

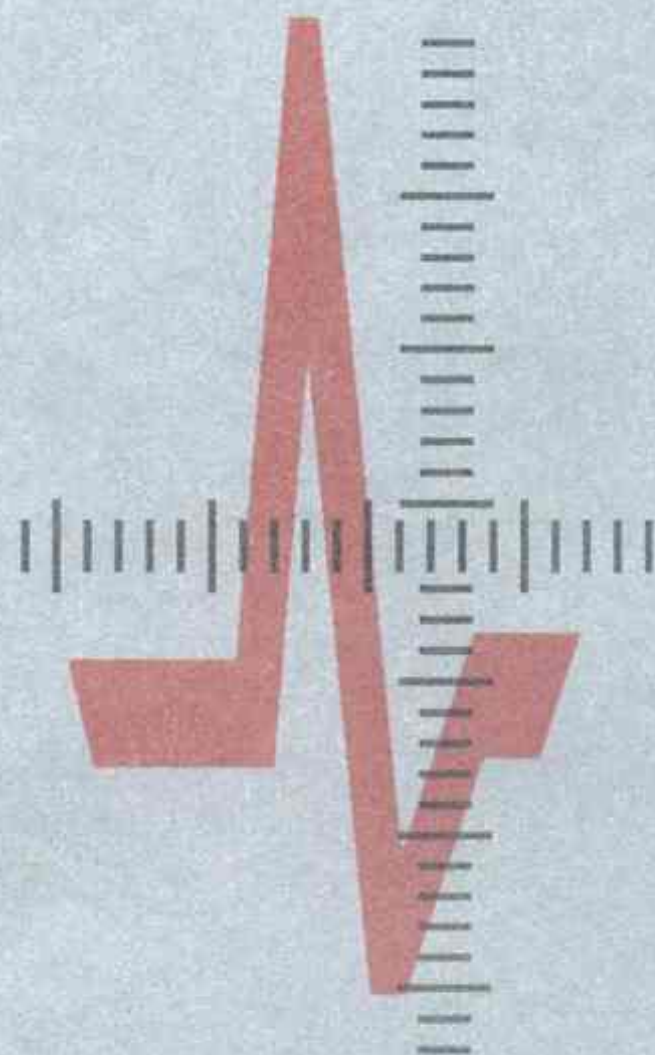
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ISSN 0130—3082

Директоскопия

5

2011



«НАУКА»



Редакционная коллегия

- Щербинин В. Е. — член-корр. РАН, главн. редактор, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Горкунов Э. С. — член-корр. РАН, зам. гл. ред., ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург
- Костин В. Н. — д.т.н., отв. секретарь, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Алёшин Н. П. — академик РАН, МГТУ, Москва
- Бархатов В. А. — к.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Вавилов В. П. — д.т.н., ТПУ, Томск
- Гурвич А. К. — д.т.н., ГУПС, Санкт-Петербург
- Гуревич С. Ю. — д.т.н., ЮУрГУ, Челябинск
- Добман Герд — доктор, Фраунгоферовский институт, Саарбрюкен, Германия
- Дымкин Г. Я. — д.т.н., ЛИИЖТ, Санкт-Петербург
- Ключев В. В. — академик РАН, МНПО "Спектр", Москва
- Корзунин Г. С. — д.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Кортон В. С. — д.т.н., УГТУ-УПИ, Екатеринбург
- Курмаев Э.З. — д.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Мигун Н. П. — д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск
- Миховски Митко — д.т.н., Институт механики БАН, София, Болгария
- Ничипурук А. П. — д.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Перевалов С. П. — к.т.н., АО "Уралтехэнерго", Екатеринбург
- Потапов А. И. — д.т.н., СЗТУ, Санкт-Петербург
- Ринкевич А. Б. — д.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Сажин С. Г. — д.т.н., НГТУ, Нижний Новгород
- Смирнов С. В. — д.т.н., ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург
- Смородинский Я. Г. — д.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Федосенко Ю.К. — д.т.н., ИИН, Москва
- Чахлов В. А. — д.т.н., НИИ Интроскопии при ТПУ, Томск
- Шлеенков А. С. — д.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
- Щербинский В. Г. — д.т.н., ЦНИИТМАШ, Москва

Технический редактор Л. Н. Гончарова

Сдано в набор 21.03.11
Бум. писчая № 1
Усл. печ. л. 8,6
Тираж 209

Подписано в печать 21.04.11
Гарнитура Таймс
Усл. кр.-отт. 1,8 тыс.
Заказ 62

Формат 70×108 1/16
Печать офсетная
Уч.-изд. л. 9,8

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН

Адрес редакции: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Телефоны: (343) 374-05-54; 378-36-02
FAX: (343-3) 745244
e-mail: defect@imp.uran.ru

Типография "Уральский центр академического обслуживания"
Екатеринбург, ул. Первомайская, 91



СОДЕРЖАНИЕ

Магнитные методы

- В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко.** Решение обратной задачи создания однородного магнитного поля в коэрцитиметрах с частично замкнутой магнитной системой 3

Акустические методы

- А.В. Шевелев, Ж.В. Зацепилова.** Ультразвуковые искатели с тороидной фокусировкой 19
- С.В. Павлов.** Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных тепловыделяющих элементов ядерных реакторов 23

Механоэлектрические методы

- Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Дани.** Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований 39

Рентгеновские методы

- М.Т. Сасапур, Е.И. Косарина.** Рекомендации по выбору анодных напряжений при рентгеновском контроле стальных объектов 48

Капиллярный контроль

- Ю.А. Глазков.** О качестве экзаменационных вопросов по капиллярному контролю 54

Контроль окружающей среды

- В.Т. Беликов, Д.Г. Рывкин.** Изучение изменений структурных и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород с использованием вариаций концентрации радона 67

Радиационные методы

- Миңцюань Вап, Юй Вап, Ли Чай.** Применение улучшенного алгоритма водораздела для сегментации изображений сварных швов 79

- О наших авторах 87
- Поздравляем юбиляра 88
- Информация 89

CONTENTS

Magnetic methods

- V.Ya. Galchenko, A.N. Yakimov, D.L. Ostapushchenko. The solution of uniform magnetic field inverse problem for coercive force meter with partially closed core 3

Acoustic methods

- A.V. Shevelev, Zh.V. Zatsepilova. The toroidal focusing ultrasonic transducers 19
S.V. Pavlov. The ultrasonic method of carrying out leak detection of nuclear fuel assemblies 23

Mechanoelectrical methods

- T.V. Fursa, K.Yu. Osipov, D.D. Dann. Development of a method for nondestructive strength testing of faulted structure concrete based on the mechanoelectrical transformations 39

X-ray methods

- M.T. Sasanpur, E.I. Kosarina. Guidelines for choosing the anode voltage levels for X-ray testing of steel wares 48

Penetrant testing methods

- Yu.A. Glazkov. On the quality of penetrant testing examination questions 54

Environmental control methods

- V.T. Belikov, D.G. Ryvkin. Study of changing the structural and dynamic characteristics of destroying mountain range using variation of radon concentration 67

Radiological methods

- M. Wang, Y. Wang, L. Chai. Application of an improved watershed algorithm in welding image segmentation 79

- About our authors 87
Congratulations to jubilar 88
Information 89
-

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОЭРЦИТИМЕТРАХ С ЧАСТИЧНО ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

В.Я. Гальченко, А.Н. Якимов, Д.Л. Остапущенко

Рассмотрено использование гибридной технологии оптимизации роением частиц с эволюционным формированием состава роения совместно с методом пространственных интегральных уравнений при синтезе аксиально-симметричных магнитных систем коэрцитиметров, содержащих ферромагнитные элементы. При этом требуемая однородность магнитного поля в рабочем объеме обеспечивается путем оптимального выбора формы полюсных наконечников намагничивающего устройства. Предложен ряд мероприятий, позволяющих ускорить процесс синтеза за счет сокращения времени, затрачиваемого на решение задачи анализа распределения магнитного поля в рабочем объеме коэрцитиметра.

Ключевые слова: пространственные интегральные уравнения, глобальный оптимум, оптимизация роением частиц, генетический алгоритм, гибрид, источник магнитного поля, синтез, технология on/off.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов, влияющих на погрешность измерения в коэрцитиметрии, является однородность магнитного поля (ОМП) в рабочем объеме, в которое помещен контрольный образец и датчики при проведении измерений [1—5]. Требуемый уровень однородности поля может быть обеспечен за счет выбора конструктивных параметров магнитной системы (МС) коэрцитиметра (КР). Однако сложный характер зависимости распределения магнитного поля от значений параметров МС исключает возможность их выбора путем проб и ошибок, поскольку такой подход требует для проведения анализа значительное число вариантов. Это обуславливает необходимость использования при решении данной задачи процедуры оптимального синтеза с рациональной стратегией порождения вариантов, подразумевающей широкое применение компьютерной техники для выбора лучшего из них. При этом анализ и оценивание ОМП в рабочем объеме КР может осуществляться посредством его численного моделирования.

Решение задачи создания однородного МП в случае КР с разомкнутой МС, в качестве источников поля в которых, как правило, выступают системы катушек с током, может осуществляться путем определения токов в катушках при их фиксированных геометрических параметрах в результате линейного синтеза [6], определения размеров и положения катушек посредством синтеза в нелинейной постановке [7], а также с использованием структурного синтеза [8], который позволяет минимизировать число используемых в КР катушек и выбрать оптимальную последовательность их включения.

Для КР с частично замкнутой МС задача синтеза усложняется тем, что конфигурация магнитного поля в рабочем объеме определяется не

Владимир Яковлевич Гальченко, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики Луганского государственного медицинского университета. Тел. 8-0642-63-02-53. E-mail: halchvl@gmail.com

Александр Николаевич Якимов, преподаватель кафедры медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики Луганского государственного медицинского университета. Тел. 8-0642-63-02-53. E-mail: alex_forever_82@mail.ru

Дмитрий Леонидович Остапущенко, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики Луганского государственного медицинского университета. Тел. 8-0642-63-02-53. E-mail: OstapuschencoDmitriy@gala.net

только топографией намагничивающего поля катушек с током, выступающих в качестве первичных источников, но и формой ферромагнитных элементов (ФЭ) МС — магнитопроводом и полюсными наконечниками, входящими в состав КР данного типа, а также магнитными характеристиками материалов, использованных при их изготовлении. В этом случае выбор конструктивных параметров МС с ФЭ подразумевает проведение расчета распределения намагниченности в них для каждого из рассматриваемых наборов значений параметров, что требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому в рамках используемого подхода к синтезу должен быть реализован гармонично согласованный с ним алгоритм решения задачи анализа.

В первом приближении распределение намагниченности в полюсных наконечниках можно считать постоянным, что позволяет значительно упростить задачу расчета конфигурации создаваемого полюсными наконечниками магнитного поля в рабочем объеме [9—13] и выбора оптимальной формы полюсных наконечников.

Существенным фактором также является выбор оптимизационного алгоритма, который используется при решении задачи синтеза, поскольку возникающие в данном классе задач целевые функции имеют, в общем случае, многоэкстремальный и овражный характер. В [14] задача синтеза формулировалась как задача нелинейного программирования, а в качестве метода оптимизации применяли крупношаговый метод поиска экстремума, который позволяет найти лишь локальное решение. При этом возникают трудности выбора начального приближения, так как от него существенным образом зависит найденный экстремум. В исследовании [15] применительно к решению данной задачи дальнейшее развитие получил метод эквивалентных витков. Однако применение этого подхода описано лишь для идеализированного случая зависимости намагниченности ферромагнитного материала от поля, хотя для большинства реальных МС магнитные характеристики являются нелинейными и прослеживается существенная зависимость распределения намагниченности от топографии намагничивающего поля. Авторы этой работы при решении задачи оптимизации использовали классические методы скорейшего спуска, которые, в общем случае, также не обеспечивают нахождение глобального решения. В [16] была рассмотрена задача синтеза МС изохронных циклотронов. Для решения прямой задачи применяли метод конечных элементов (FEM), который, несмотря на некоторые свои преимущества, имеет ряд недостатков. Главный из них связан с тем, что при использовании FEM необходимо проводить дискретизацию ферромагнитного тела и окружающего его пространства, что приводит к повышению размерности решаемой задачи, а также предполагает введение искусственных ограничений расчетной области. Кроме этого, для новых вариантов полюсных элементов (ПЭ) электромагнита, получаемых в процессе оптимизации, необходимы повторные разбиения или деформация уже имеющейся сети элементов. Также в работе отсутствуют конкретные сведения об используемом методе условной оптимизации.

В настоящее время при проектировании магнитных устройств широкое распространение получил метод анализа чувствительности (Sensitivity Analysis). В исследовании [17] ищется оптимальная форма поверхностей полюсных наконечников, описываемых с помощью кривых Безье и B-сплайнов. Для решения задачи синтеза в данном исследовании применяли сочетание методов анализа чувствительности и наискорейшего спуска, которое хотя и позволяет выбрать перспективные направления изменения параметров формы полюсов, однако из-за используемого

локального метода оптимизации не обеспечивает гарантированного нахождения их наилучшей геометрии.

Цель данной статьи — разработка метода оптимального параметрического синтеза аксиально-симметричных МС коэрцитиметров на основе алгоритма глобальной мультиагентной оптимизации с использованием аппарата пространственных интегральных уравнений, позволяющего учесть нелинейные свойства ферромагнитных материалов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Предметом исследований является КР с аксиально-симметричной частично замкнутой МС, который используется для испытания магнитных свойств материалов и подробно описан в [1—5]. В составе его конструкции имеются катушки 5 (см. рис. 1) и катушки для импульсного намагничивания, которые на рисунке не показаны, их основное назначение заключается в доведении образца до насыщения. Для магнитомягких материалов в применении этих катушек нет необходимости, тогда как для магнитотвердых материалов они используются лишь на стадии намагничивания. Поэтому в дальнейшем рассматривается МС, внешний вид которой с установленным в ней образцом проиллюстрирован на рис. 1.

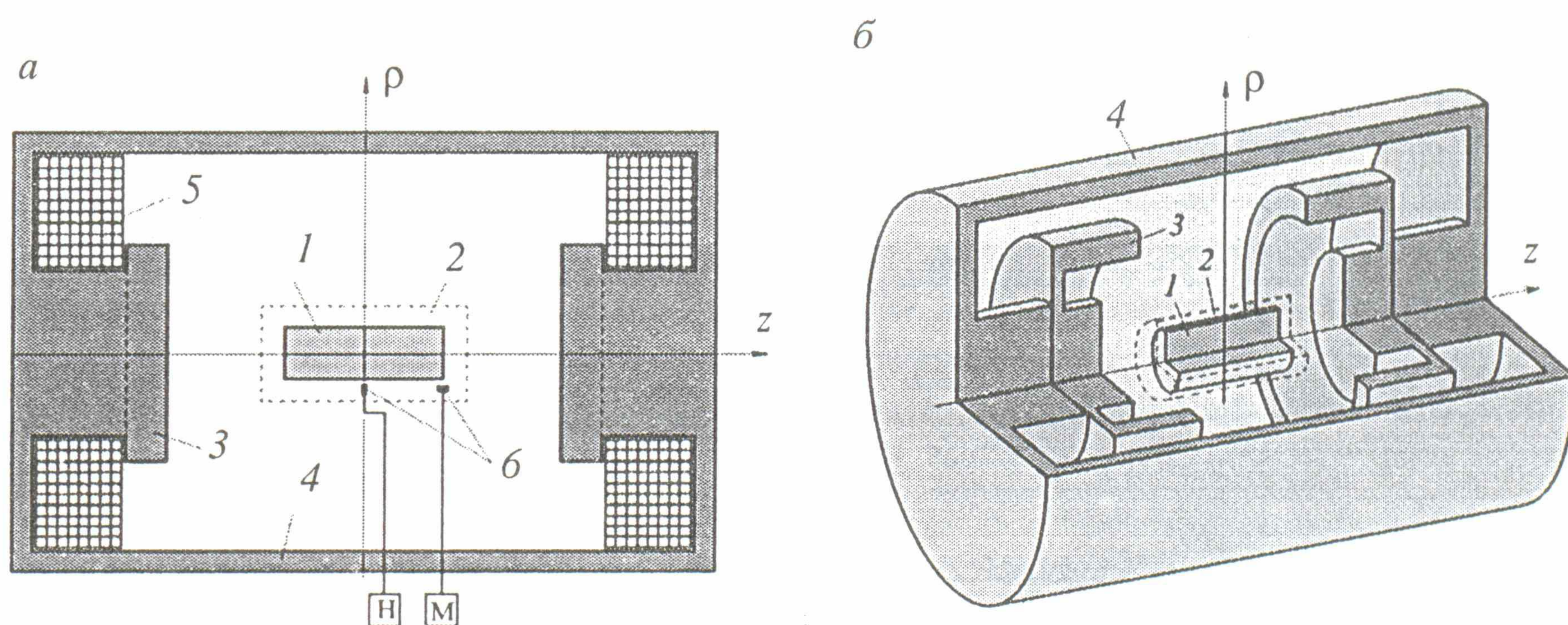


Рис. 1. Внешний вид коэрцитиметра с полюсными наконечниками:

1 — контролируемый образец; 2 — рабочий объем; 3 — полюсные наконечники; 4 — магнитопровод; 5 — катушки; 6 — преобразователи Холла.

Решение задачи синтеза сводится к выбору геометрических параметров полюсных наконечников, выполненных из ферромагнитного материала с нелинейными магнитными характеристиками, обеспечивающих заданное распределение поля в рабочем объеме Ω , то есть решается обратная задача магнитостатики. При этом каждый из полюсных наконечников представлен в виде совокупности цилиндрических ПЭ, радиусы и высоты которых выступают в качестве искоемых параметров. Число полюсных элементов задается априори.

На рис. 2 проиллюстрированы варьируемые параметры ПЭ, а также приведены значения геометрических размеров, которые остаются неизменными в процессе синтеза для одного из конкретных примеров.

При синтезе совокупность искоемых параметров представляется вектором, компонентами которого являются значения высот h_i и радиусов ρ_i полюсных элементов

$$\mathbf{X} = (h_1, h_2, \dots, h_N, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N). \quad (1)$$

На значения параметров КР накладывается ряд конструктивных ограничений, задаваемых в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max}; \\ 0 \leq \rho_1 \leq \rho_2 \leq \dots \leq R_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где $h_{\min}$ и $h_{\max}$ — наименьшее и наибольшее допустимые значения высот ПЭ; $R_{\max}$ — наибольшее возможное значение радиуса полюсного накопника.

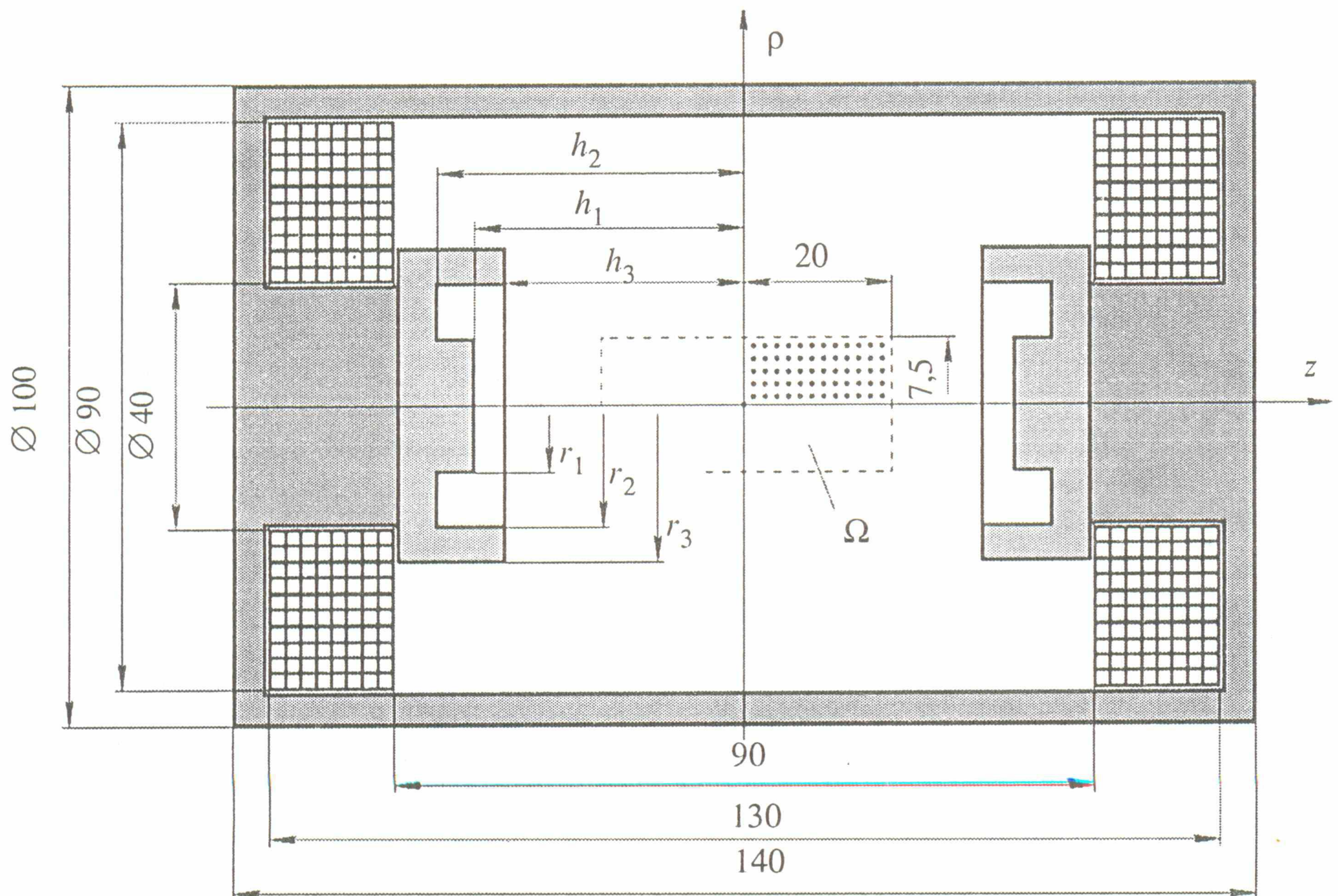


Рис. 2. Размеры и параметры синтезируемого коэрцитиметра с тремя полюсными элементами.

Для оценки ОМП в рабочем объеме Ω регулярно размещено множество из K контрольных точек, в которых при проведении анализа поля рассчитывают максимальное относительное отклонение значений напряженностей магнитного поля от значения H_0 в центре контрольной зоны

$$\Delta = \max_k \frac{|H_k - H_0|}{|H_0|} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где H_k — напряженность поля в k -й контрольной точке; $k = \overline{1, K}$.

Так как МС коэрцитиметра обладает аксиальной симметрией, анализ распределения поля достаточно провести лишь в четвертой части сечения рабочего объема (см. рис. 2). Следует заметить, что рабочий объем Ω должен быть больше объема, занимаемого исследуемым в КР образцом, что обусловлено необходимостью размещения датчиков в области однородности поля, а также позволяет снизить погрешность, связанную с неточностью позиционирования образца в устройстве.

В качестве целевой функции введем в рассмотрение функционал

$$f(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^K (H_z - H_0)^2 + \sum_{k=1}^K (H_p)^2, \quad (4)$$

минимизация которого обеспечивает повышение степени ОМП в рабочем объеме. Для решения задачи глобальной оптимизации перспективным является использование сравнительно новых бионических эволюционных оптимизационных технологий, таких как генетические алгоритмы GA [18—20] и мультиагентная оптимизация роем частиц PSO [21—23], основанная на парадигме роевого интеллекта (Swarm Intelligence). Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому в качестве метода оптимизации в данной работе предложено использовать разработанную авторами гибридную технологию оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава роя. Сочетанное использование этих методов позволяет повысить вероятность нахождения глобального решения и увеличить скорость сходимости алгоритма.

Характерной особенностью гибрида является существенно меньшее число вычислений целевой функции, чем при использовании каждого алгоритма в отдельности, что особенно важно при проведении синтеза МС, при котором требуется многократное решение ресурсоемкой задачи анализа. Подробные сведения о гибридном алгоритме, верификации и анализе его сходимости для многомерных овражных и многоэкстремальных целевых функций приведены в [24], где продемонстрированы все достоинства разработанного метода глобальной оптимизации. Примеры эффективного использования алгоритма приведены также в [25], где он использовался для синтеза осесимметричных МС электромагнитов с заданным распределением поля в рабочей зоне для случая, когда учитывался линейный характер зависимости между напряженностью магнитного поля и намагниченностью ферромагнетика. При таких допущениях задача синтеза поля решалась с использованием метода граничных интегральных уравнений.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ПОЛЯ В МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ КОЭРЦИТИМЕТРА

Учет нелинейной зависимости намагниченности от напряженности поля может быть осуществлен в результате применения аппарата пространственных интегральных уравнений (ПрИУ), как это сделано в [26—29], но адаптированного к случаю аксиально-симметричных МС. Магнитное поле, создаваемое в рабочем объеме КР, состоит из двух составляющих: поля от намагниченных ферромагнитных частей магнитной системы $\mathbf{B}'$ и поля от внешних источников $\mathbf{B}_0$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}' + \mathbf{B}_0. \quad (5)$$

Расчет поля, создаваемого катушками с учетом их прямоугольного поперечного сечения, может быть осуществлен по известным численно-аналитическим соотношениям [30]. Для вычисления магнитного поля, создаваемого ФЭ КР, нужно определить значения намагниченности в них. Распределение намагниченности $\mathbf{M}$ в ФЭ МС может быть определено в результате решения ПрИУ

$$\mathbf{B}(\mathbf{Q}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \operatorname{rot}_{\mathbf{Q}} \iiint_V \mathbf{M}(\mathbf{P}) \times \operatorname{grad} \frac{1}{r_{PQ}} dV_P + \mathbf{B}_0(\mathbf{Q}), \quad (6)$$

где $\mathbf{r}_{PQ}$ — вектор, проведенный из точки истока P в точку наблюдения Q ; $\mathbf{B}(Q)$ — магнитная индукция в точке Q ; $\mathbf{B}_0(Q)$ — магнитная индукция внешнего поля, создаваемого токами, протекающими в катушках. Если тело магнитопровода состоит из n произвольных частей, то уравнение (6) запишется в виде

$$\mathbf{B}(Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^n \operatorname{rot}_Q \iiint_{V_j} \mathbf{M}(P) \times \operatorname{grad} \frac{1}{r_{PQ}} dV_P + \mathbf{B}_0(Q). \quad (7)$$

Воспользовавшись известными соотношениями векторного анализа и теоремой о роторе, а также вводя обозначения для объемной $\mathbf{j}(P) = \operatorname{rot}_P \mathbf{M}(P)$ и поверхностной $\mathbf{i}(P) = -\mathbf{n}_P \times \mathbf{M}(P)$ плотностей токов, интегральное уравнение (7) можно преобразовать следующим образом:

$$\mathbf{B}(Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^n \operatorname{rot}_Q \iiint_V \frac{\mathbf{j}(P)}{r_{PQ}} dV_P + \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^n \operatorname{rot}_Q \oint_{S_j} \frac{\mathbf{i}(P)}{r_{PQ}} dS_P + \mathbf{B}_0(Q). \quad (8)$$

Если рассматривать лишь тела, обладающие аксиальной симметрией, разбитые на кольцевые элементы (см. рис. 3), и предположить, что в пре-

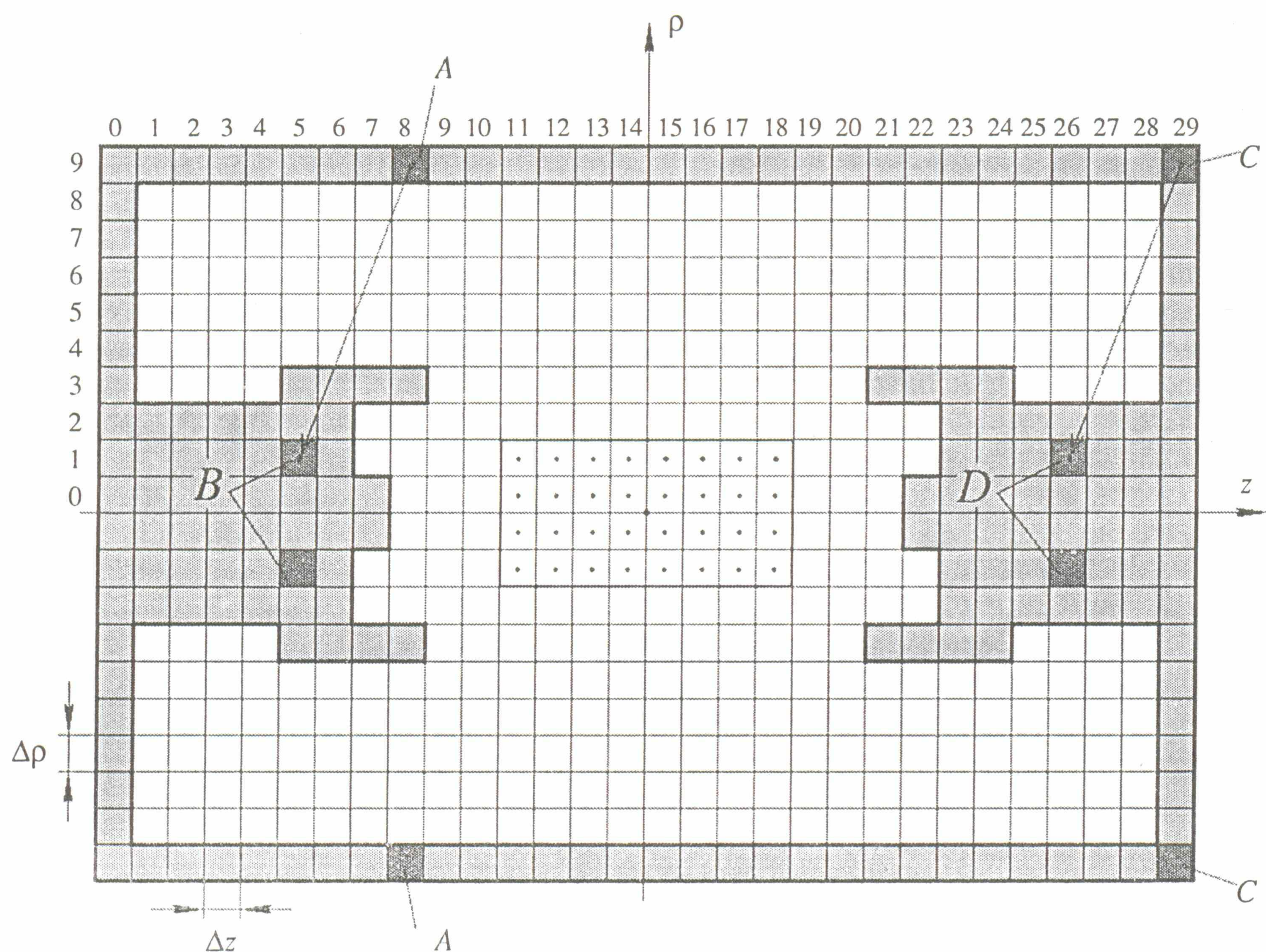


Рис. 3. Дискретизация магнитной системы коэрцитиметра на кольцевые элементы:

А, В и С, D — поперечные сечения кольцевых элементов разбиения разного диаметра.

делах каждого такого элемента вектор намагниченности постоянен: $M_\rho = \text{const}$; $M_z = \text{const}$; $M_\phi = 0$, то выписав выражение для $\operatorname{rot}_P \mathbf{M}(P)$ в цилиндрической системе координат, легко убедиться, что в этом случае объемная плотность токов $\mathbf{j} = 0$.

Размещая точку наблюдения последовательно в центрах поперечных сечений элементов разбиения, запишем дискретный аналог ИУ

$$\mathbf{B}(Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^n \operatorname{rot}_Q \oint_{S_j} \frac{\mathbf{i}(P)}{r_{PQ}} dS_P + \mathbf{B}_0(Q). \quad (9)$$

Формула (9) после вычисления ротора в точках Q_i принимает вид

$$\mathbf{B}(Q_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^n \oint_{S_j} \frac{\mathbf{i}(P) \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P + \mathbf{B}_0(Q_i). \quad (10)$$

Интеграл в выражении (10) формально равен магнитной индукции, создаваемой тонкими катушками с поверхностными плотностями тока $\mathbf{i}(P)$. Поэтому, записав его в виде суммы интегралов для каждой поверхности элементов разбиения (см. рис. 4), получим формулу

$$\mathbf{B}(Q_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^4 \oint_{S_j^{(k)}} \frac{\mathbf{i}_j^{(k)} \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P + \mathbf{B}_0(Q_i), \quad (11)$$

где $\mathbf{i}_j^{(k)} = -\mathbf{n}_j^{(k)} \times \mathbf{M}_j$ — поверхностный ток, протекающий по k -й поверхности j -го элемента разбиения.

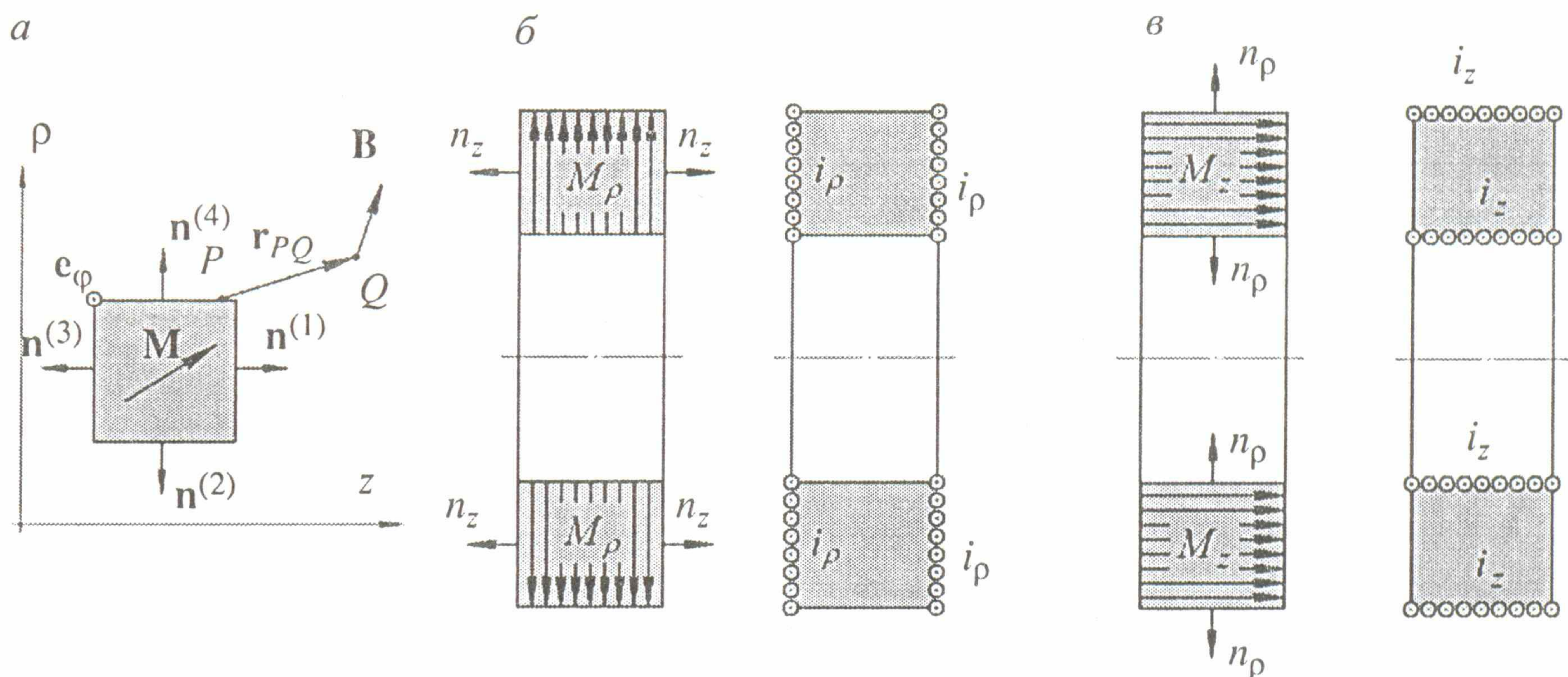


Рис. 4. Замена элементов разбиения эквивалентными катушками: а — графическое изображение элемента разбиения; б — учет радиальной составляющей $\mathbf{M}$; в — учет аксиальной составляющей $\mathbf{M}$.

Вектор намагниченности $\mathbf{M}_j$ можно разложить по его компонентам

$$\mathbf{M}_j = M_{\rho j} \mathbf{e}_{\rho} + M_{zj} \mathbf{e}_z. \quad (12)$$

С учетом того, что

$$\mathbf{n}_j^{(1)} = \mathbf{e}_z, \mathbf{n}_j^{(2)} = -\mathbf{e}_{\rho}, \mathbf{n}_j^{(3)} = -\mathbf{e}_z, \mathbf{n}_j^{(4)} = \mathbf{e}_{\rho}, \quad (13)$$

для поверхностных токов справедливы выражения:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_j^{(1)} &= -M_{\rho j} \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_{\rho} = -M_{\rho j} \mathbf{e}_{\varphi}; & \mathbf{i}_j^{(2)} &= M_{zj} \mathbf{e}_{\rho} \times \mathbf{e}_z = -M_{zj} \mathbf{e}_{\varphi}; \\ \mathbf{i}_j^{(3)} &= M_{\rho j} \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_{\rho} = M_{\rho j} \mathbf{e}_{\varphi}; & \mathbf{i}_j^{(4)} &= -M_{zj} \mathbf{e}_{\rho} \times \mathbf{e}_z = M_{zj} \mathbf{e}_{\varphi}, \end{aligned} \quad (14)$$

поэтому интегральное уравнение (11) допускает представление в виде

$$\mathbf{B}(Q_i) = \mu_0 \sum_{j=1}^n \left(\Theta_{ij} M_{\rho j} + \Xi_{ij} M_{zj} \right) + \mathbf{B}_0(Q_i), \quad (15)$$

где введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \Theta_{ij} &= \frac{1}{4\pi} \oint_{S_j^{(3)}} \int \frac{\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P - \frac{1}{4\pi} \oint_{S_j^{(1)}} \int \frac{\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P; \\ \Xi_{ij} &= \frac{1}{4\pi} \oint_{S_j^{(4)}} \int \frac{\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P - \frac{1}{4\pi} \oint_{S_j^{(2)}} \int \frac{\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P. \end{aligned} \quad (16)$$

Значения слагаемых в правых частях выражений (16) численно равны напряженностям поля, создаваемым в точке Q_i поверхностными токами единичной плотности, протекающими по соответствующим боковым поверхностям кольцевого элемента разбиения, направление которых в каждой точке поверхности задается вектором $\mathbf{e}_\varphi$.

Компоненты напряженности магнитного поля, создаваемые тонким витком с единичным током радиуса ρ_P и координатой z_P , определяются по приведенным ниже формулам [30]:

$$\begin{aligned} h_\rho(Q) &= \frac{1}{2\pi} \left[E(k) \frac{\rho_P^2 + \rho_Q^2 + (z_Q - z_P)^2}{(\rho_P - \rho_Q)^2 + (z_Q - z_P)^2} - K(k) \right] \times \\ &\quad \times \frac{z_Q - z_P}{\rho_Q \sqrt{(\rho_P + \rho_Q)^2 + (z_Q - z_P)^2}}; \\ h_z(Q) &= \frac{1}{2\pi} \left[E(k) \frac{\rho_P^2 - \rho_Q^2 - (z_Q - z_P)^2}{(\rho_P - \rho_Q)^2 + (z_Q - z_P)^2} + K(k) \right] \frac{1}{\sqrt{(\rho_P + \rho_Q)^2 + (z_Q - z_P)^2}}; \\ k &= \sqrt{\frac{4\rho_Q\rho_P}{(\rho_P + \rho_Q)^2 + (z_Q - z_P)^2}}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $K(k)$, $E(k)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода. Тогда интегралы в выражениях (16) можно вычислить путем интегрирования вектора $\mathbf{h}(Q) = h_\rho(Q)\mathbf{e}_\rho + h_z(Q)\mathbf{e}_z$ вдоль соответствующих отрезков $l_j^{(k)}$, образующих контур прямоугольного сечения j -го элемента разбиения

$$\frac{1}{4\pi} \oint_{S_j^{(k)}} \int \frac{\mathbf{e}_\varphi \times \mathbf{r}_{PQ_i}}{r_{PQ_i}^3} dS_P = \int_{l_j^{(k)}} \mathbf{h}(Q_i) dl_P. \quad (18)$$

Вводя оператор обратной магнитной характеристики $\mathbf{H} = F^{-1}(\mathbf{M})$, позволяющий по намагниченности ФЭ вычислить напряженность магнитного поля в них, для вектора магнитной индукции получаем

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(F^{-1}(\mathbf{M}) + \mathbf{M}). \quad (19)$$

Таким образом, интегральное уравнение (10) можно заменить системой нелинейных алгебраических уравнений

$$F^{-1}(\mathbf{M}_i) + \mathbf{M}_i = \sum_{j=1}^n (\Theta_{ij} M_{\rho j} + \Xi_{ij} M_{zj}) + \mathbf{H}_{0i}, \quad (20)$$

где $\mathbf{H}_{0i}$ — вектор напряженности магнитного поля, создаваемый катушками в центре прямоугольного сечения i -го кольцевого элемента разбиения; $i = \overline{1, n}$.

Данная система уравнений может быть записана в матричном виде

$$\mathbf{F}^{-1}(\mathbf{M}) + \mathbf{M} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M} + \mathbf{H}_0. \quad (21)$$

Матрица влияния $\mathbf{A}$ состоит из блоков размером 2×2 вида

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \Theta_{ij\rho} & \Xi_{ij\rho} \\ \Theta_{ijz} & \Xi_{ijz} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

таких, что

$$\Theta_{ij} M_{\rho j} + \Xi_{ij} M_{zj} = A_{ij} \cdot \mathbf{M}_j = \begin{pmatrix} \Theta_{ij\rho} & \Xi_{ij\rho} \\ \Theta_{ijz} & \Xi_{ijz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_{\rho j} \\ M_{zj} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Для описания магнитной характеристики при дальнейших расчетах удобно использовать соотношение, обеспечивающее обратимость характеристики при любом значении поля [29]

$$M(H) = \lambda M_1(H) + (1 - \lambda) M_2(H), \quad (24)$$

где $M_1(H)$ — уравнение магнитной характеристики, описывающее нелинейные магнитные свойства вещества; $M_2(H) = \chi H$; λ — вводимый параметр, принимающий значения из отрезка $[0, 1]$. Значение χ выбирается таким образом, чтобы линейная зависимость наилучшим образом аппроксимировала участок нелинейной магнитной характеристики. Нелинейная магнитная характеристика задается аналитическим соотношением [31]

$$M_1(H) = \chi_H \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H^2}{H^2 + \alpha H_{cs}^2} \left(\arctg \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \arctg \frac{H_{cs} - H}{H_0} \right). \quad (25)$$

Решив систему уравнений (21) с использованием метода продолжения по параметру λ , можно найти распределение намагниченностей в элементах разбиения, значения которых позволяют вычислить магнитное поле в рабочем объеме МС.

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Так как задача анализа при проведении синтеза решается многократно, то особенно важно, чтобы расчет поля занимал как можно меньше времени. Наиболее критичными по времени выполнения являются вычисление коэффициентов матрицы влияния $\mathbf{A}$ и решение полученной системы нелинейных уравнений, количество неизвестных в которой может достигать десятков тысяч. С целью ускорения оптимизационного процес-

са на плоскости ρOz вводится сеть $N_\rho \times N_z$ дискретных кольцеобразных элементов, покрывающая область потенциально возможного размещения элементов МС. Используя в дальнейшем технологию on/off применительно к элементам сети, при синтезе осуществляется выбор оптимальной геометрии МС, обеспечивающий заданное распределение поле в рабочем объеме (см. рис. 3).

Вектор параметров X ассоциируется затем с двумерным битовым образом МС, причем единица кодирует наличие соответствующего ферромагнитного кольцеобразного элемента в составе дискретной модели МС, а ноль — его отсутствие.

Определение элементов матрицы влияния для всевозможных взаимоположений элементов сети позволяет избежать их повторного вычисления на этапе синтеза для случаев МС различной геометрии. В общем случае, для хранения коэффициентов матрицы влияния A требуется $4N_\rho^2 N_z^2$ ячеек памяти компьютера, где N_ρ и N_z — количество разбиений вдоль координатных осей.

Если учесть тот факт, что численное значение коэффициентов взаимного влияния между парой элементов разбиения с точностью до знака определяется лишь тройкой чисел — радиусами этих колец и модулем расстояний между ними вдоль оси Oz , то пары колец, смещенные друг относительно друга вдоль оси симметрии, имеют одинаковые коэффициенты влияния. Так, кольцевой элемент разбиения A оказывает такое же влияние на элемент B , как элемент разбиения C влияет на элемент D (см. рис. 3). Учет описанной трансляционной симметрии позволяет уменьшить объем памяти, требуемой для хранения матрицы A , до значения $4N_\rho^2 N_z$. Если точки контрольной области, в которых проводится анализ распределения магнитного поля, совпадают с центрами элементов вводимой сети, то использование коэффициентов матрицы влияния дает возможность существенно повысить скорость вычисления поля в них, не проделывая непосредственно процедуру прямого интегрирования.

Для обеспечения высокой точности при расчете поля необходимо использовать сети с достаточно мелким шагом, что приводит к существенному росту порядка решаемой системы нелинейных уравнений, оцениваемого $\approx 10^4$. Эффективным методом решения таких систем является метод Ньютона-GMRES в сочетании с методом продолжения по параметру λ , который вводится в задачу согласно соотношению (25). Данный метод основан на проектировании на подпространства Крылова [32, 33] и позволяет решать системы с плотно заполненными матрицами. Особенностью и существенным достоинством данного метода является отсутствие необходимости формирования матрицы влияния в явном виде, а матрично-векторные произведения с участием матрицы A вычисляются неявно путем обхода дискретных элементов сети в соответствии с содержанием битового образа.

Значительной экономии временных ресурсов при решении систем нелинейных уравнений удастся достичь за счет использования начальных приближений, полученных на предыдущих шагах алгоритма оптимизации для МС схожей геометрии.

ВЕРИФИКАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА

Верификацию разработанного алгоритма анализа поля с использованием ПриУ проводили для случая с известным аналитическим решением — бесконечной ферромагнитной пластины с линейными магнитными свойствами материала, помещенной в однородное МП напряженностью H_0 , перпендикулярное к ее поверхности. Для этой цели бесконечную пластину заменяли тонким диском (см. рис. 5) толщиной $h = 5$ мм и радиусом

$r = 100$ мм. Напряженность внешнего поля принимали равной $H_0 = 1$ кА/м, магнитную проницаемость $\mu = 100$, а разбиение диска проводили с одинаковым шагом 1 мм по осям ρ и z . Из граничных условий для нормальной составляющей вектора магнитной индукции может быть получена аналитическая зависимость, позволяющая определить напряженность поля внутри пластины $H = H_0/\mu$.

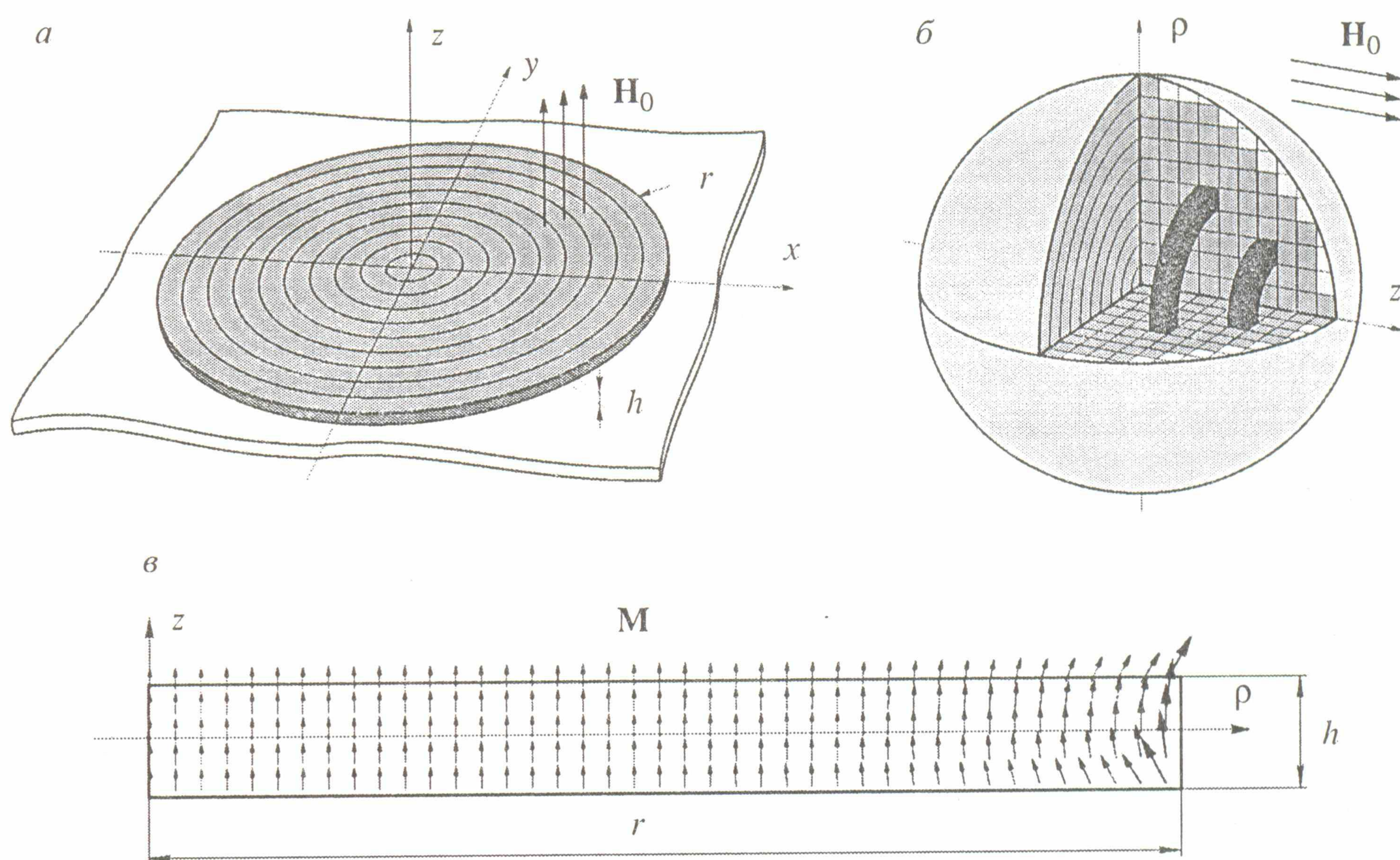


Рис. 5. Разбиение тонкого диска (а) и шара (б) на кольцевые элементы, распределение намагниченности в диске (в).

Сопоставление результатов аналитического и численного решений показало, что погрешность определения напряженности магнитного поля не превышает 2,1 %. При дальнейшем увеличении радиуса диска до значения $r = 500$ мм погрешность расчета составляет 0,45 %, что свидетельствует о выполнении условия $\lim_{r \rightarrow \infty} H_{\text{расч}} = H$. При этом вычисленное

в центре пластины поле имеет напряженность $H_{\text{расч}} = 10,045$ А/м.

Известно, что бесконечная ферромагнитная пластина намагничивается при тех же условиях однородно даже при нелинейных характеристиках ее материала. В силу того, что диск только приближенно моделирует бесконечную пластину, оценим однородность магнитного поля лишь в его части, находящейся в непосредственной близости к центру диска. Модельные расчеты проводились для геометрии диска, совпадающей с предыдущим линейным случаем, но при учете нелинейных свойств материала в соответствии с зависимостью (25) и параметрами, заимствованными из [31]. Численный эксперимент выявил, что в области, ограниченной контрольным радиусом, равным трети радиуса диска, неоднородность намагниченности не превышала 0,2 %. При увеличении контрольного радиуса наблюдается тенденция к нарушению однородности, обусловленная влиянием краев диска.

Кроме того, рассчитывали напряженность магнитного поля внутри H_{int} и снаружи H_{ext} моделирующего бесконечную пластину диска. H_{ext} вычисляли в точке, лежащей на оси z и отстоящей от поверхности диска на расстояние 5 мм. На рис. 6 приведены результаты расчета этих параметров в нелинейном случае при различных шагах разбиения диска. Графи-

ки свидетельствуют, что вычислительный процесс устойчив и обладает сходимостью, а дискретности шага 0,5 мм достаточно для получения достоверных значений напряженности определяемого поля.

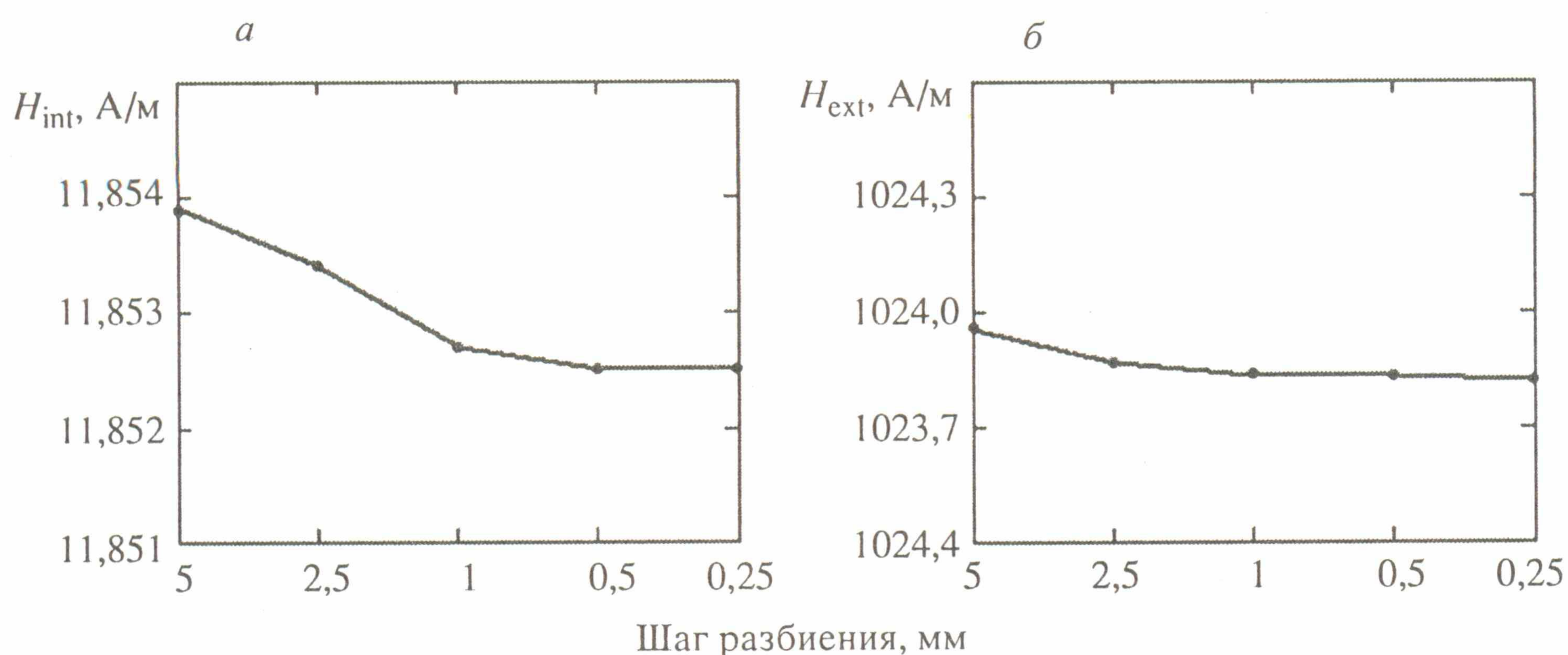


Рис. 6. Результаты расчета поля на оси внутри (а) и снаружи (б) диска для нелинейного случая.

Проверкой корректности численного моделирования также служит анализ намагничивания шара радиусом $R = 20$ мм однородным полем $H_0 = 1$ кА/м, при этом намагниченность шара должна быть однородной.

Считается, что шар выполнен из материала с нелинейными магнитными характеристиками. В качестве элементов разбиения шара использовали кольцевые элементы с прямоугольным поперечным сечением, что позволяет лишь приближенно описать его геометрию, оценку однородности проводили только в части объема шара с контрольным радиусом $r = 15$ мм. Шаг разбиения выбирали равным 0,1 мм. Результаты численного моделирования показали, что однородность намагничивания находится на уровне 1,3 %. Так как кольцевые элементы с разным радиусом имеют разные объемы и в пределах каждого из них намагниченность при расчете считалась постоянной, представляет интерес также найти усредненную однородность намагниченности шара по всему его объему, для оценки которой использовалась формула

$$\Delta_M = \frac{\sum_{i=1}^n |\mathbf{M}_i - \mathbf{M}_0| V_i}{|\mathbf{M}_0| V} \cdot 100 \%,$$

в которой $\mathbf{M}_i$ — намагниченность в i -м кольце; $\mathbf{M}_0$ — намагниченность в центре шара; n — количество кольцевых элементов; V_i — объем i -го кольцевого элемента; V — суммарный объем шара, представленного множеством элементов разбиения. Расчет показал, что усредненная по объему однородность намагниченности составляет 2,8 %, при этом напряженность магнитного поля в центре шара равна 33,5 А/м.

ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ КОЭРЦИТИМЕТРОВ

Рассмотрим пример синтеза магнитной системы коэрцитиметра с использованием разработанного метода. Для МС в этом случае использовали размеры, приведенные ранее на рис. 2. Плотность тока в катушках выбирали равной $j = 2$ А/мм². Значения параметров ПЭ варьировались в

пределах $h_{\min} = 20$ мм, $h_{\max} = 45$ мм, $R_{\max} = 35$ мм. Для оценки однородности магнитного поля в рабочем объеме Ω с интервалом 1 мм вдоль осей ρ и z размещалось 150 контрольных точек. Объем, занимаемый МС, регулярно разбивался на кольцевые элементы с шагом 1 мм. Общее количество разбиений МС составляло около семи тысяч.

Используемая в МС пара катушек в отсутствии ФЭ создает в рабочем объеме магнитное поле с однородностью $\Delta_\rho = 18,7\%$ для радиальной и $\Delta_z = 37,5\%$ для аксиальной составляющих, напряженность которого составляет $H_0 = 4096$ А/м. При использовании в КР плоских цилиндрических полюсов наилучшие результаты ОМП достигаются, когда полюсы вплотную приближены к рабочему объему, что обеспечивает однородность поля $\Delta_\rho = 1,46\%$ и $\Delta_z = 5,31\%$, и значение поля в центре рабочего объема $H_0 = 33\,373,5$ А/м.

После проведения оптимального синтеза для первого модельного примера найдены значения оптимальных параметров полюсных накопечников КР, приведенные в таблице, при которых напряженность поля имеет величину 21 345,4 А/м, а однородность $\Delta_\rho = 0,25\%$ и $\Delta_z = 0,47\%$.

Оптимальные параметры синтезированных магнитных систем

Номер ПЭ	Модельный пример 1		Модельный пример 2	
	ρ , мм	h , мм	ρ , мм	h , мм
1	16	33	1	25
2	29	42	28	25
3	35	22	34	20

Так как работа КР предполагает изменение тока в катушках, представляет интерес изучить зависимость напряженности магнитного поля и его степени однородности в рабочем объеме при различных плотностях тока. На рис. 7 проиллюстрированы зависимости $H(j)$ и $\Delta_{\rho,z}(j)$ для перво-

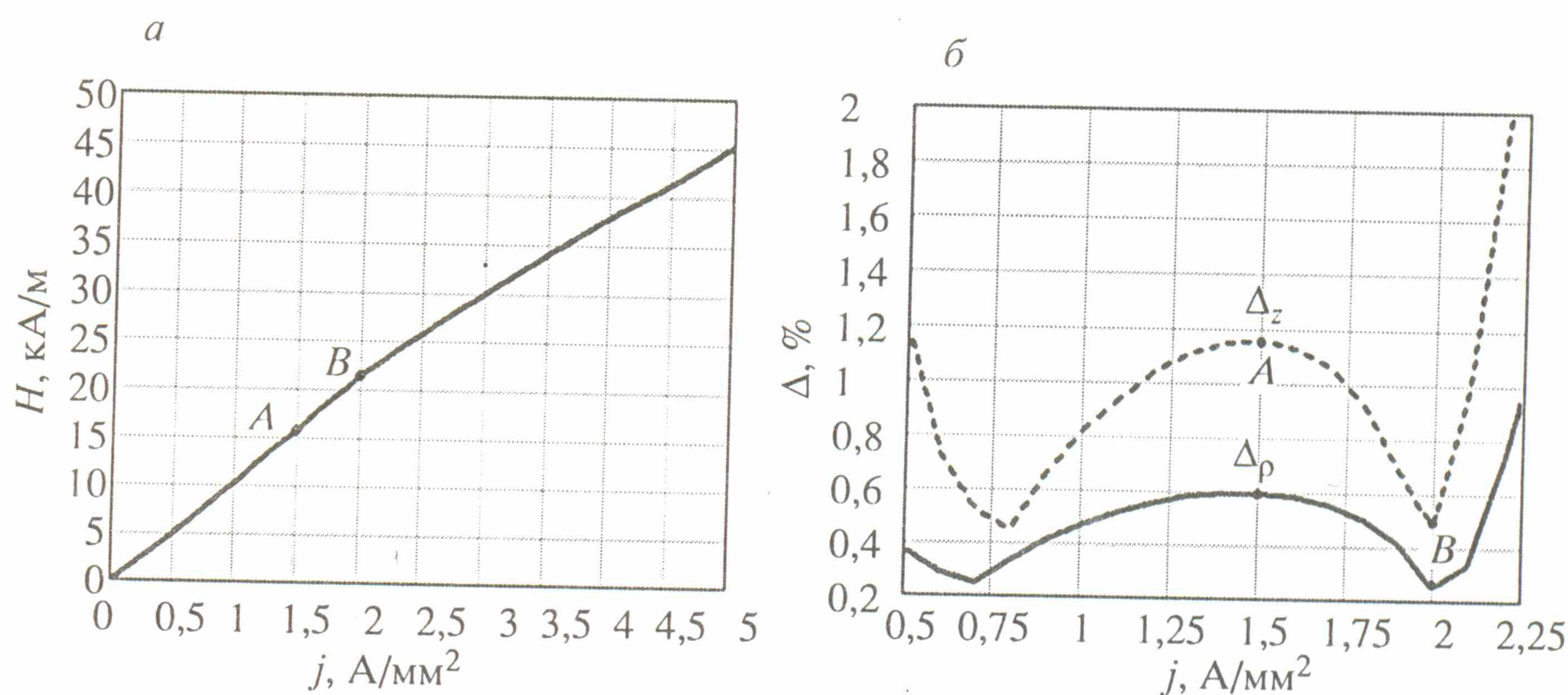


Рис. 7. Зависимость напряженности (а) и однородности (б) магнитного поля в рабочем объеме от плотности тока в катушках для модельного примера 1.

го модельного примера (точка В). Анализ графиков на рис. 7б показал, что однородности магнитного поля КР зависит от плотности тока в катушках. Рассмотрение вопроса, связанного с обеспечением заданной степени однородности поля с учетом такой зависимости, представляет самостоятельный интерес и требует дальнейшего изучения, не являясь предметом данного исследования. Предположительно учет этой зависимости

при синтезе потребует формулировки целевой функции как многокритериальной.

Второй пример синтеза проводили при плотности тока $j = 1,5 \text{ А/мм}^2$ (точка А) при прочих равных условиях. Цель этого численного эксперимента заключалась в принципиальной проверке возможности достижения достаточной степени однородности поля при других плотностях тока. Найденные значения оптимальных параметров, приведенные в таблице, обеспечивают напряженность поля в рабочем объеме $20\,600,9 \text{ А/м}$ и однородности $\Delta_r = 0,31 \%$, $\Delta_z = 0,37 \%$ для радиальной и аксиальной составляющих напряженности магнитного поля.

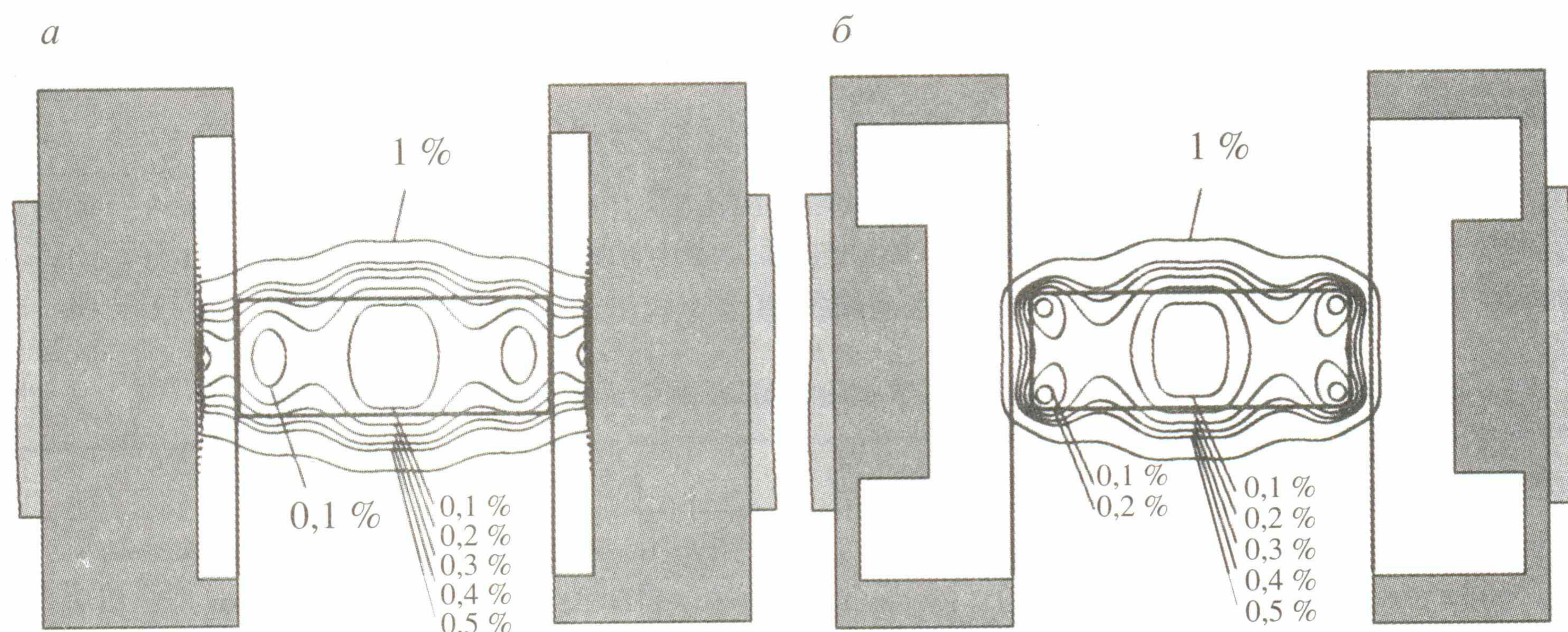


Рис. 8. Изолинии однородности поля в рабочем объеме коэрцитиметра для модельных примеров 1 (а) и 2 (б).

На рис. 8 показаны изолинии однородности для синтезированных форм полюсных наконечников, а на рис. 9 изображена 3D-CAD-модель одного из синтезированных полюсов, соответствующая модельному примеру 2.

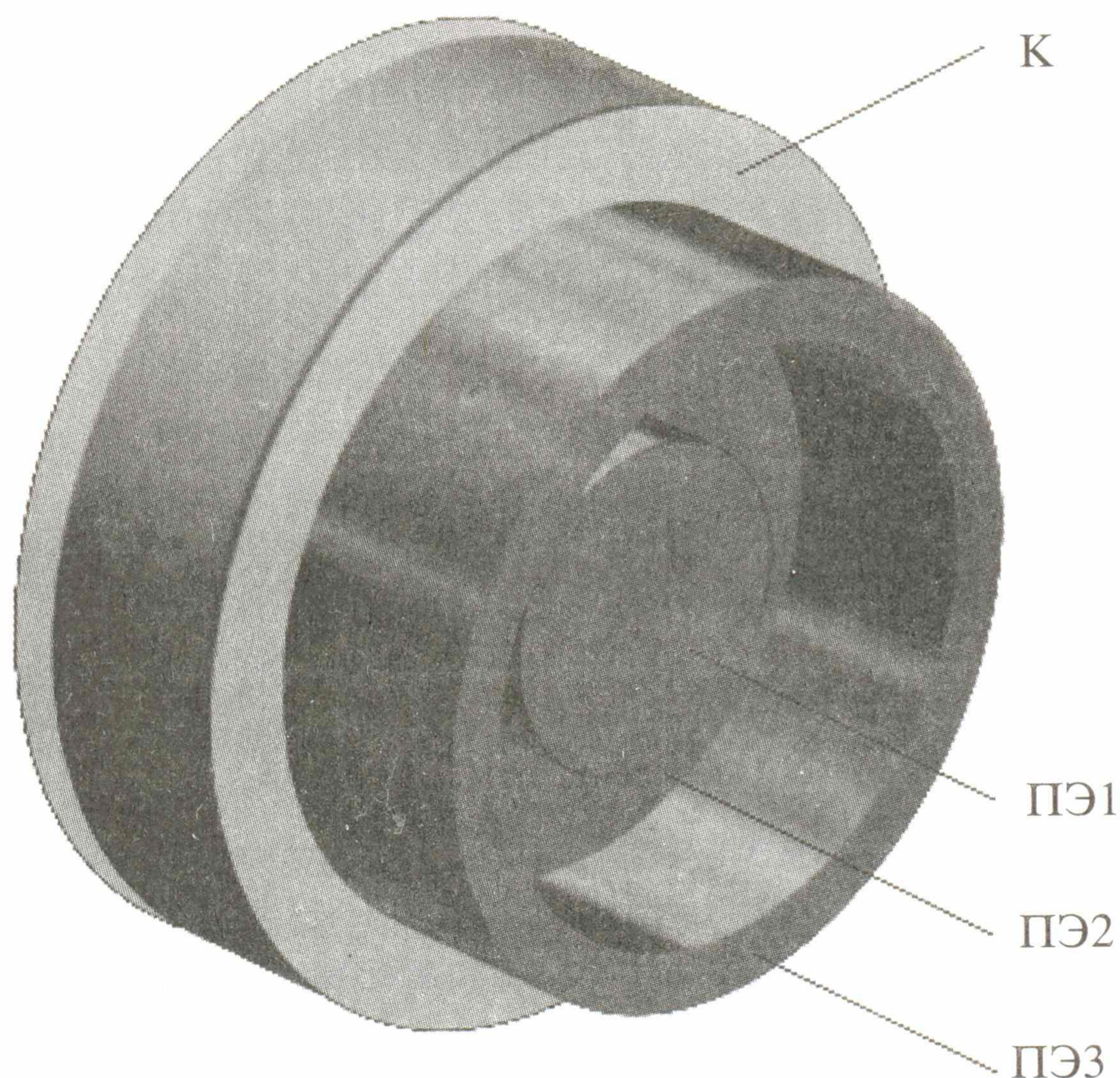


Рис. 9. 3D-CAD-модель полюсного наконечника магнитной системы коэрцитиметра:

К — катушка, ПЭ — полюсные элементы.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод синтеза, в котором одновременно гармонично сочетаются аппарат ПриУ, глобальный алгоритм оптимизации роением частиц с эволюционным формированием состава роя, технология on/off,

метод решения систем нелинейных уравнений большого порядка Ньютона-GMRES и метод продолжения по параметру, а также учет трансляционной симметрии позволяют эффективно проводить синтез аксиально-симметричных магнитных систем коэрцитиметров с заданной конфигурацией поля.

2. На основе метода ПриУ разработана информационная модель анализа распределения напряженности магнитного поля в осесимметричных магнитных системах, состоящих из источников поля в виде катушек и ферромагнитных элементов с нелинейными магнитными характеристиками.

3. Численные эксперименты синтеза коэрцитиметров позволили в приведенных модельных примерах обеспечить степень однородности магнитного поля в рабочем объеме на уровне 0,3 %.

4. Разработанный метод позволяет синтезировать магнитные системы с неоднородными полями с большим градиентом для коэрцитиметров, основанных на пондеромоторном методе испытаний.

Луганский государственный
медицинский университет

Поступила в редакцию
21 января 2011 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов.— М.: Энергия, 1969.— 360 с.
2. Февралева Н.Е. Магнитотвердые материалы и постоянные магниты. Определение характеристик. Справочник.— Киев: Наукова думка, 1969.— 232 с.
3. Андриевский Е.А. Измерение параметров постоянных магнитов.— Киев: Техника, 1977.— 152 с.
4. Испытание магнитных материалов и систем. Под ред. А.Я. Шихина.— М.: Энергоатомиздат, 1984.— 376 с.
5. Коген-Далин В.В., Комаров Е.В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами.— М.: Энергия, 1977.— 248 с.
6. Гальченко В.Я. Синтез магнитных систем датчиков линейных перемещений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.05 “Теоретическая электротехника”.— М.: МЭИ, 1990.— 16 с.
7. Павлов А.К. Совершенствование магнитных систем коэрцитиметров для измерения магнитных свойств разомкнутых образцов.— Український метрологічний журнал, 2004, вип. 1, с. 27—32.
8. Гальченко В.Я., Воробьев М.А. Совершенствование соленоидальной магнитной системы коэрцитиметра методами структурной оптимизации.— Технічна електродинаміка, 2004, № 4, с. 71—75.
9. Мужичкий В.Ф., Кудрявцев Д.А. Некоторые вопросы определения оптимальных размеров намагничивающих систем на постоянных магнитах.— Дефектоскопия, 2004, № 2, с. 67—75.
10. 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.
11. Гальченко В.Я., Якимов А.Н., Остапущенко Д.Л. Параметрический синтез формы аксиально-симметричных полюсов электромагнита для создания однородного магнитного поля.— Харьков: Електротехніка і електромеханіка, 2010, № 2, с. 33—36. Режим доступа к статье: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Eie/2010_2/10.pdf
12. Гальченко В.Я., Якимов А.Н., Остапущенко Д.Л. Оптимальное проектирование намагничивающих систем с высокооднородными магнитными полями в дефектоскопическом неразрушающем контроле.— Вісник Національного технічного університету “ХПІ”, 2010, № 12, с. 100—109. Режим доступа к статье: http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2010_12.pdf
13. Гальченко В.Я., Якимов А.Н. Оптимальное конструирование электромагнитов с коническими полюсами для генерации высокооднородного магнитного поля.— Электронное моделирование. — Киев, 2010, т. 32, № 6, с. 85—96. Режим доступа к статье: <http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/em/texts.html>
14. Курбатов П.А., Кузнецова Е.А., Кулаев Ю.В. Проектирование систем с постоянными магнитами открытого типа для магниторезонансных томографов.— Электричество, 2007, № 7, с. 47—52.
15. Сизиков В.С., Соколов Д.Ю. О повышении однородности поля постоянного магнита МР-томографа.— Изв. вузов. Приборостроение, 2006, т. 49, № 12, с. 32—38.

16. Богданов П.В., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Стогов Ю.И., Сыческий С.Е. Особенности конструирования магнитных систем ряда современных компактных изохронных циклотронов с использованием методов математического моделирования.— Журнал технической физики, 2010, т. 80, № 9, с. 125—133.
17. Ryu J.S., Yao Y., Koh C.S., Shin Y.J. 3-D optimal shape design of pole piece in permanent magnet MPI using parameterized nonlinear design sensitivity analysis.— IEEE Trans. Magn., 2006, v. 42, No 4, p. 1351—1354.
18. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems.— Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.— 228 p.
19. De Jong K.A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems.— Ph.D. thesis, University of Michigan, 1975.
20. Eshelman L.J., Schaffer J.D. Real-coded genetic algorithms and interval-schemata.— Foundation of Genetic Algorithms, 1993, v. 2, p. 187—202.
21. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia).— IEEE Service Center, Piscataway, 1995, NJ. 5(3), p. 1942—1948.
22. Clerc M. Particle swarm optimization.— USA.: ISTE Ltd., 2006.— 244 p.
23. Неитеративные, эволюционные и мультиагентные методы синтеза нечеткологических и нейросетевых моделей. Монография. Под общ. ред. С.О. Субботина.— Запорожье: Изд-во ЗНТУ, 2009.— 375 с.
24. Гальченко В.Я., Якимов А.Н., Остапущенко Д.Л. Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции.— Информационные технологии, 2010, № 10, с. 9—16.
25. Гальченко В.Я., Якимов А.Н., Остапущенко Д.Л. Использование метода граничных интегральных уравнений в оптимальном 3-D проектировании осесимметричных электромагнитов с выбором формы полюсных наконечников.— Електротехніка і електромеханіка.— Харьков, 2010, № 6, с. 20—24. Режим доступа к статье: <http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/eic/texts.html>
26. Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л. Численный анализ пространственной конфигурации магнитных полей объектов сложной геометрической формы с учетом нелинейных характеристик веществ.— Информационные технологии, 2008, № 8, с. 43—49.
27. Гальченко В.Я., Остапущенко 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.
28. Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений.— Дефектоскопия, 2009, № 3, с. 56—66.
29. Гальченко В.Я., Остапущенко 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.
30. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек.— М.: Энергоатомиздат, 1983.— 112 с.
31. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков.— Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 3—10.
32. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems.— PWS Publishing Company, 1996.— 448 p.
33. Баландин М.Ю., Шурина Э.П. Методы решения СЛАУ большой размерности.— Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.— 70 с.

Индекс 70253

ISSN 0130—3082. «Дефектоскопия». 2011, № 5.