

УДК 621.3.017.2:621.318.43;621.3.011.732.1

И.В.Пентегов, докт.техн.наук, **С.В.Рымар**, канд.техн.наук (Ин-т электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, Киев), **В.М.Безручко** (Черниговский гос. технологический университет, Чернигов)

РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ЦЕПЕЙ ПРОТЕКАНИЯ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫХ ФИЛЬТРАХ

Рассмотрены методы расчета индуктивностей цепей протекания токов нулевой последовательности в автотрансформаторных фильтрах при бифилярной и концентрической намотке проводников обмоток. Проведено сравнение и сформулированы рекомендации по использованию рассмотренных способов изготовления обмоток фильтров токов нулевой последовательности.

Розглянуто методи розрахунку індуктивностей кіл протікання струмів нульової послідовності в автотрансформаторних фільтрах при біфілярній та концентричній намотці провідників обмоток. Проведено порівняння і сформульовано рекомендації щодо використання розглянутих способів виготовлення обмоток фільтрів струмів нульової послідовності.

Введение. В последнее время в электросетях крупных административных зданий увеличилось количество устройств, работающих с импульсными источниками питания, являющихся ярко выраженными нелинейными нагрузками, генерирующими высшие гармоники тока, в том числе и токи нулевой последовательности (ТНП), что, наряду с асимметрией нагрузок, приводит к перегрузке нейтрального провода питающей сети. Известны случаи, когда действующее значение тока нейтрали распределительной сети превышало фазные значения токов в 1,5 и более раза [2]. Негативные воздействия высоких уровней ТНП описаны в работах [2,5].

Устройства фильтрации ТНП называют фильтрами токов нулевой последовательности (ФТНП) [8], фазокомпенсирующими, шунтовыми симметрирующими устройствами (ФКУ, ШСУ) [9,10] или Zero-фильтрами [11]. Большой вклад в разработку ФКУ и ШСУ в СССР и Украине внесли ученые Института электродинамики НАН Украины А.К.Шидловский, В.Г.Кузнецов, И.В.Волков, А.Ф.Жаркин, А.Д.Музыченко, Н.Н.Каплычный, В.А.Новский, В.Б.Данилюк, А.В.Самков, О.С.Якимов и др.

Наиболее удачными ФКУ и ШСУ являются автотрансформаторы (АТ) с трехстержневыми магнитопроводами и включенными бифилярно намотанными обмотками (для уменьшения индуктивности цепи протекания ТНП) во встречный зигзаг. До 70–80 гг. подобные АТ применялись в основном для симметрирования напряжения и тока в фазах при несимметричном распределении однофазных нагрузок.

Целью статьи является описание разработанных в ИЭС им Е.О.Патона современных автоматизированных методов расчета индуктивности цепи протекания ТНП обмоток АТ фильтров при бифилярной и концентрической намотке проводников обмоток, сравнение значений этих индуктивностей при различном выполнении обмоток и выработка рекомендаций по использованию рассмотренных способов изготовления обмоток ФТНП применительно к электросетям с различными параметрами.

На основе метода расчета индуктивности сложных систем однофазных шин прямоугольного сечения [3], предварительно преобразовав табличные данные из этой работы в непрерывные сплайн-функции, авторами разработан автоматизированный метод расчета индуктивности цепи протекания ТНП в бифилярных (однослойных двухходовых спиралах) обмотках АТ ФТНП. Метод позволяет автоматизировать процесс расчета индуктивного сопротивления рассеяния ФТНП и с достаточной для практики точностью рассчитывать значение этой индуктивности. Задание требуемого уровня индуктивности цепи протекания ТНП в фильтре тесно связано с уровнем индуктивностей рассеяния сетевого трансформатора $L_{S,tr}$ и индуктивности участка линии L_{line} между трансформатором и ФТНП. Чем меньше индуктивность рассеяния ФТНП по сравнению с суммой $L_{S,tr}$ и L_{line} , тем лучше фильтрация

ТНП. Для этого используется бифилярная [8] или чередующаяся концентрическая (послойная) намотка проводников обмоток на каждом из стержней магнитопровода.

Рассмотрим катушку с бифилярной намоткой проводников двух обмоток фаз АТ ФТНП типа зигзаг, с количеством витков в каждой обмотке w и имеющих одинаковое количество параллельных проводников. На рис. 1 показаны два случая расположения двух параллельных проводников двух обмоток фаз на одном стержне магнитопровода. Одной обмотке соответствуют номера параллельных проводников 1 и 2, другой – 3 и 4. Направления в проводниках даны для ТНП (в ФТНП они в противофазе).

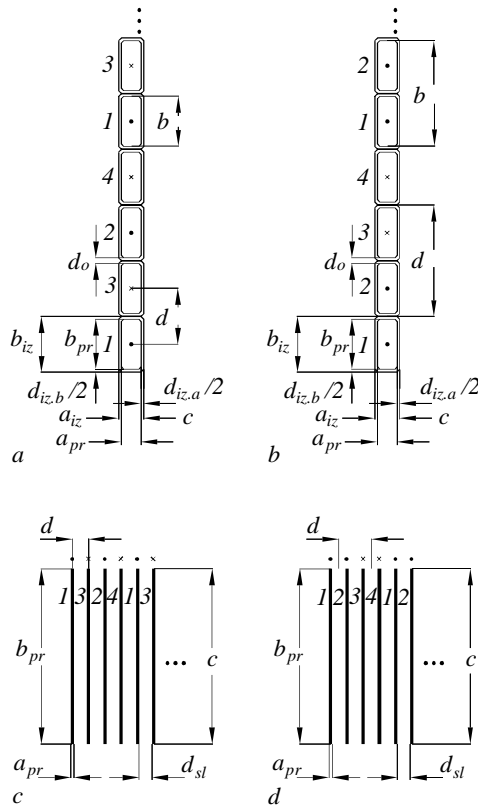


Рис. 1

Рассчитаем эквивалентное расстояние между центрами проводников или центрами набора параллельных проводников двух обмоток:

– в случае проводников из фольги

$$d = k_{raz}[n'_r a_{pr} + d_{sl}]; \quad (1)$$

– в случае проводников прямоугольного поперечного сечения при расположении соседних проводов в бифиляре в аксиальном направлении

$$d = n'_a b_{iz} / k_{uk}, \quad (2)$$

где k_{raz} – коэффициент разбухания обмотки (в радиальном направлении), $k_{raz} = 1,05 \dots 1,25$; n'_r – эквивалентное количество параллельных проводников в радиальном направлении. При чередовании проводников по схеме 1–3–2–4–1–3–2–4–..., $n'_r = 1$, при чередовании проводников по схеме 1–2–3–4–1–2–3–4–..., $n'_r = n_r$; n_r – фактическое количество проводников в радиальном направлении; a_{pr} – ширина проводника; d_{sl} – толщина межслоевой изоляции; n'_a – эквивалентное количество проводников в аксиальном направлении. При чередовании проводников по схеме 1–3–2–4–1–3–2–4–..., $n'_a = 1$, при чередовании проводников по схеме 1–2–3–4–1–2–3–4–..., $n'_a = n_a$; n_a – фактическое количество проводников в аксиальном направлении; k_{uk} – коэффициент укладки обмотки (в аксиальном направлении), $k_{uk} = 0,85 \dots 0,95$. Таким образом, в случае, когда $n'_r = n_r$ и $n'_a = n_a$, параллельные проводники в расчетных формулах будут приниматься в виде одного эквивалентного проводника. Если обмотка выполняется одним проводом (без распараллеливания проводников обмоток), то $n'_r = n_r = 1$, $n'_a = n_a = 1$.

Эквивалентная высота проводников из фольги:

$$c = b_p, \quad (3)$$

или эквивалентная ширина проводника прямоугольного поперечного сечения в радиальном направлении

$$c = n_{sl} k_{raz} [n'_a a_{pr} + (n'_r - 1) d_{iz.a}]. \quad (4)$$

Здесь n_{sl} – количество слоев обмотки; $d_{iz.a}$ – толщина изоляции проводника на две стороны по ширине проводника a_{pr} (рис. 1 и рис. 2).

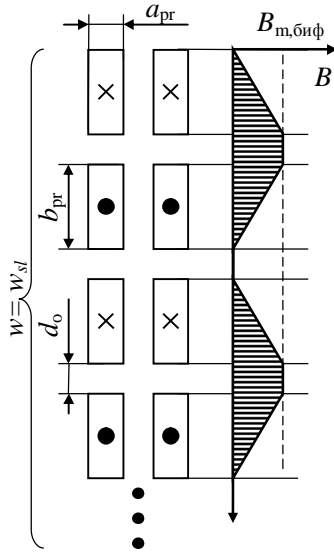


Рис. 2

Эквивалентная высота проводника прямоугольного поперечного сечения:

$$b = [n'_a b_{pr} + (n'_a - 1) d_{iz.b}] / k_{uk}, \quad (5)$$

где b_{pr} – высота проводника; $d_{iz.b}$ – толщина изоляции проводника на две стороны по высоте проводника b_{pr} .

Толщина изоляции между двумя проводниками прямоугольного поперечного сечения:

$$d_o = d_{iz.b} / k_{uk}. \quad (6)$$

Выражения для определения индуктивности цепи протекания ТНП, запишем в виде, удобном для составления программы автоматизированных расчетов, в частности в пакете MathCAD [4].

В работе [3] значение отношения эквивалентных сторон c/b проводника прямоугольного поперечного сечения определяет величина ε' . Обозначим отношение c/b величиной α' и представим значения этих величин в виде векторов:

$$\begin{aligned} \alpha' &= \| 0,0 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8 \ 0,9 \ 1,0 \|; \\ \varepsilon' &= \| 0,0 \ 0,00210 \ 0,00249 \ 0,00244 \ 0,00228 \ 0,00211 \ 0,00197 \\ &\quad 0,00187 \ 0,00181 \ 0,00178 \ 0,00177 \|; \end{aligned}$$

Для того чтобы в пакете MathCAD получить непрерывно изменяющиеся значения этих величин, зададим отношения c/b в виде параметра α , величина которого находится в диапазоне $\alpha=0,00, 0,02 \dots 1,00$. Выполняем сплайн значений векторов ε' и α' кубической сплайн-функцией «cspline», приравняв ее введенной переменной F_ε : $F_\varepsilon = \text{cspline}(\alpha', \varepsilon')$, которую интерполируем функцией «interp» и получаем гладкую функцию ε (которая соответствует величине ε'), зависящую от параметра α : $\varepsilon(\alpha) = \text{interp}(F_\varepsilon, \alpha', \varepsilon', \alpha)$. Таким образом, для автоматизированного расчета в пакете MathCAD образуется аппроксимационная функция $\varepsilon(\alpha)$.

По данным работы [3] зададим векторы X_{yz} и Y_{xz} , значения которых равны соответственно значениям отношений величин b/d и c/b (параметр α):

$$\begin{aligned} X_{yz} &= \| 0,0 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8 \ 0,9 \ 1,0 \|; \\ Y_{xz} &= \| 0,0 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8 \ 0,9 \ 1,0 \| \end{aligned}$$

и векторы Z_{xy} , которые зависят от величин X_{yz} и Y_{xz} [3]:

$$\begin{aligned} Z_{xy_1} &= - \| 0,0 \ 0,0008 \ 0,0034 \ 0,0076 \ 0,0138 \ 0,0220 \ 0,0325 \ 0,0458 \ 0,0625 \ 0,0839 \ 0,1137 \|; \\ Z_{xy_2} &= - \| 0,0 \ 0,0008 \ 0,0033 \ 0,0076 \ 0,0136 \ 0,0217 \ 0,0321 \ 0,0452 \ 0,0616 \ 0,0825 \ 0,1106 \|; \\ Z_{xy_3} &= - \| 0,0 \ 0,0008 \ 0,0032 \ 0,0073 \ 0,0132 \ 0,0210 \ 0,0310 \ 0,0435 \ 0,0591 \ 0,0788 \ 0,1037 \|; \\ Z_{xy_4} &= - \| 0,0 \ 0,0008 \ 0,0030 \ 0,0069 \ 0,0125 \ 0,0198 \ 0,0292 \ 0,0408 \ 0,0551 \ 0,0726 \ 0,0942 \|; \\ Z_{xy_5} &= - \| 0,0 \ 0,0007 \ 0,0028 \ 0,0064 \ 0,0115 \ 0,0182 \ 0,0267 \ 0,0370 \ 0,0497 \ 0,0646 \ 0,0828 \|; \\ Z_{xy_6} &= - \| 0,0 \ 0,0006 \ 0,0025 \ 0,0057 \ 0,0102 \ 0,0161 \ 0,0235 \ 0,0324 \ 0,0431 \ 0,0555 \ 0,0700 \|; \\ Z_{xy_7} &= - \| 0,0 \ 0,0005 \ 0,0021 \ 0,0048 \ 0,0086 \ 0,0136 \ 0,0196 \ 0,0269 \ 0,0354 \ 0,0451 \ 0,0561 \|; \\ Z_{xy_8} &= - \| 0,0 \ 0,0004 \ 0,0017 \ 0,0038 \ 0,0068 \ 0,0106 \ 0,0152 \ 0,0207 \ 0,0269 \ 0,0337 \ 0,0413 \|; \\ Z_{xy_9} &= - \| 0,0 \ 0,0003 \ 0,0012 \ 0,0027 \ 0,0047 \ 0,0073 \ 0,0103 \ 0,0137 \ 0,0176 \ 0,0216 \ 0,0258 \|; \\ Z_{xy_{10}} &= - \| 0,0 \ 0,0002 \ 0,0006 \ 0,0014 \ 0,0024 \ 0,0036 \ 0,0048 \ 0,0062 \ 0,0075 \ 0,0087 \ 0,0098 \|; \\ Z_{xy_{11}} &= \| 0,0 \ 0,0 \ 0,0 \ 0,0001 \ 0,0002 \ 0,0005 \ 0,0010 \ 0,0019 \ 0,0031 \ 0,0046 \ 0,0065 \|; \end{aligned}$$

Средствами пакета MathCAD при помощи функции «augment» создаем матрицу M_{xy} из значений векторов X_{yz} и Y_{xz} :

$$M_{xy} = \text{augment}(X_{yz}, Y_{xz})$$

и матрицу M_z из значений векторов $Z_{xy_1} \dots Z_{xy_{11}}$:

$$M_z = \text{augment}(Z_{xy_1}, Z_{xy_2}, Z_{xy_3}, Z_{xy_4}, Z_{xy_5}, Z_{xy_6}, Z_{xy_7}, Z_{xy_8}, Z_{xy_9}, Z_{xy_{10}}, Z_{xy_{11}}).$$

Выполним сплайн значений матриц M_{xy} и M_z функцией «cspline», приравняв ее введенной переменной F_{xyz} :

$$F_{xyz} = \text{cspline}(M_{xy}, M_z),$$

которую интерполируем функцией «interp» и приравниванием введенной гладкой функции F_{xyz} , зависящей от введенных непрерывно изменяемых параметров X_{yz} и Y_{xz} (соответствующих параметрам X_{yz} и Y_{xz}), значения которых лежат в диапазоне $0 \dots 1$,

$$F_{xyz}(X_{yz}, Y_{xz}) = \text{interp} \left[F'_{xyz}, M_{xy}, M_z, \begin{pmatrix} X_{yz} \\ Y_{xz} \end{pmatrix} \right].$$

Для расчета индуктивности на единицу длины L_{1l} одного проводника секции, которая состоит из пары соседних проводников с токами разного направления, можно воспользоваться формулами из работы [3] для расчета индуктивности на единицу длины L_1 одного проводника пакета с бесконечным количеством параллельных проводников и чередующимся направлением тока в них. Однако, применительно к рассматриваемому случаю эти формулы нуждаются в уточнениях.

Во-первых, они должны учитывать влияние соседних слоев обмотки. Во-вторых, в работе [3] эпюры магнитных индукций, обусловленные магнитными потоками рассеяния соседних проводников при бесконечном количестве проводников, симметричны относительно нуля и знакопеременны по аналогии с мощными шинпроводами, у которых крайние шины имеют половинную толщину и половинные значения токов, протекающих в них. Для пакета с конечным количеством проводников при учете краевых условий, когда все проводники пакета и токи, протекающие в них (в том числе и в крайних), одинаковы, эпюры названных магнитных индукций будут одного знака. При этом квадраты площадей эпюр, а соответственно и значения рассматриваемой индуктивности (индуктивность пропорциональна квадрату магнитной индукции) увеличатся для тонкой фольги практически в 2 раза, а для проводников с малой толщиной изоляции между проводами – приблизительно в 4 раза. Индуктивность на единицу длины одного проводника секции в случае проводников из тонкой фольги при $b_{pr} \gg a_{pr}$ (формула (3-103) работы [3])

$$L_{1l} = 2L_1 = 2 \cdot \frac{\pi \mu_0}{8} \left(\ln 2 + \frac{\pi \cdot c}{2 \cdot d} \right)^{-1}, \quad (7)$$

а в случае проводников прямоугольного поперечного сечения (формула (3-109) работы [3])

$$L_{1l} = 4k_{sl} n_{sl} L_1 = 4k_{sl} n_{sl} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2d}{\pi(b+c)} + \frac{3}{2} - \varepsilon(\alpha) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{20} \left[(-1)^{k+1} F_{xyz}(\beta(k), \alpha) \right] \right\}, \quad (8)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; k_{sl} – коэффициент, учитывающий уменьшение индуктивности за счет перекрестного расположения проводников обмоток по слоям; α – параметр с фактическим значением отношения эквивалентных сторон проводников прямоугольного поперечного сечения c/b ; β – функция вида

$$\beta(k) = b/(kd). \quad (9)$$

Как показали расчеты, в выражении (8) достаточно просуммировать 20 членов ряда k , так как при больших количествах слагаемых индуктивность L_{1l} практически не изменяется.

При однослойной обмотке и многослойных обмотках, когда проводники располагаются друг над другом (рис. 3, на котором показана двухслойная обмотка), в формуле (8) значения коэффициента $k_{sl} = 1$. Но обычно проводники по слоям обмоток располагаются перекрестно. На рис. 4 схематично показаны ячейки, образованные тонкими проводниками двух слоев обмоток, направления токов в проводниках, наличие или отсутствие магнитной индукции B в ячейках и направления магнитных потоков в них. При таком расположении обмоток

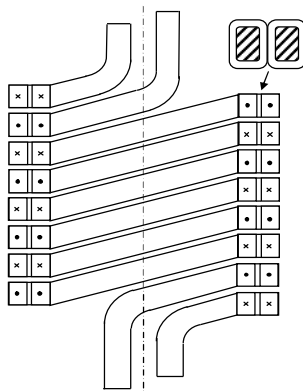


Рис. 3

энергия магнитного поля для тонких проводников снижается примерно в 2 раза по сравнению со случаем однослойных обмоток, и $k_{sl} = 1/2$. Сравнение расчетных и экспериментальных значений индук-

тивности L_{1l} для АТ ФТНП показали, что значения k_{sl} для реальных проводников лежат обычно при двухслойных обмотках в диапазоне 0,6...0,7, при количестве слоев больше двух – $k_{sl} \approx 0,7...0,9$ (значения возрастают с увеличением количества слоев).

Для нахождения индуктивности секции L_l на единицу длины, состоящей из пары соседних проводников с токами разного направления (в рассматриваемом случае – бифилярно намотанных проводников двух обмоток), необходимо значение индуктивности L_{1l} умножить на 2:

$$L_l = 2L_{1l}. \quad (10)$$

При определении индуктивности цепи протекания ТНП L_{0l} на единицу длины проводника обмотки АТ ФТНП для бифилярно намотанных проводников двух обмоток зигзага необходимо значение индуктивности L_l умножить на количество проводников с током одного направления (на количество витков w одной обмотки зигзага):

– в случае проводников из фольги

$$L_{0l} = wL_l n'_r / n_r; \quad (11)$$

– в случае проводников прямоугольного поперечного сечения

$$L_{0l} = wL_l n'_a / n_a. \quad (12)$$

Индуктивность цепи протекания ТНП L_0 АТ ФТНП для бифилярно намотанных проводников двух обмоток зигзага при средней длине витка обмотки l_{sr} будет равна

$$L_0 = l_{sr} L_{0l}. \quad (13)$$

Погрешность расчета индуктивности цепи протекания ТНП L_0 по сравнению с опытными данными АТ ФТНП в случае проводников из фольги не превышала 10%, а в случае проводников прямоугольного поперечного сечения с двухслойными бифилярными обмотками – 12%, что допустимо для проектирования. При многослойной обмотке без экранов эта погрешность может возрасти до 18%. Однако, катушка с бифилярными обмотками в рассматриваемых фильтрах содержит обычно не более трех слоев, а при их большем количестве между каждыми парами слоев устанавливаются электромагнитные экраны, уменьшающие рассеяние, сводя для расчета индуктивности рассеяния многослойную обмотку к двухслойной. Поэтому разработанный метод может быть рекомендован для расчета индуктивности L_0 АТ ФТНП.

Авторами предложен еще один метод расчета индуктивности цепи протекания ТНП, основанный на методе расчета индуктивности рассеяния чередующихся обмоток трансформатора [1], который может быть применен в методиках расчета и компьютерных программах АТ ФТНП, содержащих циклы по многократному пересчету параметров АТ (например, в оптимизационных математических моделях АТ). На рис. 2 показаны эпюры магнитной индукции, обусловленные магнитными потоками рассеяния пар проводников обмоток АТ ФТНП.

Индуктивность на единицу длины одной секции, состоящей из пары проводников прямоугольного поперечного сечения [1], будет равна:

– в случае проводников из фольги

$$L_l = \mu_0 \frac{1}{n'_a b_{pr}} \left(k_{raz} d_{sl} + \frac{2d}{3} \right), \quad (14)$$

– в случае проводников прямоугольного поперечного сечения

$$L_l = k_{sl} \mu_0 \frac{k_R}{n'_r a_{pr}} \left(d_o + \frac{2d}{3} \right), \quad (15)$$

где k_R – коэффициент Роговского для чередующихся обмоток [1]:

$$k_R = 1 - \frac{1}{\pi u} \left(1 - e^{-\pi u} \right) \left[1 - \frac{1}{2} e^{-2\pi v} \left(1 - e^{-\pi u} \right) \right], \quad (16)$$

u, v – безразмерные коэффициенты $u = c/(2d)$, $v = (d_{kor} + 0,5d_{iza})/(2d)$; d_{kor} – толщина корпусной изоляции катушки с обмоткой (расстояние от стержня магнитопровода до обмотки).

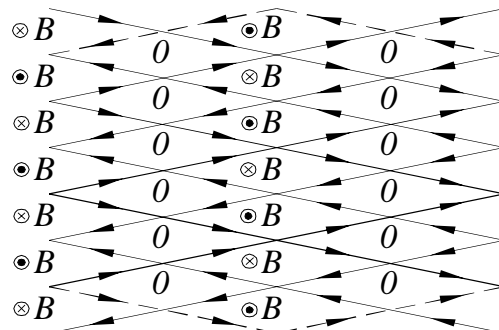


Рис. 4

Индуктивность на единицу длины L_{1l} одного проводника секции равна:

$$L_{1l} = L_l/2. \quad (17)$$

Индуктивности L_{0l} и L_0 вычисляются соответственно по формулам (12) и (13). Погрешность расчета индуктивности цепи протекания ТНП L_0 по сравнению с опытными данными АТ ФТНП для проводников из фольги соизмерима с рассмотренным первым методом, а для проводников прямоугольного поперечного сечения с двухслойными бифилярными обмотками не превышала 10%.

Отметим, что при бифилярной намотке проводников межвитковое напряжение равно фазному напряжению. И, если для проводников из фольги усиление межвитковой изоляции (соответствующей межслойной изоляции, рассчитанной на фазное напряжение) не вызывает трудностей при изготовлении обмотки, то для проводников прямоугольного поперечного сечения, помимо усиления межслойной изоляции, требуется дополнительно изолировать проводники друг от друга в одном слое, что существенно усложняет технологию изготовления катушек с обмотками.

Подобного усложнения технологии в случае проводников прямоугольного поперечного сечения лишены катушки с чередующимися слоями обмоток (так называемая послойная намотка), позволяющими обеспечить еще меньшие значения индуктивности протекания ТНП. При этом обмотки наматываются так, как обмотки классического АТ, но с усиленной межслойной изоляцией, за тем лишь исключением, что в конце каждого слоя делается так называемая «петля». После окончания намотки каждая «петля» разрезается, и образуется два вывода. Выводы соединяются таким образом, как это показано на рис. 5, на котором представлен принцип намотки катушки с чередующимися обмотками (два слоя в секции), где $O1-O1'$ – первая обмотка, $O2-O2'$ – вторая обмотка; $I_1 = I_2$ – токи в этих обмотках. Такая намотка подразумевает наличие секций с различными обмотками. Секция может состоять из пары слоев (слой одной обмотки и слой второй обмотки), либо большего количества слоев. При большем количестве слоев в секции, наматываются два слоя одной обмотки, а потом два слоя другой обмотки.

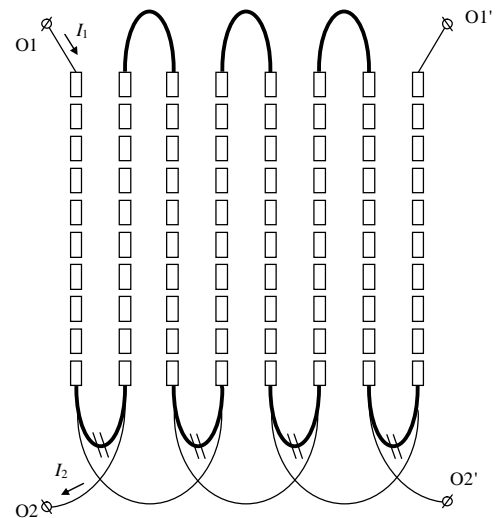


Рис. 5

Расположение проводников в катушке с чередующимися обмотками и направление тока в них для обмотки с двумя слоями показано на рис. 6. Также на рис. 6 показана эпюра распределения магнитной индукции в аксиальном направлении между слоями проводников обмоток.

Расчет индуктивности цепи протекания ТНП при исполнении катушек подобным образом может быть произведен с помощью формул, приведенных в работе [1]. В данной работе предложены формулы для расчета индуктивности рассеяния трансформатора в случае, когда слои с проводниками двух обмоток чередуются друг с другом. В рассмотрение принимается симметричная чередующаяся обмотка. Рассуждения, приведенные в работе [1], можно адаптировать и к случаю чередующихся слоев обмоток АТ.

Запишем формулу для нахождения индуктивности рассеяния одной двуслойной секции ФТНП

$$L_0 = \frac{\mu_0 w_{sl}^2 k_R l_{sr} (\delta_{12} + 2a_{pr} / 3)}{h_k}. \quad (18)$$

Здесь коэффициент Роговского равен

$$k_R = 1 - \frac{1}{\pi u} (1 - e^{-\pi u}), \quad (19)$$

а безразмерный коэффициент $u = h_k / (2a_{pr} + \delta_{12})$; δ_{12} – расстояние между проводниками разных обмоток; h_k – высота катушки

$$h_k = (w_{sl} + 1)(b_{pr} + d_o); \quad (20)$$

w_{sl} – количество витков в слое обмотки.

Общая индуктивность ФТНП для ТНП при n секциях, соединенных последовательно, с учетом (16) равна

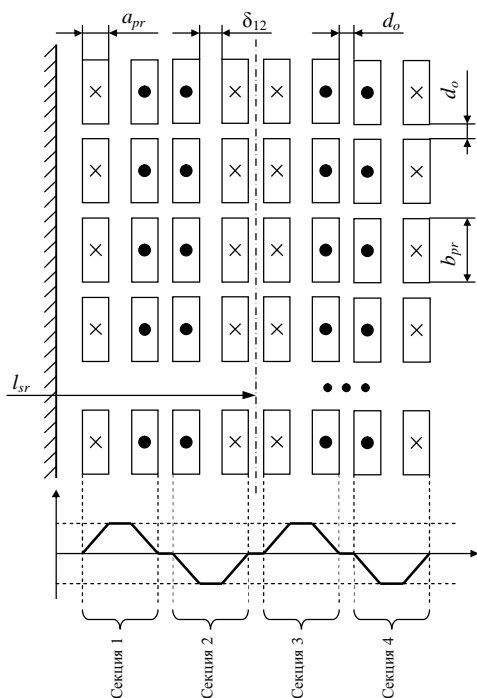


Рис. 6

На рис. 7 показаны зависимости индуктивностей цепи протекания ТНП на единицу длины проводника обмотки L_l и L_{Ol} (мкГн/м) от соотношения сторон проводника b_{pr}/a_{pr} при его сечении, равном 20 мм^2 , и изоляционных расстояниях $\delta_{12} = d_o = 0,5 \text{ мм}$. Графики даны для различных способов выполнения обмотки. На рис. 7: 1 – бифилярное расположение проводников обмотки по схеме на рис. 1, а; 2 – бифилярное расположение проводников обмотки по схеме на рис. 1, б; 3 – бифилярное расположение проводников двухслойной обмотки, выполненной как показано на рис. 3; 4 – чередующиеся обмотки с секциями по два слоя.

Можно сделать вывод, что при намотке обмоток бифилярно наименьшее значение индуктивности цепи протекания ТНП имеет место при проводниках с соотношением сторон $b_{pr}/a_{pr} = 1$, а наименьшее значение индуктивности можно получить при выполнении обмотки в 1 слой, что возможно лишь в АТ с малым количеством витков (в мощных АТ). При выполнении обмотки в 2 слоя индуктивность цепи протекания ТНП возрастает в 1,4...2,4 раза, по сравнению с однослойной обмоткой. При соотношении сторон проводника $b_{pr}/a_{pr} > 2$ для получения наименьшего значения индуктивности цепи протекания ТНП, целесообразно применение чередующихся обмоток с секциями по два слоя. По сравнению с двухслойными бифилярными обмотками индуктивность чередующихся обмоток может быть уменьшена в 2,0...8,5 раза, причем тем сильнее, чем больше соотношение b_{pr}/a_{pr} , что благоприятно для параллельных проводников обмоток, располагаемых в аксиальном направлении. При этом значительно уменьшаются уровень добавочных потерь в проводниках обмотки от вихревых токов, вызываемых магнитными потоками рассеяния. В чередующихся обмотках не возникают проблемы с необходимостью использования межвитковой изоляции, а само изготовление обмоток технологичнее по сравнению с выполнением бифилярных обмоток.

Индуктивное сопротивление ТНП для основной частоты АТ ФТНП на фазу будет равно

$$X_0 = \omega L_0 \quad (24)$$

или в относительных единицах:

$$X_{0*} = X_0/Z_b, \quad (25)$$

где Z_b – базовое сопротивление, определяемое при номинальных значениях напряжения U_{ph} и тока I_{ph} фаз (фаза – нуль), $Z_b = U_{ph}/I_{ph}$. Ток I_{ph} равен для рассматриваемого АТ 1/3 тока нейтрали.

Полное сопротивление ТНП

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}, \quad (26)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 w_{sl}^2 k_R l_{sr} n (\delta_{12} + 2a_{pr} / 3)}{(w_{sl} + 1)(b_{pr} + d_o)}. \quad (21)$$

Отметим, что найденная индуктивность равна искомой индуктивности двух обмоток зигзага на разных стержнях, соединенных последовательно.

В случае, когда в секции два слоя, расчет индуктивности рассеяния цепи протекания ТНП на единицу длины одного проводника обмотки производится после деления на полную длину провода $w l_{sl} = w_{sl} n l_{sl}$ по формуле

$$L_{Ol} = \frac{\mu_0 w_{sl} k_R (\delta_{12} + 2a_{pr} / 3)}{(w_{sl} + 1)(b_{pr} + d_o)}. \quad (22)$$

Для оценки величины и сравнения индуктивности L_{Ol} при намотке различными способами пренебрежем высотой одного витка в слое (при переходе со слоя на слой) считая, что место, необходимое под обмотку, определяется количеством витков в слое w_{sl} , а не $(w_{sl} + 1)$. Исходя из этих соображений, преобразуем формулу (22)

$$L_{Ol} \approx \frac{\mu_0 k_R (\delta_{12} + 2a_{pr} / 3)}{b_{pr} + d_o}. \quad (23)$$

а в относительных единицах

Здесь R_0 – активное сопротивление проводников обмотки.

$$Z_{0*} = Z_0/Z_b. \quad (27)$$

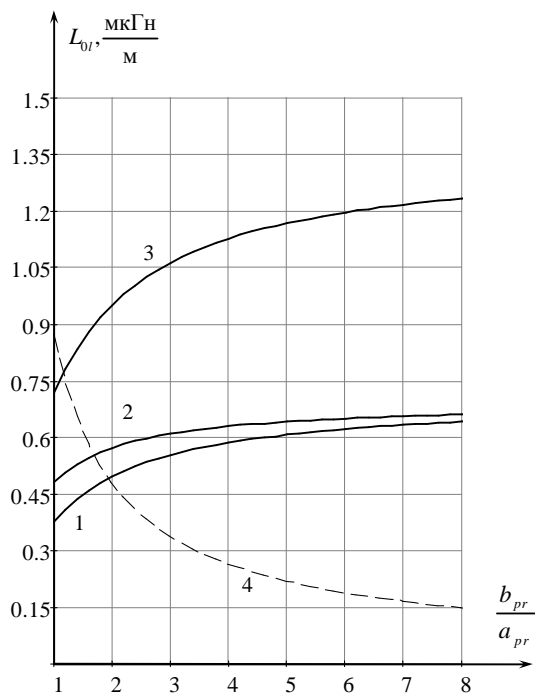


Рис. 7

ность цепи протекания ТНП возрастает. При соотношении сторон проводника больше двух для получения наименьшего значения индуктивности цепи протекания ТНП целесообразно применение чередующихся обмоток с секциями по два слоя, при этом индуктивность таких обмоток значительно меньше, чем у бифилярных обмоток, а технологичность их изготовления выше.

Значения индуктивного сопротивления ТНП должно рассчитываться для основной частоты, так как его определение на изготовленном АТ ФТНП по стандартам измеряется по основной частоте. Значения Z_{0*} и X_{0*} (при средней температуре в обмотке 20°C) для АТ ФТНП различных проходных мощностей обычно не должны превышать следующих значений:

- 15 кВ·А...150 кВ·А – $Z_{0z*} < 0,95\%$, $X_{0z*} < 0,3\%$;
- 225 кВ·А...300 кВ·А – $Z_{0z*} < 1,00\%$, $X_{0z*} < 0,5\%$;
- 400 кВ·А – $Z_{0z*} < 1,20\%$, $X_{0z*} < 0,6\%$;
- 500 кВ·А – $Z_{0z*} < 1,50\%$, $X_{0z*} < 1,0\%$.

В случае, когда значение Z_{0z*} оказывается больше требуемого, его можно понизить, применяя параллельные проводники, увеличивая суммарное поперечное сечение проводника обмотки и уменьшая его активное сопротивление.

Выводы. Разработанные методы расчета индуктивности цепи протекания ТНП при бифилярном и послойном выполнении обмоток АТ ФТНП обладают приемлемой для практики точностью. При намотке обмоток бифилярно наименьшее значение индуктивности цепи протекания ТНП имеет место при однослойной обмотке и проводниках с квадратным поперечным сечением. При выполнении обмотки в два слоя и более индуктив-

1. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
2. Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов, В.А., Красилов И.А. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники.– 2002. – № 6.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3е изд. Перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986 – 488 с.
4. Кирьянов Д.В. MathCAD 14 / Д.В. Кирьянов.– С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007.– 704 с.
5. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника. Науч.-техн. сб. / Под ред. Г.М. Малышкова, А.В. Лукина. – М.: АОЗТ «ММП-Ирбис», 2002.– Вып. 5.
6. Особенности работы трехфазно-двухфазного фильтра токов нулевой последовательности / И.В.Пенегов, И.В.Волков, А.С.Письменный, В.М.Безручко, Г.С.Кривенко, С.В.Рымар, В.П.Кабан, В.Ю.Матвеев // Вісник нац. техн. ун-ту «ХПІ». Зб. наук. пр. “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.” – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 45. – С. 110–118.
7. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528с.
8. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наук. думка, 2005. – 210 с.
9. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985.– 268 с.
10. Шидловский А.К., Новский В.А., Капльчич Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с.
11. Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power. – NY: IEEE PRESS, 1995. – 202 p.

Надійшла 05.05.2009