной конструкции, соответствующие составляющим дипольной структуры источников ММ силовой цепи, в этом случае определяется по формулам:

$$M_{uc} = \sum_{k=1}^K I_{kc} \cdot S_{ku}; \quad M_{us} = \sum_{k=1}^K I_{ks} \cdot S_{ku}, \quad (20)$$

где  $M_{uc}$ ,  $M_{us}$  – косинусная и синусная составляющие вектора ММ контуров, ориентированных по оси  $u$  ( $u = x, y, z$ );  $I_{kc}$ ,  $I_{ks}$  – косинусная и синусная составляющие токов рамочной конструкции;  $S_{ku}$  – проекция вектора площади  $k$ -го контура на ось  $u$ ,  $k = (\overline{1, K})$ .

#### 6 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА РАМОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

С учетом топологических свойств электрической схемы рамочной конструкции и правил 1-3, определяющих величины коэффициентов взаимной индуктивности параллельных отрезков и особенности определения ЭДС ветвей с учетом направлений токов силовой цепи, предложена следующая методика расчета токов рамочной конструкции.

1. Выбирается система независимых контуров силовой цепи и устанавливаются направления токов в них.

2. С учетом выбранных направлений определяются направления составляющих ЭДС взаимной индукции для каждой ветви схемы замещения рамочной конструкции.

3. Для каждой из ветвей схемы замещения определяется эквивалентная ЭДС суммированием составляющих ЭДС, индуцируемых всеми отрезками с током силовой цепи с учетом их знака ("+" для антипараллельных и "-" для параллельных отрезков).

4. Выбирается система независимых контуров схемы замещения и направления их обхода.

5. На основе геометрии, электрических и магнитных параметрах материала рамы определяются полные сопротивления ветвей схемы замещения.

6. Составляется система топологических и компонентных уравнений для графа рамочной конструкции и определяются токи независимых контуров.

7. Определяются косинусные и синусные составляющие токов контуров рамочной конструкции.

8. Рассчитываются значения компонент проекций векторов площадей для каждой ветви М-схемы

рамочной конструкции.

9. В соответствии с правилами преобразования М-схем определяются проекции векторов площадей независимых контуров рамочной конструкции.

10. По соотношению (20) рассчитываются косинусные и синусные составляющие проекций векторов магнитного момента электротехнического устройства.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан приближенный метод определения магнитного момента рамочной конструкции электротехнического устройства. Метод основан на составлении электрической схемы замещения (графа) этой конструкции, определении ее токов исходя из значений ЭДС взаимной индукции и сопротивлений ее ветвей, и суммировании магнитных моментов независимых контуров схемы раздельно для косинусных и синусных составляющих токов.

2. Получено аналитическое соотношение для коэффициента взаимной индуктивности двух прямолинейных параллельных отрезков, моделирующих участки рамочной конструкции и токового контура силовой цепи электротехнического устройства. Соотношение позволяет упростить расчет коэффициентов взаимной индуктивности контуров, так как интегрирование по их длинам сводится к простому суммированию коэффициентов параллельных отрезков.

3. Сформулированы три правила, определяющих величины коэффициентов взаимной индуктивности параллельных отрезков и особенности определения ЭДС ветвей с учетом направлений токов силовой цепи. Правила позволяют формализовать процесс определения ЭДС взаимной индукции ветвей схемы.

4. Предложенный приближенный метод может быть положен в основу точных методов анализа магнитного момента и внешнего магнитного поля электротехнических устройств с учетом рамочной конструкции для повышения эффективности средств их снижения (компенсации) при решении проблемы электромагнитной совместимости.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Князев В.В. Директива по электромагнитной совместимости установила новые требования Евросоюза к качеству технических средств. – Мир техники и технологий. – 2005. – № 1(39). – С. 46-49.
- [2] Клименко Б.В., Луников В.С., Выровец С.В., Крюкова Н.В., Гелярговская О.А. Анализ магнитного момента трехфазных цепей // Электротехника і електромеханіка. – 2002. – № 1. – С. 28-36.
- [3] Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- [4] Луников В.С. Структурный анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 4. – С. 9-16.
- [5] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров)/Перев. со второго американского перераб. изд. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
- [6] Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – К.: Техніка, 1975. – 768 с.
- [7] Rittal Product Overview. – Kiev: Advanced Network Technology. – 2004. – 87 p.
- [8] Луников В.С. Структурный анализ Анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. – 1999. – №4. – С. 9-16.

Поступила 11.03.2005