

## АНАЛИЗ ТИПИЧНЫХ ОШИБОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ В МАЛОМАГНИТНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Луников В.С., к.т.н., доц., Серeda А.Г., к.т.н., Крюкова Н.В., Гелярoвская О.А.  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты", кафедра "Общая электротехника", "Компьютерная математика и математическое моделирование"  
тел. (0572) 40-08-64, E-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua.

Ерисов А.В.  
Отделение магнетизма института электродинамики НАН Украины  
Украина, 61106, г. Харьков, ул. Индустриальная 19, а/я 72  
тел./факс (0572) 99-21-62

*Розглянуті особливості і типові помилки проектування силових трансформаторів із зниженими рівнями зовнішнього магнітного поля.*

*Рассмотрены особенности и типичные ошибки проектирования силовых трансформаторов со сниженными уровнями внешнего магнитного поля.*

### ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитная совместимость стала в последние годы фактором, определяющим перспективы развития электротехники во всем мире. Об этом свидетельствует ряд введенных в мире и Украине стандартов. Существующие тенденции проектирования силового электротехнического оборудования (ЭО) характеризуются увеличением количества ограничений, которые накладываются на его конструкцию. При этом традиционные нормализованные параметры и характеристики ЭО (масса, габаритные размеры, температурный диапазон функционирования и т.д.) все чаще дополняется специальными требованиями. Среди них следует выделить требования по уровням внешнего магнитного поля (ВМП), которые стали предъявляться к ЭО общепромышленного исполнения [1-3], а не только к корабельному оборудованию специального назначения. Используя терминологию корабельных, такое оборудование получило название маломагнитного ЭО [4-6].

До недавнего времени отсутствовало научное обоснование методологии применяемых средств компенсации (снижения) ВМП и она сводилась, по сути, к поиску и разработке технических решений для каждого конкретного типа ЭО. Учитывая отсутствие общепринятых решений и недостаточную подготовку конструкторов ЭО в этой области техники, а также сложность достижения высоких требований по уровням ВМП, специалистами в области маломагнитного ЭО разрабатываются рекомендации конструктивного характера, выполнение которых должно было бы обеспечивать достижение этих уровней. Эти рекомендации чаще всего составляются специалистами, хорошо ориентирующимися, например, в области магнетизма и имеющими лишь общее представление обо всем объеме задач, стоящих перед конструктором ЭО. В силу этого их предложения не воспринимаются конструктором как безусловные, так как они в боль-

шей степени носят не конкретный, а концептуальный характер. Поэтому от разработчика ЭО требуется скрупулезный и всесторонний анализ всего перечня рекомендаций по обеспечению того либо иного параметра, исходя из возможности их практической реализации, специфики работы ЭО, влияния их на другие нормализованные характеристики. Отсутствие такого подхода на начальных этапах проектирования может привести к тому, что удачные на первый взгляд рекомендованные конструктивные решения при их практической реализации не дают должного эффекта. Отсутствие такого эффекта связано с появлением новых, неучтенных конструктором факторов, например, технологического характера, либо возникших при этом затруднений в обеспечении других нормализованных характеристик. Как правило, эти новые факторы появляются по причине недостаточности знаний конструктором механизма влияния того либо иного фактора на нормализованный параметр.

В настоящей статье на примере силового трансформатора (Т) рассмотрены типичные ошибки проектирования.

Силовой Т в данной статье выбран в качестве базового ЭО потому, что его электромагнитные характеристики и параметры достаточно просто моделируются, а также разработан ряд средств, применяемых для компенсации (снижения) его ВМП [7]. Кроме того, в большинстве случаев требуется компенсация ВМП на достаточно большом удалении от него, превышающем три габарита. В этом случае ВМП с достаточной для практических целей точностью может быть описано дипольной составляющей, спадающей пропорционально кубу расстояния от его центра. При этом Т рассматривается как сосредоточенный источник магнитного поля, характеризуемый вектором магнитного момента [6]. Такое представление Т имеет строгую физическую интерпретацию и упрощает компенсацию его ВМП, которая сводится, по сути, к

компенсации его магнитного момента.

### 1. СТЕРЖНЕВОЙ ТРАНСФОРМАТОР

При разработке в 80-х годах силового Т мощностью 40 кВт к нему были предъявлены жесткие требования по уровню создаваемого им магнитного момента на частоте питающей сети.

Разработчики этого Т в первую очередь опирались на предшествующий опыт снижения магнитного момента трехфазного Т, имеющего классическую трехстержневую магнитную систему, оси стержней которой расположены в одной плоскости. При этом основные предпосылки к выбору конкретных технических решений опирались на физические процессы в Т, учет его геометрических и электрических параметров. Основные особенности компенсации магнитного момента связывались с возможностью симметрирования конструкции Т, поскольку этот метод в определенной мере отвечал геометрической симметрии конструкции силовых Т [6].

На рис. 1 показана схема размещения обмоток фаз А, В, С относительно стержней 1, 2, 3 магнитной системы. Ось обмоток обозначена у, а перпендикулярная ей ось – х.

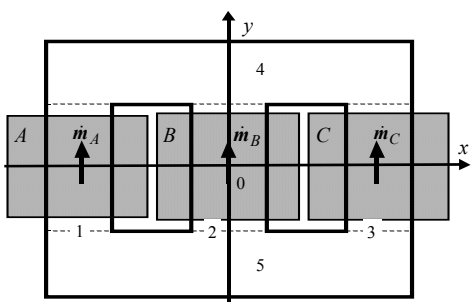


Рис. 1. Магнитные моменты обмоток трансформатора

В соответствии с теоретическими представлениями, магнитный момент такого Т имеет две основные составляющие. Одна из них создается обмотками с током, а вторая - намагниченностью магнитной системы. Составляющими магнитных моментов выводов обмоток можно пренебречь.

Вектор магнитного момента каждой из обмоток направлен вдоль оси обмотки, а его комплексная величина описывается соотношением

$$\dot{m}_v = I_v e^{-j\frac{2\pi}{3}(v-1)} w S k_{ст}, \quad (1)$$

где  $\dot{m}_v$  - комплексный магнитный момент обмотки v-й фазы; v - индекс, равный соответственно 1, 2, 3 для обмотки фазы А, В, С;  $I_v$  - амплитуда тока обмотки; j - мнимая единица; w - число витков обмотки; S - векторная величина, численно равная средней площади витка обмотки, направление которой в данном случае совпадает с осью обмотки (у);  $k_{ст}$  - коэффициент усиления стержнем магнитной системы Т магнитного момента обмотки.

Как видно из соотношения (1), при условии, что амплитуды токов фаз, число витков обмоток и их площади и коэффициенты усиления стержней равны

между собой, комплексные векторы магнитных моментов обмоток Т образуют симметричную звезду на комплексной плоскости. Вследствие этого результирующий магнитный момент обмоток Т равен нулю. Тем самым определяются требования к указанным параметрам обмоток маломагнитного Т.

Вторая составляющая магнитного момента создается намагниченностью ярем магнитной системы Т. На рис. 1 верхнее ярмо обозначено цифрой 4, а нижнее - 5. Исходя из физических представлений о распределении магнитных потоков в магнитной системе Т (рис. 2) установлено, что различие намагниченностей ярем связано с неодинаковым расположением обмоток различных фаз относительно стержней. Так, при смещении обмоток Т в сторону нижнего ярма 5 поток  $\Phi'$ , намагничивающий верхнее ярмо 4, отличается от магнитного потока  $\Phi$ , намагничивающего ярмо 5, на величину потока рассеяния  $\Phi''$ .

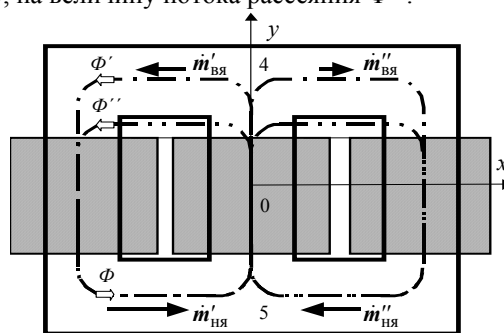


Рис. 2. Магнитные моменты ярем магнитной системы трансформатора

Соответствующие этому распределению намагничивающих магнитных потоков магнитные моменты  $\dot{m}'_{вЯ}$ ,  $\dot{m}''_{вЯ}$  верхнего и  $\dot{m}'_{нЯ}$ ,  $\dot{m}''_{нЯ}$  нижнего участков ярем Т отличаются по величине. Результирующий магнитный момент  $\dot{m}_я$ , равный их сумме

$$\dot{m}_я = \dot{m}'_{вЯ} + \dot{m}''_{вЯ} + \dot{m}'_{нЯ} + \dot{m}''_{нЯ}, \quad (2)$$

отличен от нуля и направлен вдоль оси ярем по оси х.

Исходя из такого физического представления намагниченности ярем магнитной системы Т, предполагалось, что скомпенсировать эти составляющие магнитного момента можно при одновременном выполнении двух обязательных условий: одинаковое размещение осей обмоток относительно осей стержней (выравнивание величин воздушных зазоров) и установку обмоток фаз Т симметрично относительно соответствующих геометрических центров стержней.

Выполнение этих условий обеспечивает выравнивание магнитных потоков, проходящих по верхнему и нижнему ярмам. Вследствие этого составляющие магнитных моментов ярем  $\dot{m}'_{вЯ}$ ,  $\dot{m}'_{нЯ}$  и  $\dot{m}''_{вЯ}$ ,  $\dot{m}''_{нЯ}$  становятся равными, и, учитывая их встречную направленность, суммарный магнитный момент в направлении осей ярем х в соответствии с соотношением (2) равен нулю.

Достижение этой симметрии в Т с шихтованной магнитной системой может быть достигнуто путем "ужесточения" технологии, которое сводится к введе-

нию дополнительных операций при сборке Т, включая выравнивание величин зазоров между обмотками и стержнями и центрирование обмоток по длине стержней.

На практике рассмотренные технические решения не обеспечили уменьшение магнитного момента Т до требуемого уровня. Оказалось, что величина магнитного момента обмотки фазы существенно зависит от симметрии магнитной системы Т. В рассмотренной же "плоской" магнитной системе такая магнитная асимметрия предопределена самой конструкцией. Эта асимметрия обусловлена тем, что обмотки, расположенные на центральном и крайних стержнях магнитной системы, испытывают различное влияние соседних обмоток.

Для качественной характеристики этого влияния необходимо положить в соотношении (1), что коэффициенты усиления крайних и центрального стержней отличаются по величине. Вводя обозначения для этих коэффициентов  $k_{стА}$ ,  $k_{стВ}$ ,  $k_{стС}$ , и полагая равенство амплитуд токов фаз из (1) получается следующее соотношение

$$\dot{m}_v = IwS(k_{стА} + k_{стВ}e^{-j2\pi/3} + k_{стС}e^{-j4\pi/3}). \quad (3)$$

В случае равенства коэффициентов крайних стержней  $k_{стА} = k_{стС}$ , учитывающего зеркальную симметрию конструкции трехстержневой магнитной системы, из (3) можно получить простое соотношение для модуля магнитного момента, характеризующего асимметрию обмоток

$$m = IwS(k_{стВ} - k_{стА}). \quad (4)$$

Как следует из (4), величина магнитного момента трехстержневого Т с рассмотренной магнитной системой может достигать существенной величины даже при небольшом отличии коэффициентов усиления стержней за счет больших величин токов обмоток и числа витков.

Таким образом, очевидный путь - "ужесточение" технологии, необходимое для снижения составляющей магнитного момента от намагниченности ярем магнитной системы, не обеспечивает компенсацию магнитного момента Т в целом. Это обусловлено тем, что основной вклад в поле вносят обмотки, магнитный момент которых учитывает асимметрию конструкции магнитной системы. Выравнивание же коэффициентов усиления стержней всех фаз в данной конструкции Т представляет собой сложную научно-техническую задачу.

## 2. ТРАНСФОРМАТОР С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Как следует из соотношения (3), очевидный путь снижения магнитного момента Т заключается в выравнивании между собой величин коэффициентов стержней  $k_{стА}$ ,  $k_{стВ}$ ,  $k_{стС}$ . Поскольку в трехстержневом Т с "плоской" магнитной системой различие этих коэффициентов предопределено самой конструкцией, то потребовался отказ от нее и выбор другой магнитной системы. Разработчики выбрали хрестоматийное решение этой задачи – использовать, несмотря на воз-

никающие при этом технологические сложности, магнитную систему с симметричным пространственным расположением стержней. При этом, исходя из технологических соображений, магнитная система Т была выполнена из трех одинаковых витых О-образных магнитопроводов 1 имеющих поворотную ось симметрии третьего порядка, соприкасающиеся пары стержней которых охвачены обмотками фаз 2, как показано на рис.3. По существу полный вектор магнитного момента такого Т должен был равняться нулю.

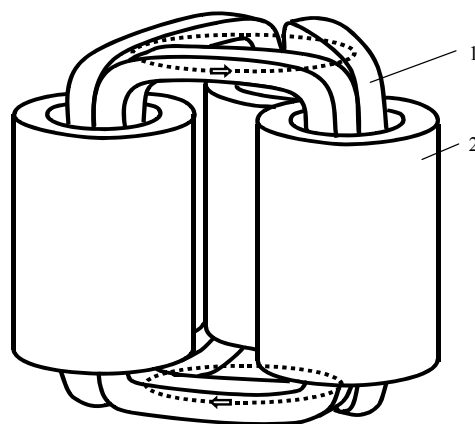


Рис. 3. Трехфазный трансформатор с пространственной магнитной системой

Испытания опытных образцов Т показали, что компонента магнитного момента в направлении оси обмоток действительно близка к нулю и обусловлена технологическими отклонениями в ее изготовлении. Однако радиальные компоненты магнитного момента в направлениях, перпендикулярных осям обмоток, достигали существенных величин, которые даже превышали максимальную величину магнитного момента классического трехфазного Т с "плоской" трехстержневой магнитной системой (рис. 1) аналогичной мощности.

Последующий анализ опытных образцов Т с пространственной магнитной системой показал, что их конструкция в большей степени подвержена действию различных технологических отклонений по сравнению с рассмотренным трехфазным Т (рис. 1). Именно эта особенность и не была учтена конструкторами на начальном этапе проектирования Т.

Особенности критической зависимости магнитных моментов Т от отклонений технологического характера можно объяснить следующим образом.

В идеальном случае, когда технологические отклонения близки к нулю, центры всех обмоток и стержней Т располагаются в одной плоскости. При этом с учетом пространственной симметрии группами верхних и нижних ярем создаются две системы "вращающихся" векторов намагниченности, направленных встречно. На рис. 3 условно показаны векторы намагниченности верхнего и нижнего ярем магнитной системы и образуемые ими контуры вращения.

Для обеспечения магнитной симметрии и отвечающего ей равенства магнитных полей, создаваемых

группами верхних и нижних ярем требуется выполнение двух требований. Во-первых, при сборке магнитной системы из трех О-образных магнитопроводов требуется обеспечить совмещение их центров в одной плоскости. Во-вторых, при намотке обмоток на стержни обеспечить симметричное расположение каждой из обмоток относительно центра стержня. В технологическом плане эти требования сводятся к минимизации отклонений центров стержней  $\Delta_{cv}$  от плоскости симметрии  $G$  и отклонений центров обмоток от центров стержней  $\Delta_{ov}$ . Для наглядности на рис. 4 приведена плоская развертка расположения магнитопроводов и обмоток фаз такого Т. На схеме размеры смещений для наглядности увеличены. Индекс  $v$  принимает значения 1,2,3 соответственно для фаз А, В, С.

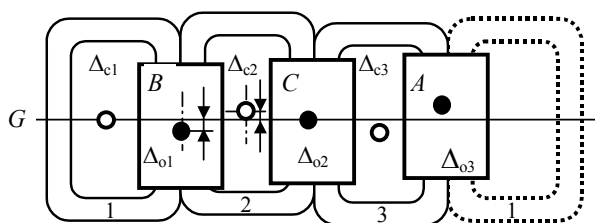


Рис. 4. Схема расположения центров стержней (O) и обмоток (●) трансформатора

Для оценки этих отклонений был проведен анализ технологических возможностей предприятия изготовителя. Было установлено, что технология сборки магнитной системы Т обеспечивает величины отклонений  $\Delta_{cv}$  и  $\Delta_{ov}$  в пределах  $\pm 2$  мм. Обеспечить совмещение геометрических центров обмоток и стержней Т с меньшими технологическими отклонениями в данной конструкции Т оказалось существенно сложнее, чем в Т с "плоской" магнитной системой. Это связано с тем, что идеология выполнения витых магнитопроводов диктует увеличение длины участков стерженья за счет закруглений. С точки зрения ВМП это приводит к увеличению магнитных потоков рассеяния и при наличии асимметрии расположения обмоток к неравномерности распределения намагничивающих потоков в ярмах. Вследствие этого и результирующий магнитный момент Т отличен от нуля. Экспериментальные исследования подтвердили зависимость результирующего магнитного момента от величин и сочетаний этих технологических отклонений смещений центров обмоток и стержней от плоскости симметрии. И хотя эти отклонения заключались в пределах 2 мм, т.е. по сравнению с общей высотой обмотки около 400 мм составляли менее 1 %, зависимость магнитного момента была сильно выражена. Таким образом, в рассматриваемом Т по сравнению с Т с "плоской" магнитной системой увеличилось в два раза число параметров, определяющих его симметрию, и увеличилось их влияние на величины магнитных моментов обмоток и ярем за счет увеличения потоков рассеяния. Это и позволяет объяснить сильную зависимость результирующего магнитного момента Т с пространственной магнитной системой.

Перечисленные особенности данного Т, как источника ВМП, не были учтены при его конструировании. В результате потраченные средства на создание по существу нового более сложного технологического процесса сборки Т не дали должного технического эффекта в части снижения его ВМП.

В последние годы интерес к Т с пространственной магнитной системой возрос. Основной упор в исследованиях делается на симметрирование геометрии и улучшение технологичности конструкции Т, включая ужесточение требований по технологическим отклонениям размеров, повышение энергетических показателей [8]. Однако, как показывает проведенный анализ, с точки зрения электромагнитной совместимости в этих Т не могут быть обеспечены современные требования по уровню ВМП без существенного ужесточения требований к отклонениям центров обмоток и стержней от плоскости симметрии.

### 3. ТРАНСФОРМАТОР ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Следующий пример конструктивной ошибки при снижении магнитного момента касается вентильного Т мощностью 320 кВт, который был предназначен для установки в трехфазном мостовом выпрямителе. Перед разработчиками стояла задача снижения величины магнитного момента, создаваемого намагничивающим током Т. Выбранный путь решения этой задачи также был хрестоматийным – уменьшить величину намагничивающего тока за счет снижения индукции в магнитной системе Т.

Общий вид Т приведен на рис. 5. Магнитная система трансформатора была выполнена броневого типа. Это позволяло рассматривать ее как симметричную с точки зрения магнитных характеристик и считать коэффициенты усиления стержней равными,  $k_{cтA} = k_{cтB} = k_{cтC} = k_{cт}$ . Учитывая большую мощность, Т был выполнен с системой водяного охлаждения рабочих обмоток. Это позволило без заметного ущерба для его массогабаритных показателей снизить величину рабочей индукции до 0,8 Тл, а намагничивающий ток – до 0,94 А. В результате величина магнитного момента, создаваемого намагничивающим током Т, в частности, в режиме холостого хода, была крайне незначительна.

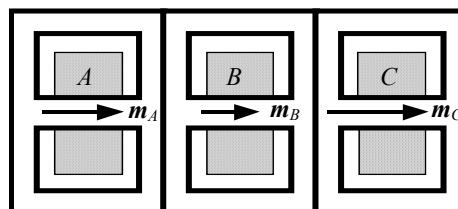


Рис. 5. Схема расположения обмоток и магнитопроводов фаз трансформатора с броневого магнитной системой

Однако, при работе Т в составе выпрямителя величина этого магнитного момента возросла более чем на порядок и существенно превысила предъявляемые к

нему требования по величине ВМП. Особенностью мостового выпрямителя является то, что углы включения противофазных вентилях силового моста отличаются по величине. Для характеристики их отличий от некоторого усредненного значения используется понятие электрической асимметрии углов включения вентилях. Разработчиками Т не был учтен факт наличия электрической асимметрии. Эта электрическая асимметрия приводит к появлению постоянной составляющей тока  $I_{d0}$  во вторичных обмотках Т [9, 10], который в свою очередь увеличивает намагничивающий ток. Следствием этого является существенное увеличение магнитного момента  $m_0$ , обусловленного намагничивающим током.

Подробно процессы намагничивания Т с учетом асимметрии углов включения вентилях описаны в работах [9, 10]. Эти процессы имеют две особенности. Первая особенность связана с тем, что величины токов вентилях нелинейным образом зависят от сочетания отклонений углов включения вентилях. Максимальный уровень постоянной составляющей  $I_{d0}$  тока вентилях обмотки Т получен для неблагоприятного сочетания отклонений углов включения вентилях, которые для этого случая принимаются максимальными, равными по величине [10]

$$I_{d0} = \frac{2I_d}{\pi} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma)} \Delta\alpha, \quad (5)$$

где  $I_d$  – ток нагрузки выпрямителя;  $\alpha, \gamma$  – средние значения соответственно углов включения и коммутации вентилях;  $\Delta\alpha$  – максимальная величина отклонения углов включения вентилях.

Результаты измерений и расчетов по соотношению (5) показали, что величина тока  $I_{d0}$  при асимметрии  $\Delta\alpha$  углов включения вентилях в пределах 1,5 эл. град. могла достигать 10 А при нагрузке выпрямителя  $I_d = 700$  А, что в свою очередь повышало реальную индукцию в магнитной системе Т до 1,5 Тл.

Вторая особенность заключается в том, что вследствие нелинейности характеристик магнитной цепи Т происходит нелинейное искажение синусоидальных токов фаз обмоток Т и, как следствие, появляются составляющих тока на частотах, кратных частоте сети питания. В первом приближении эта нелинейность представляется кривой намагничивания стали Т, аппроксимируемой выражением  $H = \text{ash}(b\Phi/S_c)$  [9]. При этом токами кратных частот Т создаются дополнительные составляющие магнитного момента и на других частотах, кратных частоте сети. Максимальная величина магнитного момента Т в этом случае достигается на одной из первых трех частот:

$$m_{01} = w_1 S k_{\text{ст}} J_1 \left[ \sqrt{(q_c + q_{\text{я}})^2 + (k I_{d0} \Delta\alpha / \pi)^2} - q_c \right]; \quad (6)$$

$$m_{02} = w_1 S k_{\text{ст}} J_2 \sqrt{3} k I_{d0} \Delta\alpha / \pi;$$

$$m_{03} = w_1 S k_{\text{ст}} J_3 \left[ 2 \sqrt{(q_c + q_{\text{я}})^2 + (k I_{d0} \Delta\alpha / \pi)^2} + q_c \right],$$

где  $m_{01}, m_{02}, m_{03}$  – амплитуды гармоник магнитного момента Т первых трех частот;  $w_1$  – число витков первичной обмотки, соединенной треугольником;  $S$  –

площадь витка первичной обмотки;  $k_{\text{ст}}$  – коэффициент усиления стержня;  $q_c, q_{\text{я}}, k_c$  – коэффициенты, определяемые соотношениями:

$$q_c = 2a l_c / w_1; \quad q_{\text{я}} = 4\gamma l_{\text{я}} / w_1; \quad k_c = 2 / (w_1 J_0);$$

$J_n(jb\Phi/S_c)$  – полином Бесселя 1 рода порядка  $n$ ,  $n = 0, 3$ ;  $j$  – мнимая единица;  $a$  – один из коэффициентов аппроксимированной кривой намагничивания;  $\Phi$  – магнитный поток в стержне магнитопровода;  $S_c$  – площадь сечения стержня.

Как показали расчеты по соотношениям (6) и экспериментальные исследования, величина магнитного момента такого Т оказалась выше, чем в обычных трансформаторах, с большей величиной намагничивающего тока в режиме холостого хода. Таким образом, концепция снижения магнитного момента Т, построенная на уменьшении величины намагничивающего тока оказалась для Т выпрямителя ошибочной, ввиду того, что не был учтен фактор электрической асимметрии углов включения вентилях.

Это обстоятельство предопределило и последующие ошибки при монтаже цепей системы управления выпрямителя. Так, уменьшение массогабаритных показателей Т за счет его выполнения с системой водяного охлаждения позволило встроить Т в шкаф выпрямителя. При этом элементы системы управления были расположены в верхней части шкафа, в удалении от Т и силового блока. Этим удалением системы управления от силовоточных цепей выпрямителя, по мнению его разработчиков, обеспечивалось выполнение требований электромагнитной совместимости в части магнитных полей слаботочных элементов системы управления с силовоточными токопроводами, силовым блоком и Т выпрямителя. С этой же целью монтаж слаботочных проводников цепей системы управления был выполнен в виде жгутов, которые укладывались по возможности в удалении от силовоточных цепей по каркасу шкафа. Исходя из общих соображений предполагалось, что принятые на этапе проектирования выпрямителя технические решения должны дать положительный результат в части помехозащищенности выпрямителя по магнитным полям.

Однако первые же испытания опытных образцов показали, высокую частоту сбоев в работе системы управления выпрямителя. Анализ этих сбоев показал, что одной из причин их появления являются магнитные поля, создаваемые намагничивающим током Т. Механизм влияния этих полей следующий. За счет взаимоиндуктивных связей обмоток Т с каркасом выпрямителя магнитными потоками рассеяния внутри шкафа индуцируются вихревые токи. Основным источником этих магнитных потоков рассеяния является Т, магнитный момент которого характеризует интенсивность этих потоков и нелинейно зависит от его намагничивающих токов. Учитывая, что Т расположен в непосредственной близости от каркаса и величина его магнитного момента существенна, величина тока в отдельных участках каркаса может достигать значительных величин. Измеренные с помощью пояса

Роговского величины токов в элементах каркаса в рассматриваемом выпрямителе достигали 200 А.

Для обеспечения требований электромагнитной совместимости Т со слаботочными элементами системы управления выпрямителя были проведены дополнительные исследования и разработаны технические решения. По сути, они были направлены на снижение величин магнитных потоков рассеяния Т, удаление жгутов слаботочных цепей от токопроводов, блоков силовой цепи и каркаса и разработку симметрированной системы управления. Снижение магнитных потоков рассеяния Т было обеспечено установкой шести дополнительных короткозамкнутых обмоток (КО1..КО6) на торцах магнитных систем фаз Т, как показано на рис. 6 (обмотки Т не показаны). Для крепления жгутов слаботочных токопроводов системы управления были предусмотрены дополнительные переборки, которые были электрически развязаны с каркасом.

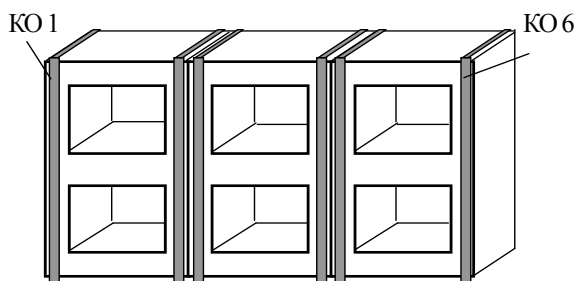


Рис. 6. Расположения короткозамкнутых обмоток на торцах магнитопроводов фаз трансформатора

Комплекс этих технических решений в конечном итоге позволил снизить магнитный момент Т и повысить помехозащищенность выпрямителя от негативного воздействия его ВМП. Это было достигнуто за счет повышения затрат на разработку Т и выпрямителя в целом. Понесенных существенных затрат можно было бы избежать при условии, что разработчики Т были бы знакомы с проблемой снижения ВМП, а выбор применяемых методов его снижения не ограничивался бы только стремлением обеспечить геометрическую симметрию конструкции.

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИММЕТРИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАНСФОРМАТОРА КАК ИСТОЧНИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Недостаточная эффективность применяемых методов снижения ВМП трансформаторов, наличие различного рода асимметрий в их конструкциях и высокая стоимость разработки Т в маломощном исполнении вызвали необходимость научного обоснования применяемых методов и поиска общей методологической базы для решения проблемы в целом. В качестве такой базы предлагается использовать теорию симметрии. До недавнего времени эта теория [11] не находила применения в решении проблем электротехники. Однако вышедшая в свет монография Шинкаренко В.Ф. в 2002 г. [12] положила начало исследова-

нию проблем электромеханики и электротехники с использованием этой теории.

Применение основных положений этой теории в данной работе ограничено установлением видов симметрии отдельных конструктивных элементов в зависимости от рассматриваемой физической модели ЭО, в данном случае Т, и их наследованием в целостной конструкции, рассматриваемой в виде системы конструктивных элементов. Полученные при этом результаты исследований оказались неожиданными и представляют несомненный практический интерес.

Рассмотрим простейший элемент конструкции Т в виде круговой цилиндрической катушки с цилиндрическим сердечником, центры которых совпадают (рис. 7,а). С точки зрения геометрической симметрии данный элемент содержит три вида симметрии: центр симметрии ( $\bar{1}$ ), ось симметрии бесконечного порядка ( $n = \infty$ ) и плоскость ( $m$ ). Для обозначения видов симметрии в данной статье используется бескоординатная система [11].

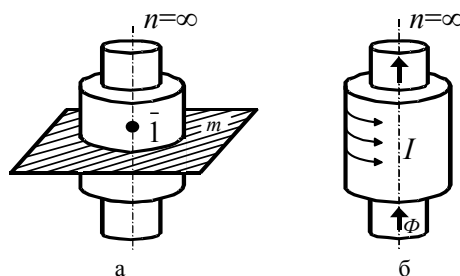


Рис. 7. Виды симметрии цилиндрической катушки с сердечником

При конструировании рассмотренных Т с использованием этих элементов в геометрии их конструкции сохраняются (наследуются) все типы элементов симметрии и, помимо этого, добавляются новые элементы – центральная ось, параллельная осям обмоток, и плоскость, перпендикулярная направлению шихтовки магнитной системы. В этом смысле подход, связанный с симметрированием геометрии конструкции Т обоснован. Однако с точки зрения ВМП речь идет не о внешней геометрической форме этого элемента, а о его физических свойствах создавать это поле.

Источниками поля, как известно, являются направленные величины – ток  $I$  и намагниченность ферромагнитного сердечника, в первом приближении совпадающая по направлению с магнитным потоком  $\Phi$  (рис. 7,б). В этом смысле катушка с сердечником обладает только одним видом симметрии – осью бесконечного порядка.

В случае, когда сечение сердечника не круг, а прямоугольник, степень симметрии конструкции понижается до  $n = 2$ . Аналогично снижается степень симметрии в случае, когда катушка имеет овальную форму, причем ее оси совпадают с осями сердечника.

При рассмотрении Т, состоящего из системы катушек с сердечниками и ярем, часть свойств элементов симметрии либо они все могут теряться в соответствии с теорией симметрии. Трехстержневой плоский

Т (рис. 1) только в момент времени, когда магнитные потоки крайних стержней равны по величине, обладает осью симметрии, совпадающей с осью центрально-го стержня.

Трансформатор с пространственной магнитной системой (рис. 3) обладает одним элементом симметрии, осью третьего порядка, параллельной осям обмоток и проходящей через его центр. Появление этого вида симметрии объясняется способом конструирования системы из рассмотренных элементов – катушек с сердечниками. При наличии магнитной анизотропии сердечника, обусловленной способом его навивки из ленты, этот элемент симметрии сохраняется. Можно отметить, что этим видом симметрии не обладала катушка с сердечником. Следовательно, при конструировании системы из элементов в данном случае имеют место два процесса – диссимметризации (потери свойства симметрии) и симметризации (приобретения нового свойства симметрии).

В Т выпрямителя с броневого магнитной системой (рис. 5) сохраняется только ось симметрии, совпадающая с осью обмоток, и появляется плоскость симметрии, проходящая через эту ось и расположенную поперек направлению шихтовки. Также как и в предыдущем Т, появление нового элемента симметрии связано со способом конструирования.

Появление факторов асимметрии в рассмотренных Т можно объяснить различием намагничивающих потоков, точнее, потоков рассеяния, и электрической асимметрией токов. Однако, следуя традиционной методологии исследований, эти факторы в явном виде не присутствуют в описаниях параметров, характеризующих элементы симметрии. В результате этого и поиск способов симметрирования конструкций Т с точки зрения ВМП не давал положительного результата. В этом смысле основная польза исследований, выполненных независимо в различных организациях, ограничивалась установлением качественных взаимосвязей отдельных параметров и их количественных зависимостью от геометрических асимметрий. С точки зрения теории симметрии, полученные результаты и не могли обеспечить решение задачи снижения ВМП в полном объеме.

Если положить, что основными элементами симметрии рассмотренных Т являются магнитные моменты обмоток его фаз, можно установить общий подход к решению задачи компенсации его ВМП.

Обмотки рассматриваемых Т питаются системой трехфазных токов. В этом случае целесообразно воспользоваться комплексными величинами для описания векторов магнитных моментов [13]. Каждый четырехмерный вектор при этом характеризуется как пульсирующий вектор в трехмерном пространстве, модуль которого зависит от временной фазой, т.е. как вектор на комплексной плоскости. При этом векторы магнитных моментов обмоток фаз направлены в пространстве вдоль осей обмоток. Введем обозначения  $\dot{m}_A, \dot{m}_B, \dot{m}_C$  для комплексных векторов обмоток

магнитных моментов соответственно фаз  $A, B, C$ . Учитывая эти обозначения, магнитный момент Т представляется в виде

$$\dot{m} = \dot{m}_A + \dot{m}_B + \dot{m}_C. \quad (7)$$

На рис. 8,а-в приведены схемы расположения векторов магнитных моментов обмоток и Т в целом для рассмотренных трех вариантов.

Векторы магнитных моментов обмоток совпадают в пространстве по направлению, имеют равные величины и обозначены утолщенными черными стрелками. Результирующий магнитный момент Т имеет такое же направление в пространстве и обозначен контурной стрелкой. Ось симметрии системы трех векторов моментов для всех вариантов обозначена  $n$ . Для стержневого Т (рис. 8,а) ось симметрии  $n$  системы совпадает с осью средней обмотки. В Т с пространственной магнитной системой (рис. 8,б) ось симметрии  $n$  проходит через центр треугольника, в вершинах которого расположены векторы магнитных моментов обмоток фаз. Наконец, в Т с броневого магнитной системой (рис. 8,в) ось симметрии  $n$  совпадает с осями обмоток.

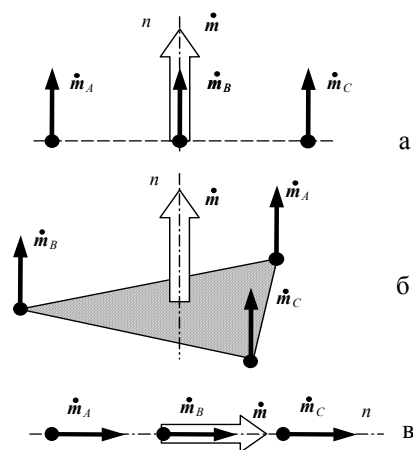


Рис. 8. Схемы расположения комплексных векторов магнитных моментов трансформаторов

Метод симметрирования магнитных моментов обмоток фаз построен на их временной компенсации, т.е. равенстве нулю результирующего вектора на комплексной плоскости. В этом случае условие компенсации магнитного момента Т означает равенство нулю суммы комплексных магнитных моментов фаз в соотношении (7). Проведенный анализ с использованием теории симметрии показывает, что направление в пространстве вектора результирующего магнитного момента сохраняется тем же, что и обмоток Т. С учетом этого для конструкций рассмотренных Т, симметричных как с геометрической, так и с физической точки зрения, условие (7) выполняется автоматически, что видно из соотношения (1).

Асимметрия рассматриваемых комплексных векторов магнитных моментов  $\dot{m}_A, \dot{m}_B, \dot{m}_C$  связана с различием их величин (амплитуд пространственных векторов), либо отклонением вектора соответствующей фазы



от направления вектора симметричной звезды векторов на комплексной (временной) плоскости. Первый вид асимметрии характерен для трансформаторов со стержневой и пространственной магнитными системами, второй – для Т с броневой магнитной системой. Последний вид асимметрии является критичным для Т. Это связано с тем, что вследствие нелинейности магнитных характеристик ферромагнитного материала магнитопроводов магнитные моменты фаз становятся не гармоническими функциями [9], и, помимо основной гармоники, содержат ряд дополнительных гармоник. Комплексные векторы магнитных моментов этих гармоник, в частности первых трех как следует из соотношения (6), приобретают новые свойства симметрии, не совпадающие для различных гармоник. Так, система векторов магнитных моментов для второй гармоники имеет обратную последовательность по сравнению с первой гармоникой, а для третьей гармоники эти векторы совпадают. Очевидно, что обеспечить одновременную компенсацию магнитных моментов этих гармоник (на комплексной плоскости) невозможно методом симметрирования.

Таким образом, допущенные при проектировании Т в маломощном исполнении ошибки, вызваны в равной мере как отсутствием специальной подготовки инженеров разработчиков, так и недостаточным научным обоснованием метода его компенсации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансформатор как источник внешнего магнитного поля представляет собой сложное электротехническое устройство. Применяемые в настоящее время средства снижения его магнитного момента основаны на предшествующем опыте разработчиков и сводятся по существу к ужесточению требований по симметрированию геометрии конструкции. Однако использование только предшествующего опыта приводит, как правило, к неоправданной затрате средств без получения ожидаемых результатов при создании новых образцов конкурентоспособного электрооборудования, в частности трансформаторов в маломощном исполнении, что и подтверждают приведенные в статье примеры конструктивных ошибок.

Проведенный анализ конструкций силовых трансформаторов показывает, что его магнитный момент зависит от трех видов асимметрий: геометрической, магнитной и электрической. Теоретической базой для их анализа является теория симметрии, которая пока не нашла широкого применения в силу инерции разработчиков и их склонности применять только широко используемые методы. Отсутствие научного обоснования применяемого метода симметрирования для компенсации магнитного момента трансформаторов и соответствующей подготовки инженеров разработчиков является основной причиной ошибок проектирования силовых трансформаторов в маломощном исполнении.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p.
- [2] ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. - Введ. 01.07.93. - М.: Изд-во стандартов, 1993. – 5 с.
- [3] ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. - Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с.
- [4] Ткаченко В.А. Победа над магнитной миной // Техника и вооружение. – 1971. – №10. – С. 10-15.
- [5] Григорьев Б.П. Актуальные проблемы снижения физических полей судов // Труды Междунар. конф. по судостроению: Секция F. Судовая электродинамика, магнетизм и гидрофизика. – СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1994. – С. 3-7.
- [6] Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. – Киев: 1995. – 42 с. – (Препр./НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772).
- [7] Ногин И.С., Шахрай Д.М., Внешнее магнитное поле трехфазного бронированного группового преобразовательного трансформатора с компенсационными обмотками // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та электромеханики. Т. 66. Вентильные преобразователи и машинно-вентильные системы. – М.: 1981. – С. 71-76.
- [8] Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // Электротехника і електромеханіка. – 2003. - № 4. – С. 79-82.
- [9] Ерисов А.В., Лупиков В.С. Поле рассеяния силового трансформатора вентильного преобразователя при несимметрии углов включения вентилей // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та электромеханики. Т. 77. Вентильные преобразователи и машинно-вентильные системы. – М.: 1985. – С. 116-125.
- [10] Крайчик Ю.С., Мазуров М.И., Токмакова И.А. Постоянная составляющая тока вентильных обмоток преобразовательных трансформаторов // Электротехника. – 1978. – №11. – С. 49-51.
- [11] Шубников А.В., Копчик В.А. Симметрия в науке и искусстве. – М.: Наука, 1972. – 340 с.
- [12] Шинкаренко В.Ф. Основи теорії електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
- [13] Клименко Б.В., Лупиков В.С., Выронец С.В., Крюкова Н.В., Гелярская О.А. Анализ магнитного момента трехфазных цепей // Электротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХП". – 2002. – №1. – С. 28-36.

Поступила 02.04.2004