

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, проф. Луганский государственный
медицинский университет
Д.Л. ОСТАПУЩЕНКО, аспирант, Луганський ГМУ
М.А. ВОРОБЬЕВ, канд. техн. наук, доцент, Луганський ГМУ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛОКАЛЬНО-ЦИРКУЛЯРНОГО
НАМАГНИЧИВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ ТОРОИДАЛЬНОЙ КАТУШКОЙ ПРИ ИХ
МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ**

Наведені результати досліджень процесу локально-циркулярного намагнічування неперервних циліндричних об'єктів тороїдальною котушкою в магнітному контролі в потоці стану. Дослідження проводилось з використанням програмного забезпечення, що розроблено авторами та дозволяє здійснювати розрахунки інформаційного магнітного поля пристроїв неруйнівного контролю з урахуванням особливостей об'єкту таких, як геометрична форма, нелінійні характеристики матеріалу, а також неоднорідного характеру джерел поля, що намагнічує.

Investigation results of local circular magnetization process by toroidal coil in magnetic testing of endless cylindrical body in machine unit are present. The investigation was carried out using software developed by authors for simulation of nondestructive testing devices magnetic field. The software takes into account a geometrical shape of test object, nonlinear material properties and a magnetization field configuration.

При разработке устройств неразрушающего контроля непрерывных объектов цилиндрической формы магнитным методом (НКММ) таких, как, например, прутки, труба и т.д., возникает ряд технических трудностей, одной из которых является создание устройств, позволяющих обеспечить циркулярное намагничивание объекта в потоке стана. Для надежного обнаружения продольно ориентированных дефектов, частое появление которых для данного вида продукции обусловлено спецификой технологического процесса изготовления, необходимо обеспечить условия, при которых поток намагничивающего поля пронизывает объект контроля в круговом направлении. Для неподвижного объекта такое намагничивание обычно осуществляется продольным пропусканием электрического тока. В случае непрерывно движущегося объекта контроля, например, в условиях прокатного стана, при этом способе намагничивания возникают существенные трудности, связанные с необходимостью обеспечения надежного контакта при подведении электрического тока. Поэтому иногда при контроле таких объектов, как альтернативное, применяют полюсное намагничивание электромагнитом. В случаях необходимости обеспечения контроля объекта по всему периметру необходимо решить задачу реализации одинаковых условий намагничивания для отдельных участков периметра. Очевидно, что без пропускания электрического тока через объект контроля,

создание статического магнитного поля, силовые линии которого замыкались бы внутри его объема невозможно. Поэтому более предпочтительным может быть вариант намагничивания, когда на поверхности объекта вдоль периметра его поперечного сечения образуется последовательность магнитных полюсов чередующейся полярности. В зонах смены полярности намагничивание проявляет свойства, характерные для циркулярного. В зонах локально-циркулярного намагничивания наличие продольно ориентированного дефекта существенным образом препятствует прохождению магнитного потока, в то же время вблизи полюсов поле нормально к поверхности и могут возникнуть зоны с низкой выявляемостью подобных дефектов. Для обеспечения одинаковой выявляемости дефектов по всему периметру объекта магнитная система дефектоскопа должна состоять из нескольких, повернутых относительно друг друга однотипных узлов, обеспечивая тем самым перекрытие зон с локально-циркулярным намагничиванием. Теоретически возможно целое множество технических реализаций таких намагничивающих устройств. Примерами могут служить многополюсные электромагниты, системы, состоящие из нескольких периодически расположенных накладных соленоидов седлообразной формы и т.д. Авторами работ [1-5] для создания зон с локально-циркулярным намагничиванием предложена тороидальная магнитная система, состоящая из нескольких тонких прямоугольных катушек, расположенных регулярно на поверхности тороида. Однако в их исследованиях при анализе конфигурации поля не учитывалось влияние ферромагнитного объекта контроля, т.е. изучалась возможность генерации намагничивающих полей с заданными свойствами, но не рассматривался сам процесс намагничивания объекта.

Целью настоящей статьи является исследование процесса намагничивания непрерывных цилиндрических объектов тороидальной магнитной системой, предназначенной для создания локально-циркулярного намагничивающего поля, с учетом нелинейных магнитных свойств материала объекта контроля.

Приведем более детальное описание конструкции, предложенной в [1-5] магнитной системы. Магнитная система состоит из нескольких секций в виде тонких прямоугольных катушек с током, симметрично расположенных относительно оси и находящихся с ней в одной плоскости (см. рис. 1.).

Угол между соседними секциями одинаков. При моделировании принимались следующие параметры магнитной системы: радиусы внешнего и внутреннего слоя проводников $R_S = 85 \text{ мм}$ и $r_S = 55 \text{ мм}$, длина $h_S = 50 \text{ мм}$, м.д.с. секции $Iw = 300 \text{ А} \cdot \text{в}$.

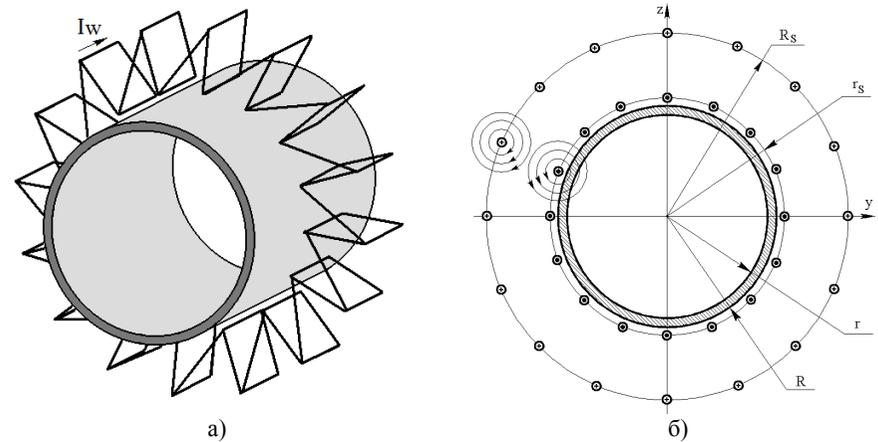


Рис. 1. Тороидальная магнитная система для создания локально-циркулярного поля

Для описания пространственной конфигурации магнитного поля конечного отрезка проводника с электрическим током удобно воспользоваться формулами аналогичными приведенным в [1], но записанными в компактном виде:

$$\begin{aligned}
 a &= (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2; \\
 b &= (x - x_1)(x_2 - x_1) + (y - y_1)(y_2 - y_1) + (z - z_1)(z_2 - z_1); \\
 c &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2; \\
 G &= \frac{1}{4\pi} \frac{1}{ac - b^2} \left(\frac{a - b}{\sqrt{a - 2b + c}} - \frac{b}{\sqrt{c}} \right); \\
 G_x &= z(y_2 - y_1) - y(z_2 - z_1) + y_1 z_2 - y_2 z_1; \\
 G_y &= x(z_2 - z_1) - z(x_2 - x_1) + z_1 x_2 - z_2 x_1; \\
 G_z &= y(x_2 - x_1) - x(y_2 - y_1) + x_1 y_2 - x_2 y_1; \\
 H_x &= IGG_x; \quad H_y = IGG_y; \quad H_z = IGG_z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 – координаты начала и конца отрезка провода с током; x, y и z – координаты точки пространства в которой определяется поле; H_x, H_y и H_z – компоненты вектора напряженности поля; I – сила тока. Поле намагничивающего устройства представляет собой сумму полей отдельных его секций. Секция же, в свою очередь, состоит из наборов пар проводников, проходящих в радиальном и осевом направлениях, т.е. моделируется рамкой с током, содержащей в общем случае w витков.

Расчет проводился для случая контроля цилиндрического объекта, представляющего собой трубу с наружным диаметром $2R = 102 \text{ мм}$ и

толщиной стенки 4 мм, т.е. ее внутренний диаметр составлял $2r = 94 \text{ мм}$. Магнитные характеристики принимались нелинейными и описывались так же, как и в [7-9]. Результаты расчета поля на расстояниях 1, 2 и 3 мм от наружной поверхности трубы для 8-ми и 16-ти секционной магнитной системы приведены на рис. 2. На круговых диаграммах утолщенная линия соответствует угловой зависимости радиальных и циркулярных составляющих напряженностей магнитных полей, полученных с учетом наличия объекта контроля. Тонкая линия описывает топографию магнитного поля без учета объекта при расчете в соответствующих контрольных точках. При удалении от поверхности трубы и приближении к внутреннему слою проводников магнитной системы абсолютные значения радиальной и аксиальной составляющих возрастают. Наличие объекта контроля начинает существенно сказываться на конфигурации магнитного поля лишь в непосредственной близости от его поверхности, при удалении от которой, как видно из рис. 2, магнитные поля системы с помещенным в нее объектом контроля и без него практически совпадают.

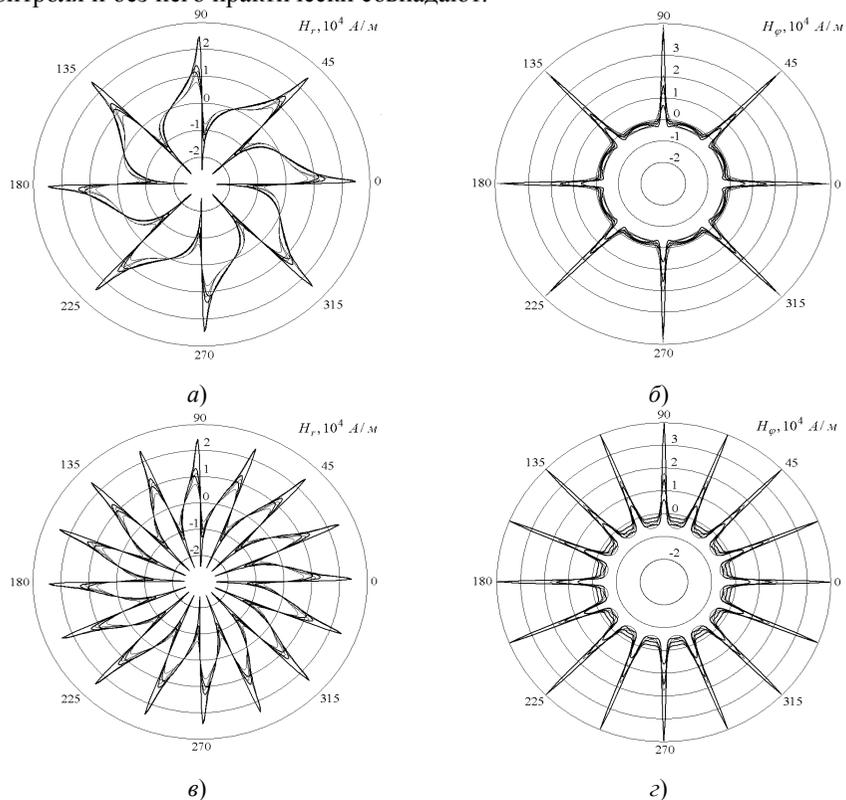


Рис. 2. Результат расчета магнитного поля у поверхности трубы

При обходе по периметру зависимость поля носит строго периодический характер, т.е. оно имеет ось симметрии, порядок которой совпадает с количеством секций. При значениях углов, соответствующих расположению секций, радиальные составляющие изменяют знак, тогда как циркулярные составляющие имеют ярко выраженные максимумы. Таким образом, центры зон локально-циркулярной намагниченности расположены в непосредственной близости от секции магнитной системы, что может вызывать трудности при размещении средств регистрации информационного магнитного поля в зоне контроля. Альтернативой может служить многополюсная магнитная система, схема которой приведена на рис. 3.

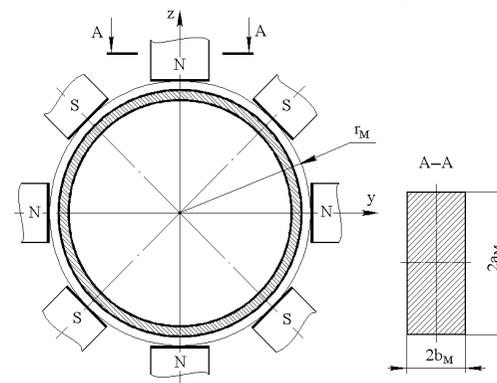


Рис. 3. Многополюсная магнитная система для создания локально-циркулярного поля

При моделировании поле магнитной системы описывалось полем полюсов, на которых помещался простой слой магнитных зарядов чередующегося знака плотностью $\sigma = \pm \mu_0 M$, где M намагниченность в магнитопроводе [6]. Полюса располагались вдоль периметра цилиндрической поверхности радиусом r_M и имели форму в виде прямоугольника размером $2a_M \times 2b_M$. Результат расчета поля в контрольных точках, расположенных на окружностях с радиусами 52, 53 и 54 мм в центральном сечении системы приведен на рис. 4. При расчете принимались следующие значения параметров модели: $r_M = 55 \text{ мм}$, размеры полюсов $2a_M \times 2b_M = 50 \times 16 \text{ мм}$, намагниченность магнитопровода $M = 70 \text{ кА/м}$. Число пар полюсов принималось равным $n = 4$ (см. рис. 3. и рис. 4. а, б) и $n = 6$ (см. рис. 4. в, г). Как видно из результатов расчета, максимумы радиальной составляющей намагничивающего поля приходятся на середины полюсов, при этом циркулярная составляющая обращается в ноль. Следовательно, вблизи полюса поле практически нормально к поверхности намагничиваемого

объекта. Зоны локально-циркулярного намагничивания находятся в промежутке между полюсами, куда могут быть беспрепятственно помещены средства регистрации информационного магнитного поля.

ВЫВОДЫ

1. Произведено исследование конфигурации магнитных полей, возникающих при намагничивании цилиндрических объектов контроля тороидальной катушкой, предназначенной для создания локально-циркулярного намагничивания. При расчете учитывались форма объекта контроля и нелинейные магнитные свойства материала.

2. При использовании тороидальной магнитной системы максимумы циркулярной составляющей намагничивающего поля расположены в непосредственной близости от ее секций, что может приводить к трудностям при размещении средств регистрации информационного магнитного поля.

3. Предложен альтернативный вариант создания локально-циркулярного поля с помощью многополюсного электромагнита, при использовании которого зоны локально-циркулярной намагниченности расположены между полюсами, что при технической реализации устройств контроля является более удобным.

Список литературы: 1. Матюк В.Ф., Горбаиш В.Г. Оптимизация размеров устройства для циркулярного намагничивания изделий цилиндрической формы. I. Исследование циркулярной составляющей поля элементов прямоугольного витка. // Дефектоскопия. – 2000. – №8. – С. 47-62. 2. Матюк В.Ф., Горбаиш В.Г. Оптимизация размеров устройства для циркулярного намагничивания изделий цилиндрической формы. II. Исследование циркулярной составляющей поля прямоугольного витка. // Дефектоскопия. – 2000. – №8. – С. 63-72. 3. Матюк В.Ф., Горбаиш В.Г. Оптимизация размеров устройства для циркулярного намагничивания изделий цилиндрической формы. III. Исследование циркулярной составляющей поля однослойной тороидальной катушки. // Дефектоскопия. – 2000. – №9. – С. 58-68. 4. Матюк В.Ф., Горбаиш В.Г. Оптимизация размеров устройства для циркулярного намагничивания изделий цилиндрической формы. IV. Исследование циркулярного намагничивающего поля многослойной тороидальной катушки. // Дефектоскопия. – 2000. – №10. – С. 29-38. 5. Матюк В.Ф., Горбаиш В.Г., Кратиров В.Б., Кратко А.С. Оптимизация размеров устройства для циркулярного намагничивания изделий цилиндрической формы. V. Исследование циркулярной составляющей поля сектора тороидальной катушки. // Дефектоскопия. – 2001. – №11. – С. 78-84. 6. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л. Численный анализ пространственной конфигурации магнитных полей объектов сложной геометрической формы с учетом нелинейных характеристик веществ. // Информационные технологии. – 2008. – № 8. – С. 43-49. 7. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л., Воробьев М.А. Математическое моделирование процессов намагничивания ферромагнитных объектов контроля с произвольной геометрией в полях заданной пространственной конфигурации. // Дефектоскопия. – 2008. – №9. – С. 3-18. 8. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхности дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений. // Дефектоскопия. – 2009. – №3. – С. 56-66. 9. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей подповерхностных дефектов сплошности конечных размеров и произвольной формы в объектах контроля ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений. // Дефектоскопия. – 2009. – №5. – С. 60-71.

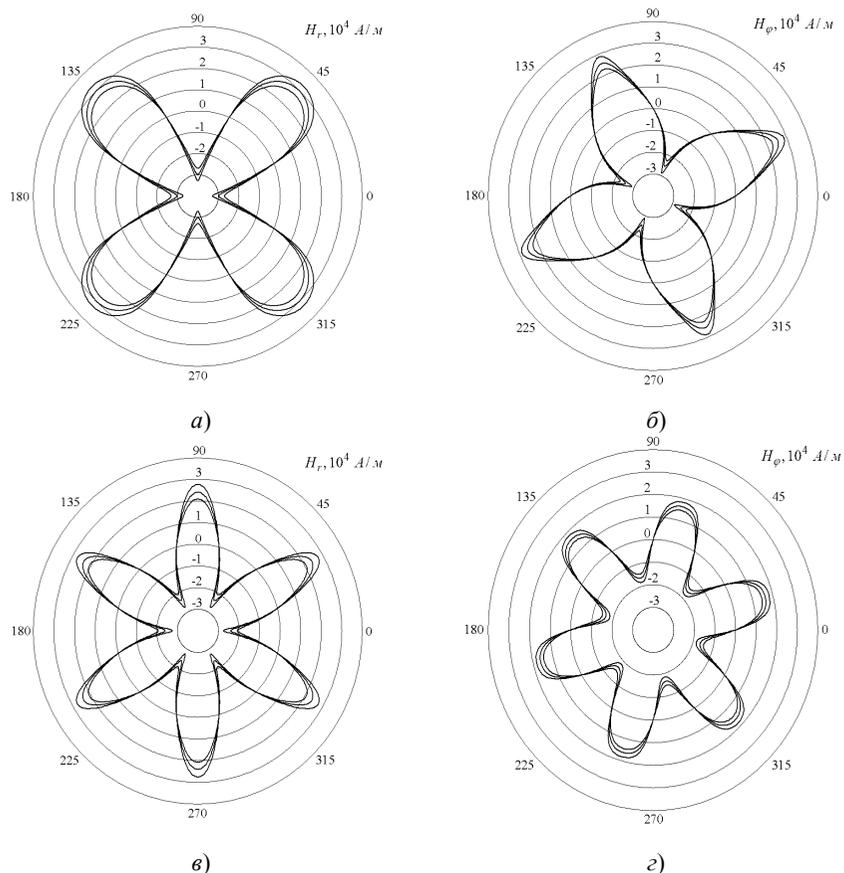


Рис. 4. Результат расчета составляющих намагничивающего поля многополюсной магнитной системы

При увеличении числа пар полюсов происходит взаимная компенсация их полей, а, следовательно, уменьшение абсолютной величины его составляющих, в том числе и циркулярной, поэтому такое увеличение не является целесообразным.

Таким образом, более перспективным при магнитном контроле непрерывных цилиндрических объектов является использование многополюсных намагничивающих систем, что подтверждается результатами численного моделирования.