

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Луганский государственный медицинский университет (ЛГМУ)

А.Н. ЯКИМОВ, препод., ЛГМУ

Д.Л. ОСТАПУЩЕНКО, препод., ЛГМУ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ВЫСООДНОРОДНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ В ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

В роботі розглянуто задачу синтезу намагнічуючих пристроїв магнітного неруйнівного контролю. Розроблено програмні засоби проектування магнітних систем, що дозволяють створювати у робочому просторі пристрою контролю магнітні поля з високим ступенем однорідності та високою інтенсивністю.

In this work a synthesis problem of magnetizing devices for nondestructive control is considered. The designed software tools let to create a high intensive and uniform magnetic field inside an effective volume of the control device.

Введение. При проведении магнитного дефектоскопического неразрушающего контроля неоднородность намагничивающего поля может выступать в качестве мешающего фактора, затрудняющего обнаружение дефектов сплошности, поэтому при проектировании намагничивающего устройства часто необходимо обеспечить высокую однородность магнитного поля в зоне контроля.

В качестве источников магнитного поля устройств неразрушающего контроля чаще всего используются П-образные магниты (рис.1) с прямоугольными полюсами, обеспечивающие достаточно высокую однородность поля в некоторой ограниченной области вблизи оси системы [1-3]. Однако проектирование более сложных намагничивающих устройств, позволяющих создавать высокооднородные магнитные поля во всем рабочем объеме межполюсного пространства электромагнита, является гораздо более актуальной задачей, имеющей существенную важность на практике.

Постановка задачи. Представляет интерес выбор в качестве контролируемого изделия прямошовной электросварной трубы [4]. Пусть рабочий объем Ω имеет форму параллелепипеда с квадратным основанием размером $2A \times 2A$ и высотой $2B$. Задачей проектирования является создание в этом объеме намагничивающего поля с высокой степенью однородности и высокой интенсивности. Для оценки однородности магнитного поля в рабочем объеме фиксируется множество контрольных точек, расположенных регулярно с шагом Δx , Δy , Δz вдоль соответствующих координатных осей.

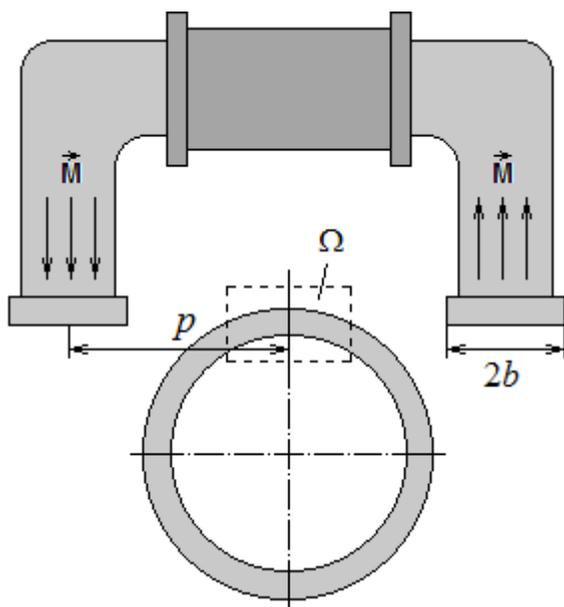


Рис. 1. Намагничивающая система с П-образным магнитом

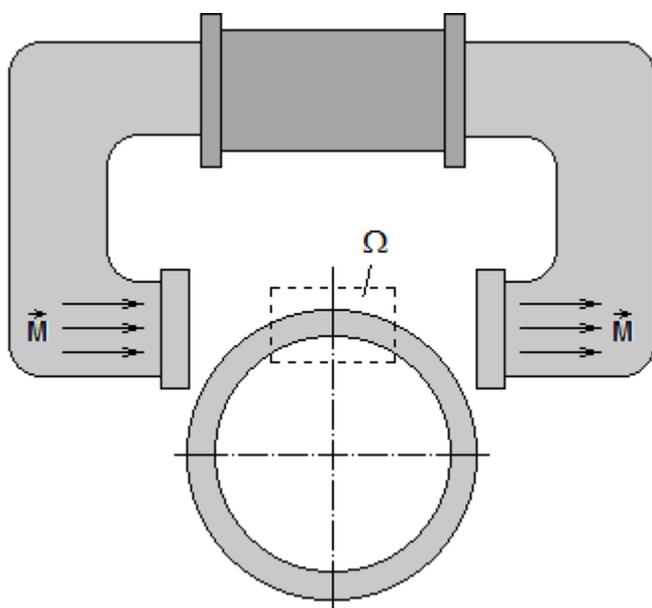


Рис. 2. Намагничивающая система с С-образным магнитом

В качестве критерия однородности магнитного поля примем наибольшее относительное отклонение значения напряженности поля в контрольных точках от поля в центре системы

$$\Delta = \frac{\max_k |H^{(k)} - H^{(0)}|}{|H^{(0)}|} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где $H^{(k)}$ – напряженность магнитного поля в k -й контрольной точке, $H^{(0)}$ – напряженность поля в центре рабочего объема.

Ставится задача оптимального выбора значений параметров полюсных наконечников, обеспечивающих требуемые условия контроля.

Основная часть. При проведении оптимального синтеза намагничивающих систем требуется многократно осуществлять решение прямой задачи расчета магнитного поля, создаваемого электромагнитом с прямоугольными полюсами. Воспользуемся моделью, в которой расчет поля в рабочем объеме осуществляется с использованием простого слоя магнитных зарядов. Пусть поверхностная плотность магнитных зарядов постоянна на всей поверхности прямоугольного полюса и равна σ , а система координат расположена так, как это показано на рис. 3.

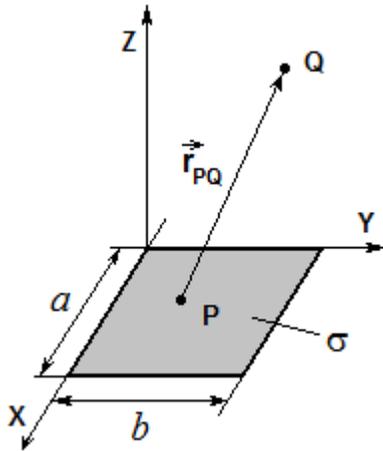


Рис. 3. Прямоугольный полюс электромагнита

Тогда компоненты напряженности магнитного поля, создаваемого прямоугольным полюсом в точке наблюдения Q с координатами x , y и z можно рассчитать по формулам (2).

$$\begin{aligned}
 H_x(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{x-x_P}{r_{PQ}^3} dx_P dy_P \\
 H_y(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{y-y_P}{r_{PQ}^3} dx_P dy_P \\
 H_z(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{z}{r_{PQ}^3} dx_P dy_P
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$r_{PQ} = \sqrt{(x-x_P)^2 + (y-y_P)^2 + (z-z_P)^2},$$

где $\sigma = \mathbf{M} \cdot \mathbf{n}$ – плотность поверхностных магнитных зарядов, \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности полюса, \mathbf{M} – вектор намагниченности вблизи поверхности полюса. Вычисление интегралов приводит к формулам (3).

$$\begin{aligned}
 H_x(x, y, z) &= -\frac{\sigma}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(y_j + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z^2}) \\
 H_y(x, y, z) &= -\frac{\sigma}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(x_i + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z^2}) \\
 H_z(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_i y_j}{z \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z^2}} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x; & y_1 &= y; \\
 x_2 &= x-a; & y_2 &= y-b.
 \end{aligned}$$

В каждой контрольной точке межполюсного пространства компоненты напряженности магнитного поля \mathbf{H} могут быть рассчитаны на основе принципа суперпозиции магнитного поля от каждого из полюсов.

В работе [2] показано, что для обеспечения значительной степени однородности магнитного поля между основаниями П-образного магнита (рис. 1) со стороной $2b$ нужно выбирать такое расстояние $2p$ между центрами полюсов, чтобы выполнялось соотношение

$$1.5 < \frac{2p}{2b} < 3 \tag{4}$$

Проведем оценку однородности и интенсивности магнитного поля для этого случая. Пусть размеры рабочего объема для трубы диаметром $d = 51$

мм составляют $20 \times 20 \times 30$ мм, а шаг между контрольными точками 1 мм. Если стороны прямоугольного полюса равны 100 мм, то численный расчет для ряда расстояний между центрами полюсов, удовлетворяющих соотношению (4), позволяет получить значения однородности и напряженности поля, приведенные в табл. 1. Величина напряженности поля в центре рабочего объема выражена в долях от намагниченности полюсов M .

Таблица 1

Характеристики магнитного поля для П-образного магнита

| $2p$, мм | Δ , % | $H^{(0)} \times M$, А/м |
|-----------|--------------|--------------------------|
| 150 | 22 | 0.3354 |
| 175 | 12 | 0.2364 |
| 200 | 8 | 0.1763 |
| 250 | 5 | 0.1092 |
| 300 | 3 | 0.0744 |

Можно сделать вывод, что отдаление полюсов П-образного магнита приводит к увеличению однородности магнитного поля в рабочем объеме, тогда как напряженность поля при этом значительно убывает.

Намагничивающая система в виде С-образного магнита (рис. 2) при тех же размерах трубы, контрольной зоны и полюсов электромагнита при расстоянии между полюсами 52 мм дает, как показывает численный расчет, следующие оценочные значения интересующих параметров в рабочем объеме

$$\Delta = 5.2\% , H^{(0)} = 0.5769 \times M \text{ А/м}$$

Таким образом, в ряде случаев, когда область контроля находится между полюсами электромагнита, более целесообразно использовать в качестве намагничивающей системы С-образный магнит, который позволяет обеспечить лучшую однородность при большей интенсивности намагничивающего поля, что также является очевидным из физических соображений.

Для повышения степени однородности поля для этой конструкции магнитной системы одним из возможных вариантов ее реализации является построение с использованием набора дискретных прямоугольных стержней. Априори предполагаются известными размеры дискретных элементов полюсных наконечников, их количество, а также то, что они намагничены до состояния близкого к насыщению (см. рис. 4).

Пусть полюсные наконечники имеют квадратную форму и на каждом основании электромагнита расположено $2N \times 2N$ квадратных элементов со сторонами размером D , намагниченность которых M считается постоянной и направленной вдоль оси OZ . Требуется подобрать такие расстояния h_i от поверхностей этих элементов до плоскости XOY контрольной области, чтобы

внутри рабочего объема Ω в межполюсном пространстве создавалось высокооднородное магнитное поле максимально возможной напряженности.

В силу зеркальной симметрии задачи для однозначного описания расстояний до поверхностей прямоугольных элементов полюсных наконечников достаточно задать численные значения лишь n расстояний (см. рис. 5)

Таким образом, расстояния до полюсных наконечников однозначно

$$n = \frac{N(1+N)}{2} \quad (5)$$

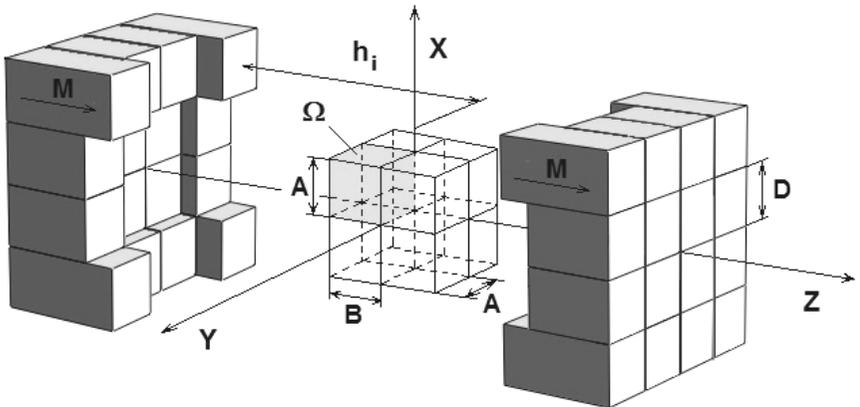


Рис. 4. Общий вид полюсных наконечников магнитной системы. определяются вектором параметров

$$\mathbf{h} = \{h_0, h_1, \dots, h_{n-1}\} \quad (6)$$

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| h_0 | h_1 | h_2 | h_2 | h_1 | h_0 |
| h_1 | h_3 | h_4 | h_4 | h_3 | h_1 |
| h_2 | h_4 | h_5 | h_5 | h_4 | h_2 |
| h_2 | h_4 | h_5 | h_5 | h_4 | h_2 |
| h_1 | h_3 | h_4 | h_4 | h_3 | h_1 |
| h_0 | h_1 | h_2 | h_2 | h_1 | h_0 |

Рис. 5. Параметры квадратных полюсных элементов ($N = 3$)

При этом достаточно обеспечить однородность магнитного поля лишь в области пространства, лежащей в одном из октантов Ω и имеющей размеры $A \times A \times B$.

Для оптимального синтеза высокооднородного магнитного поля внутри объема рабочей области воспользуемся следующей нормированной многокритериальной целевой функцией

$$f(\mathbf{h}) = \frac{\sum_{k=1}^K (H_x^{(k)})^2 + \sum_{k=1}^K (H_y^{(k)})^2 + \sum_{k=1}^K (H_z^{(k)} - H_z^{(0)})^2}{K \cdot |H_z^{(0)}|^3} \quad (7)$$

где K – количество точек в контрольной области, $H_i^{(k)}$ – одна из компонент напряженности магнитного поля в k -й контрольной точке, $i = x, y, z$; $H_z^{(0)}$ – z -компонента магнитного поля в центре рабочего объема. Минимизация целевой функции (7) позволяет уменьшить значения компонент напряженности поля H_x и H_y , выполнить условия однородности по компоненте H_z и максимизировать поле по этой составляющей в рабочем объеме. Во время проведения оптимизации предлагается использовать сгущающуюся сеть контрольных точек. При этом в начале оптимизационного процесса шаги между узлами сети Δx , Δy , Δz выбираются достаточно крупными, на следующих итерациях шаги сети постепенно уменьшаются и их новые значения пересчитываются по формулам

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{s_x}; \quad \Delta y' = \frac{\Delta y}{s_y}; \quad \Delta z' = \frac{\Delta z}{s_z}, \quad (8)$$

где $\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$ – новые значение расстояний между соседними контрольными точками, s_x , s_y , s_z – масштабирующие коэффициенты для соответствующих осей координат. Для плавного сгущения сети значения масштабирующих коэффициентов s предлагается задавать несколько большими единицы. При таком выборе новые контрольные точки не совпадут с предыдущими, и однородность поля будет оцениваться в других точках рабочего объема, т. е. происходит более тщательное исследование области контроля ограниченным количеством «плавающих» точек.

Таким образом, при оптимизации с использованием сгущающейся сети сначала находится грубое решение задачи, а затем значение вектора \mathbf{h} уточняется при меньшем шаге между контрольными точками. Результат такого подхода – ускорение оптимизационного процесса за счет уменьшения общего числа расчетов магнитного поля в контрольных точках.

Зададимся ограничениями на изменения значений h_i выступов полюсных элементов магнитной системы (см. рис. 4). Так как выступы полюса не могут пересекать поверхность трубы, и в то же время для обеспечения значительной напряженности магнитного поля должны находиться достаточно близко от нее, то для любого выступа должно выполняться неравенство

$$B < h_i \leq h_{\max}, \quad (9)$$

где h_{\max} – наибольшее допустимое расстояние между плоскостью XOY контрольной зоны и выступами элементов магнитного полюса; $i = 0, n-1$.

Для решения поставленной оптимизационной задачи использовался разработанный авторами гибридный алгоритм оптимизации роем частиц PSO и генетического алгоритма GA с вещественными хромосомами со случайной топологией связей между частицами. Эта разновидность эволюционного мультиагентного метода роевого интеллекта обеспечивает более высокую сходимость, чем каждый из этих алгоритмов в отдельности, и позволяет находить глобальное решение многоэкстремальной оптимизационной задачи высокой размерности за минимальное число вычислений целевой функции, что выгодно отличает его от классического PSO [5, 6].

Проиллюстрируем работу разработанного ПО на численном эксперименте. В качестве значений исходных данных для магнитной системы с полюсными наконечниками, состоящими из набора прямоугольных элементов, выбирались значения $N = 5$, $D = 10$ мм, $h_{\max} = 100$ мм, $A = 10$ мм, $B = 15$ мм, $\Delta x^{(0)} = \Delta y^{(0)} = \Delta z^{(0)} = 5$ мм, $s_x = s_y = s_z = 1.017$. При этом полюсные наконечники и контрольная зона имеют размеры, аналогичные тем, которые применялись для оценки характеристик поля, создаваемого П-образным магнитом.

Ступение сетки продолжалось до шага 1 мм через каждые 15 итераций оптимизационного процесса. Размер роя принимался равным 20 частицам, количество кроссоверов – 4, вероятность мутации – 0.3. При данном количестве полюсных элементов требовалось найти оптимальные значения для $n=15$ параметров. Результаты решения этой задачи оптимизации приведены в табл. 2.

Внешний вид одного из двух оптимальных полюсных наконечников для данного случая моделирования проиллюстрирован на рис. 6. Сравнительный анализ показал, что синтезированный вариант конструкции имеет более высокие показатели однородности и интенсивности магнитного поля, чем П-образные и С-образные системы с плоскими полюсами.

В процессе изготовления полюсных наконечников могут быть допущены погрешности, наиболее существенными из которых в смысле влияния на распределение поля являются отклонения в расстояниях h_i .

Таблица 2

Оптимальные значения выступов полюсных элементов

| Выступ | Значение, мм | Выступ | Значение, мм |
|---|--------------|----------------------|------------------|
| h_0 | 96.692 | h_8 | 96.453 |
| h_1 | 26.000 | h_9 | 78.389 |
| h_2 | 47.754 | h_{10} | 50.310 |
| h_3 | 26.128 | h_{11} | 78.702 |
| h_4 | 44.503 | h_{12} | 84.844 |
| h_5 | 71.583 | h_{13} | 79.225 |
| h_6 | 96.060 | h_{14} | 97.846 |
| h_7 | 80.343 | | |
| Однородность магнитного поля, % | | Δ_x, Δ_y | 0.005 |
| | | Δ_z | 0.013 |
| Напряженность поля в центре рабочей области, A/m | | $H^{(0)}$ | $0.2133 \cdot M$ |

Для оценки влияния погрешностей изготовления численно промоделируем случайные отклонения оптимальных размеров выступов, воспользовавшись для определенности нормальным законом их распределения.

Из технологических соображений будем считать, что стандартное отклонение этих значений составляет 0.1 мм. На рис. 7 приведены гистограммы, показывающие распределение однородности магнитного поля при заданном уровне отклонения. Размер выборки равен $m = 1000$.

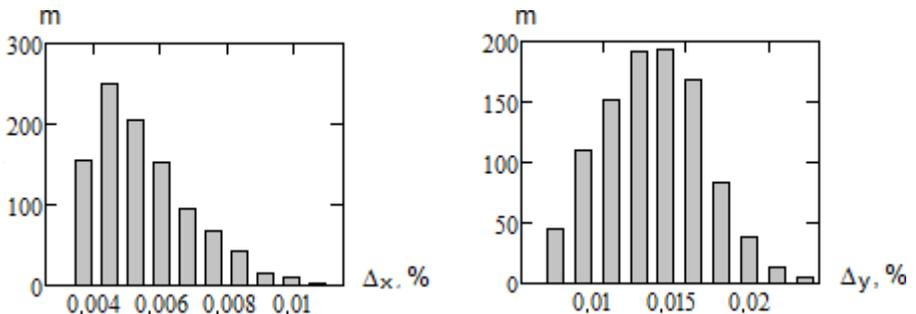


Рис. 7. Гистограммы влияния погрешностей выступов на однородность поля

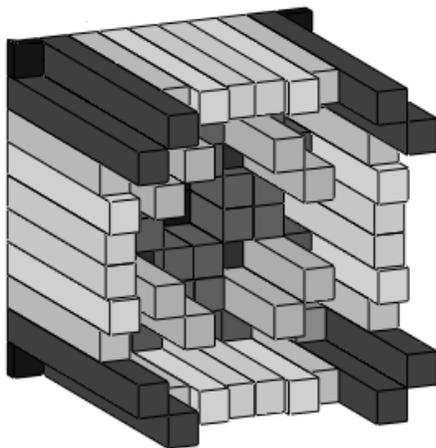


Рис. 6. Внешний вид оптимального полюсного наконечника ($N = 5$)

Полученные в результате статистической обработки данные для математических ожиданий и стандартных отклонений однородности магнитного поля составляют

$$\begin{aligned} \overline{\Delta_x} = \overline{\Delta_y} = 0.0055 \% & \quad \sigma(\Delta_x) = \sigma(\Delta_y) = 0.0015 \% \\ \overline{\Delta_z} = 0.0129 \% & \quad \sigma(\Delta_z) = 0.0031 \% \end{aligned}$$

Заключение. Результатом работы является создание программного комплекса оптимального синтеза намагничивающих устройств дефектоскопического контроля с высокооднородными магнитными полями, позволяющего проектировать широкий спектр устройств для конкретных объектов контроля. В качестве примера оптимального синтеза удалось спроектировать магнитную систему для намагничивания электросварных труб диаметром 51 мм, обеспечивающую в рабочем объеме магнитное поле с однородностью 0.01 %. Предложенный вариант оказался более эффективным, чем обычно применяемые на практике намагничивающие устройства в виде П-образных магнитов.

Список литературы: 1. *Зацепин Н.Н., Коржова Л.В.* Магнитная дефектоскопия. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 208 с. 2. *Мужжицкий В.Ф., Кудрявцев Д.А.* Некоторые вопросы определения оптимальных размеров намагничивающих систем на постоянных магнитах // Дефектоскопия. – 2004. – № 2. – С. 67–75. 3. *Загидулин Р.В., Якшибаев Б.Р., Загидулин Т.Р.* Влияние дискретности магнитной системы на величину ее магнитного поля // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 10. – С. 9–14. 4. *Шлеенков А.С., Бульчев О.А., Шлеенков С.А.* Установка УМД–101М для автоматизированного магнитного контроля качества электросварных труб по всему объему. – 2008. 5. *Kennedy J., Eberhart R.* Particle Swarm Optimization. // Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ. 5(3). – 1995. – PP. 1942–1948. 6. *Clerc. M.* Back to random topology. Режим доступа к статье: http://clerc.maurice.free.fr/psa/random_topology.pdf.