

О.А. ГЕЛЯРОВСКАЯ, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ",
Харьков

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОНТУРА С ТОКОМ

Наведено дані чисельного моделювання зовнішнього магнітного поля просторового контуру зі струмом. Отримано оцінки величини поля для двох варіантів розбивки цього контуру на прості контури у відповідності з методом магнітних моментів, площини яких відрізняються. Результати досліджень рекомендовано враховувати при використанні методу магнітних моментів для аналізу магнітного поля контурів зі струмами, які мають складну просторову конфігурацію.

Приведены данные численного моделирования внешнего магнитного поля пространственного контура с током. Получены оценки величины поля для двух вариантов разбивки этого контура на простые контуры в соответствии с методом магнитных моментов, плоскости которых отличаются. Результаты исследований рекомендуется учитывать при использовании метода магнитных моментов для анализа магнитного поля контуров с токами, которые имеют сложную пространственную конфигурацию.

Введение. При исследовании внешнего магнитного поля (ВМП) технических средств в рамках проблемы электромагнитной совместимости [1-10] довольно часто используется метод магнитных моментов [11]. В соответствии с этим методом реальные источники внешнего магнитного поля заменяются системой дипольных точечных источников, каждый из которых характеризуется шестью параметрами: тремя компонентами вектора магнитного момента (ММ) и тремя координатами вектора смещения относительно начала выбранной системы координат. В этом случае анализ ВМП удастся существенно упростить, поскольку напряженность представляется как функция ММ этих дипольных источников. При использовании этого метода магнитных моментов используются следующие допущения, правомерность которых подтверждена многократно на практике [12-17]:

- токи в проводниках являются установившимися;
- распределение тока в проводниках считается известным;
- токи в сечениях проводников распределены равномерно;

- токами смещения и электромагнитным излучением без ущерба для точности расчетов можно пренебречь вследствие малой частоты токов ЭО;
- вихревые токи в стали отсутствуют;
- ферромагнитная среда магнитной системы считается кусочно-однородной в пределах каждого выделенного участка;
- величины индукции и намагниченности в пределах каждого участка считаются известными из проведенных ранее электромагнитных расчетов;
- наличие магнитопроводов в реакторах и трансформаторах учитывается введением коэффициентов усиления магнитного момента, который можно считать неизменным во всех режимах работы оборудования;
- реальные проводники с объемным распределением токов представляются в виде тонких линий, повторяющих геометрию осей их линейных участков;
- не учитывается влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на распределение тока в токопроводах.

Два последних допущения касаются необходимости учета эффекта близости и поверхностного эффекта. Правомерность этих допущений объясняется тем, что в электрооборудовании участки соседних силовых токопроводов удалены, по крайней мере, на расстояние, близкое к наибольшему размеру сечения шинпровода для обеспечения электрической изоляции, а также тем, что возможные погрешности от таких допущений сравнимы с погрешностями, вносимыми технологическими отклонениями. При решении исследовательских задач, связанных с расчетом токов самих токопроводов, эти эффекты необходимо учитывать.

Идея метода магнитных моментов основана на представлении сложных пространственных контуров в виде системы контуров простой пространственной конфигурации, расчете компонент векторов этих ММ и последующем их суммировании. При исследовании ВМП переменных токов, величина которого в каждой точке наблюдения изменяется периодически во времени, полагают, что вектор ММ остается неизменным в пространстве, а его величина пульсирует с частотой пульсирующего тока. Вектор ММ плоского токового контура пропорционален произведению тока и вектора площади этого контура [18]. Компоненты ММ электрооборудования определяются суммированием соответствующих компонент ММ контуров с учетом временных фаз их токов.

Дальнейшее развитие этот метод получил при исследовании временной структуры ВМП электрооборудования с несинусоидальными токами. Определенные трудности возникают при анализе временной структуры магнитного момента сложных электрических цепей с переменными токами, связанные с необходимостью одновременного учета множества факторов. Например, к ним относятся большое число возможных сочетаний одновременно работающих фидеров распределительных устройств, различие электрических фаз токов контуров, большое число участков, получаемых при разбиении контуров на линейные отрезки. Все это делают практически невозможным установление связи временной структуры компонент ММ распределительного устройства в зависимости от токов его силовой цепи. Для преодоления этих недостатков в [19] предложен метод анализа ММ сложных электрических цепей (метод М-схем). М-схемы используют топологические свойства электрических цепей и получают модификацией электрической схемы путем введения в каждую k -ю ветвь элемента площади S_k , несвойственного электрическим схемам. В общем случае этот элемент площади является вектором. В [19] предложены правила преобразования сложной электрической схемы к системе М-схем эквивалентных элементов площадей независимых контуров:

- источники напряжения заменяются источниками тока в М-схеме;
- ключевые элементы изображаются в замкнутом положении;
- обозначения и знаки элементов площадей на М-схеме приводятся для выбранных фиксированных направлений токов ветвей электрической цепи.

Несмотря на кажущуюся простоту определения ММ простого токового контура, прямое перенесение этого метода на контуры со сложной пространственной геометрией затруднено. Это связано с тем, что разбиение пространственного контура на простые контуры не всегда однозначно. Этот случай часто встречается на практике, но теоретических исследований в этом направлении не проводилось.

Цель работы – численное моделирование внешнего магнитного поля пространственного контура при разбиении его на простые плоские контуры.

Для достижения поставленной цели в данной работе исследуется ВМП пространственного контура, конфигурация которого напоминает форму шва теннисного мяча с линеаризованными участками. Точное моделирование его ВМП проводится с использованием известных со-

отношений для прямолинейного отрезка с током, предложенных Монтгомери [20]. Приближенное моделирование ВМП проводится для двух различных вариантов покрытия этого контура простыми прямоугольными контурами и замене их дипольными источниками. При этом каждый дипольный источник представлен вектором магнитного момента, помещенным в геометрический центр плоского контура.

Модели источников поля пространственного контура. С учетом принятых допущений на рис. 1

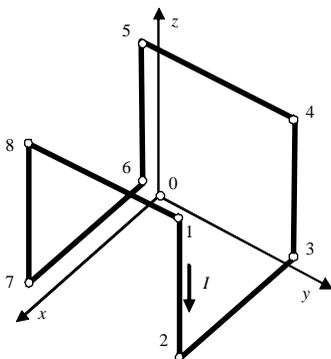


Рис. 1.

показана модель контура в виде проводников – тонких прямых линий с током, используемая при определении точного распределения ВМП. Для упрощения модели принято, что ее стороны совпадают с ребрами куба, центр которого расположен в начале 0 системы координат x, y, z , а отрезки направлены вдоль одной из осей. Длина каждого отрезка равна 1 м, ток I равен 1 А. Точки контура имеют нумерацию 1 – 8 в направлении протекания тока.

Два варианта покрытия этого пространственного контура плоскими простыми контурами показаны на рис. 2.

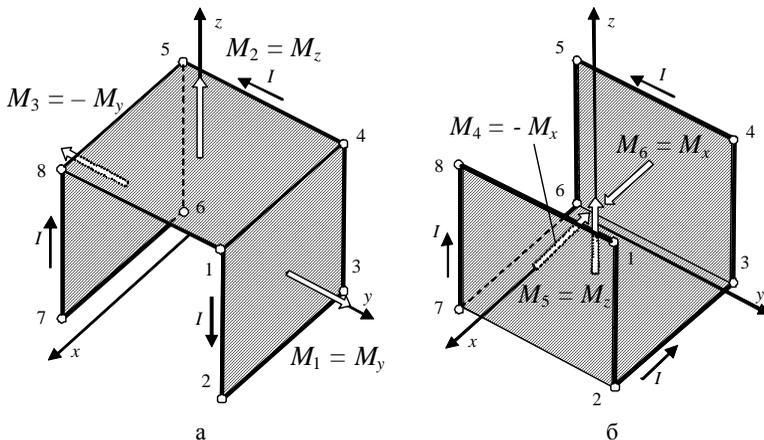


Рис. 2.

В первом варианте (рис. 2,а) пространственный контур с точками

1 – 8 разбит на три квадратных контура 1-2-3-4, 4-5-8-1 и 5-6-7-8. Каждый из этих контуров – источников магнитного поля представлен точечным дипольным источником. Эти контуры характеризуются векторами дипольных моментов M_1 , M_2 и M_3 , приложенными в центрах соответствующих контуров.

Во втором варианте (рис. 2,а) этот же пространственный контур 1 – 8 разбит на три квадратных контура 1-2-7-8, 2-3-6-7 и 3-4-5-6, представленные дипольными источниками с магнитными моментами M_4 , M_5 и M_6 , приложенными в центрах контуров..

С учетом пространственной ориентации этих контуров и направления токов в них справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} M_1 &= M_y; & M_2 &= M_z; & M_3 &= -M_y; \\ M_4 &= -M_x; & M_5 &= M_z; & M_6 &= M_x. \end{aligned} \quad (1)$$

Для рассматриваемых вариантов числовые величины всех магнитных моментов равны, $M_1 = \dots = M_6 = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$. При этом суммарный ММ контура для первого и второго вариантов равен $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ и направлен вдоль оси z , поскольку магнитные моменты $M_1 + M_3 = M_4 + M_6 = 0$.

Распределение ВМП контура. Для сравнения распределений ВМП контура с использованием точной и приближенных моделей проведены расчеты модуля напряженности на плоской горизонтальной поверхности, удаленной от контура по вертикали на расстояние 3,5 м. Выбор такого расстояния рекомендован методикой [21] исходя из максимального габаритного размера объема с рассматриваемым контуром и схемы измерений магнитного момента с помощью одного первичного преобразователя, обеспечивающего погрешность измерений в пределах 10 %. Для данного контура максимальный габаритный размер равен 1 м.

Распределение модуля напряженности ВМП для точной модели контура и двух вариантов покрытия пространственного контура плоскими контурами с заменой их дипольными источниками приведено на рис. 3. Поверхность, характеризующая распределение модуля напряженности ВМП для точной модели, показана на рис. 3,а, а ее сечение вертикальной координатной плоскостью – на рис. 3,б. Распределение построено для участка плоскости, удаленной по вертикали на расстояние 3,5 м от центра пространственного контура; участок плоскости представляет квадрат, одна из вершин которого расположена на оси z . Распределение поля на рис. 3,в соответствует расположению диполей на рис. 2,а, а на рис. 3,г – расположению диполей на рис. 2,б.

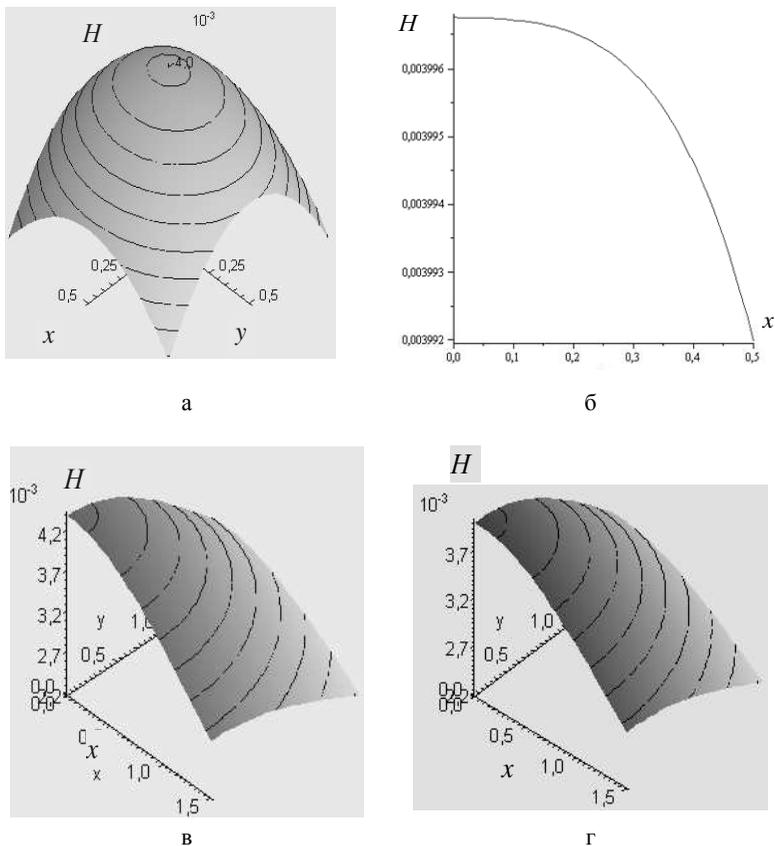


Рис. 3.

Для точной модели поля контура максимальная величина напряженности на данном участке плоскости точек наблюдения составляет $3,997 \cdot 10^{-3}$ А/м. Максимальные величины напряженности поля для первого и второго вариантов расположения дипольных источников составляют соответственно $4,382 \cdot 10^{-3}$ и $3,999 \cdot 10^{-3}$ А/м.

Анализ распределений поля пространственного контура для точной и приближенной моделей. Сравнивая поверхности распределения поля можно отметить, что их форма примерно одинакова для точной и приближенных моделей. Максимальные величины поля для приближенных моделей отличаются примерно на 10 %. Это указывает на то, что варианты разбиения пространственного контура на плоские

контуры не одинаковы. В этих условиях выбор возникает задача выбора варианта разбиения пространственного контура на плоские контуры. Например, для рассматриваемых разбиений второй вариант более предпочтительный, поскольку максимальные величины поля точной и приближенной моделей почти совпадают; но такой выбор является частным, для конкретного участка поверхности точек наблюдения. Задача выбора варианта разбиения пространственного контура на простые контуры, плоскости которых отличаются, пока не имеет окончательного решения.

Выводы.

1. С использованием численных методов проведено моделирование внешнего магнитного поля пространственного контура с током. Установлено, что замена точной модели поля на приближенную путем разбиения пространственного контура на плоские простые контуры и представление их дипольными источниками в соответствии с методом магнитных моментов не является однозначной. Это проявляется в том, что для разных вариантов разбиения существуют различные распределения поля, отличающиеся по крайней мере максимальной величиной поля. Наличие этого фактора указывает на то, что метод магнитных моментов может применяться для приближенного моделирования внешнего магнитного поля электрооборудования со сложной пространственной конфигурацией токовых контуров только при определенных допущениях, связанных с выбором варианта разбиения пространственного контура.

2. При решении задач нормирования и контроля магнитных моментов электрооборудования, использующих в качестве исходной информации заданные максимальные величины компонент внешнего магнитного поля, необходимо учитывать, что в общем случае эти задачи могут иметь неоднозначные решения с учетом различных вариантов разбиения пространственного контура на простые контуры, плоскости которых отличаются.

Список литературы: 1. 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. 2. 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. 3. ДСТУ 2625-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до загасаючого магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. Введ. 01.07.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 28 с. 4. ДСТУ 2626-94. Суміс-

ність технічних засобів електромагнітна Стьйкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. Введ. 01.07.95. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 26 с. **5.** Крыжов Г.П., Кравченко О.А. Как защититься от вредного воздействия электромагнитного поля (допустимые нормы напряженности поля, ограничения на время пребывания в поле без защитных средств) // Электропанорама. – 2002. – № 11. – С. 40-42. **6.** Вилесов Д.В., Евдокимов О.В., Паршин В.Г. Электромагнитная совместимость электронного оборудования судовых технических средств // Судостроение за рубежом. – 1986. – № 12. – С. 23-38. **7.** Rossetto L., Tenti P., Zuccato A. Electromagnetic compatibility issues in industrial equipment // IEEE Industry applications magazine– 1999. – №12. – P. 34-46. **8.** 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. **9.** IEC 1000-4-9: 1993. “Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 9: Pulse magnetic field immunity test. Basic EMC Publication”. Edition 1.1. – 2001. – 59 p. **10.** IEC 1000-4-10: 1993. “Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 10: Damped oscillatory magnetic field immunity test. Basic EMC Publication”. Edition 1.1. – 2001. – 59 p. **11.** Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772. – Киев: 1995. – 42 с. **12.** Хагенмейстер Е.А., Вихарев А.П. Экспериментальное исследование внешних магнитных полей в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС // Электротехника. – 1985. – №1. – С. 32-35. **13.** Аполлонский С.М. Расчет электромагнитных экранирующих оболочек. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 144 с. **14.** Дегтярев В.И., Ерисов А.В., Прокопов В.Е. Расчет магнитного момента силовой цепи управляемого выпрямителя // Тр. Всесоюзн. науч.-исслед. ин-та электромеханики. Т. 50. Стабилизированные вентильные преобразователи. – М.: 1977. – С. 82-86. **15.** Ногинов И.С., Шахрай Д.М., Внешнее магнитное поле трехфазного броневое группового преобразовательного трансформатора с компенсационными обмотками // Труды Всесоюзн. науч.-исслед. ин-та электромеханики. Т. 66. Вентильные преобразователи и машинно-вентильные системы. – М.: 1981. – С. 71-76. **16.** Мукосеев Ю.Л. Распределение переменного тока в токопроводах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 136 с. **17.** Методика расчета полей рассеяния асинхронных машин: Отчет о НИР (промежуточный) / Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1974. – 42 с. **18.** Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1970. – 668 с. **19.** Лупиков В.С. Структурный анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України. – 1999. – № 4. – С. 9-16. **20.** Монтгомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 359 с. **21.** Лупиков В.С. Структурный анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України. – 1999. – № 4. – С. 9-16.



Лушиков Валерий Сергеевич, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1973, 1987 и 2004 гг. С 1973 по 1998 гг работал в области магнетизма технических объектов. Заведующий кафедрой "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2005 г. Научные интересы связаны с проблемами электромагнитной совместимости технических средств, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.



Гелярдовская Оксана Анатольевна, старший преподаватель кафедры компьютерной математики и математического моделирования НТУ "ХПИ". Защитила диплом специалиста в НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с математическим моделированием и магнетизмом технических объектов.

Надійшла до редколегії 21.05.2010