

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ им. Г. Е. ПУХОВА

ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

6^{ТОМ 32} • 2010

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1979 ГОДУ

ВЫХОДИТ ОДИН РАЗ
В ДВА МЕСЯЦА

СОДЕРЖАНИЕ

Математические методы и модели

САУХ С. Е. Неполная столбцово-строчная факторизация матриц для итерационного решения больших систем уравнений 3

КУЛИЕВ С. З. Подход к идентификации коэффициентов нелинейных динамических объектов с сосредоточенными параметрами 15

МЕЛЬНИК И. В., ТУГАЙ С. Б. Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда 31

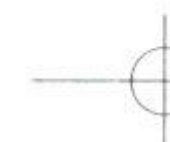
Вычислительные процессы и системы

ЛАЗОРЕНКО Д. И., ЧЕМЕРИС А. А., ТАРАПАТА В. В. Снижение энергопотребления цифровых устройств с помощью операции объединения циклов 45

СЕРГИЕНКО А. М., ЛЕСИК Т. М. Перестраиваемые цифровые фильтры на ПЛИС 59



© Институт проблем
моделирования
в энергетике
им. Г. Е. Пухова
НАН Украины, 2010



Применение методов и средств моделирования

ЕВДОКИМОВ В. Ф., КУЧАЕВ А. А., ПЕТРУШЕНКО Е. И., КУЧАЕВ В. А. Трехмерная модель распределения вихревых токов в жидкой стали непрерывнолитой заготовки при электромагнитном перемешивании	69
ГАЛЬЧЕНКО В. Я., ЯКИМОВ А. Н. Оптимальное конструирование электромагнитов с коническими полюсами для генерации высокооднородного магнитного поля	85
СТРИЖАК А. А. Структура платежных систем и моделирование их функционирования на основе системного анализа	97
Рецензия на книгу	111
«Золота Фортуна» — найвища сходинка до міжнародного визнання	113
Указатель статей, опубликованных в томе 32 (2010)	117

*Номер надруковано частково за рахунок державного замовлення
згідно з Програмою підтримки періодичних видань НАН України*

Свідоцтво про держ. реєстрацію КВ № 291, 16.12.93

Оригінал-макет виготовлено в ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України

Підписано до друку 28.11.10. Формат 70 × 100 /16. Папір офс. Гарн. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 10,0. Наклад. 218 прим. Зам. 2849. Ціна 30 грн.

Друкарня Видавничого дому «Академперіодика»
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК від 27.07.2001 р.



Указатель статей,
опубликованных в томе 32 (2010)

	№	С.
АЗАРЯН А.А. Модель взаимодействия гамма-излучения с горными породами	5	111
БАЛАМЕТОВ А.Б., ХАЛИЛОВ Э.Д., АЛИЕВ Х.Т., БАХЫШОВ Э.Д. Имитационное моделирование графиков нагрузки для расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях.	5	77
БОРУКАЕВ З.Х., ЕВДОКИМОВ В.Ф., ШИХАЛИЕВ С.З. Некоторые результаты компьютерного моделирования динамики взаимодействия сварочной дуги, вращающейся в радиальном магнитном поле, с трубчатым электродом	3	117
ВЕРЛАНЬ А.Ф., АБДИКАРИМОВ Р.А., ЭШМАТОВ Х. Численное моделирование нелинейных задач динамики вязкоупругих систем с переменной жесткостью	2	3
ВЕРЛАНЬ А.Ф., ЭШМАТОВ Х., ХОДЖАЕВ Д.А., ЭШМАТОВ Б.Х. Модели и методы математического моделирования нелинейных задач динамики вязкоупругих конструкций из композиционных материалов	4	3
ГАЛЬЧЕНКО В.Я., ЯКИМОВ А.Н. Оптимальное конструирование электромагнитов с коническими полюсами для генерации высокооднородного магнитного поля	6	85
ДЫШИН О.А., АЗИЗОВ И.А. Полумарковские модели управления рисками в магистральных газонефтепроводных системах	2	15
ЕВДОКИМОВ В.Ф., КУЧАЕВ А.А., ПЕТРУШЕНКО Е.И., КАСЬЯН Г.И. Двумерная интегральная модель распределения синусоидальных вихревых токов и электродинамических усилий в кристаллизаторе с явнополюсным электромагнитным перемешивателем.	1	53
ЕВДОКИМОВ В.Ф., КУЧАЕВ А.А., ПЕТРУШЕНКО Е.И., КУЧАЕВ В.А. Трехмерная интегральная модель магнитного поля электромагнитного перемешивателя	4	93
ЕВДОКИМОВ В.Ф., КУЧАЕВ А.А., ПЕТРУШЕНКО Е.И., КУЧАЕВ В.А. Трехмерная модель распределения вихревых токов в жидкой стали непрерывнолитой заготовки при электромагнитном перемешивании	6	69
ИЛЬНИЦКИЙ Л.Я., ЩЕРБИНА О.А., МИХАЛЬЧУК И.И. Моделирование поля излучения спиральной антенны	4	61
КАСУМОВ А.Б. Исследование нестационарных характеристик длины очереди однолинейной системы массового обслуживания, зависящих от числа требований.	3	33
КОБЯК И.П. Производящая функция для распределения статистик автокорреляционной функции.	2	61
ISSN 0204–3572. Электрон. моделирование. 2010. Т. 32. № 6		117

КОВАЛЕЦ И.В., ЖЕЛЕЗНЯК М.И., ХАЛЧЕНКОВ А.В., УДОВЕНКО О.И., ЛАВРОВА Т.В. Численное моделирование воздушного распространения радона вокруг урановых хвостохранилищ	3	67
КОСЯК И.В. Устранение паразитной частотной модуляции в звуковом сигнале. . .	4	49
КУЛИЕВ С.З. Подход к идентификации коэффициентов нелинейных динамических объектов с сосредоточенными параметрами.	6	15
ЛАЗОРЕНКО Д.И., ЧЕМЕРИС А.А., ТАРАПАТА В.В. Снижение энергопотребления цифровых устройств с помощью операции объединения циклов	6	45
ЛЕНЮК М.П., ДАНАЛАКИЙ О.Г. Математическая модель полупроводникового термоэлектрического устройства для охлаждения компьютерного процессора . . .	3	53
МАКАРИЧЕВ А.В. Асимптотическое распределение времени с момента отказа до выхода комплексов сложных восстанавливаемых систем из множеств неисправных состояний I	4	73
МАКАРИЧЕВ А.В. Асимптотическое распределение времени с момента отказа до выхода комплексов сложных восстанавливаемых систем из множеств неисправных состояний. II	5	45
МАМЕДОВ Г.А., МАНСУРОВ Т.М. Моделирование процесса решения сложных задач в однородной структуре	1	23
МАРТЫНЮК Т.Б., ТИМЧЕНКО Л.И., КУПЕРШТЕЙН Л.М. Аппаратная реализация модели формального нейрона	4	35
МЕЛЬНИК И.В., ТУГАЙ С.Б. Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда	6	31
ОРЛОВ В.В., КОВАЛЕНКО А.Ю. Моделирование конфигурации сети датчиков для устранения неоднозначности определения координат в пассивной локации	2	107
ПАВЛЕНКО В.Д. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов	3	3
ПАЛАГИН В.В. Адаптация моментного критерия качества для многоальтернативной задачи проверки гипотез при использовании полиномиальных решающих правил .	4	17
ПЕНТЕГОВ И.В., СИДОРЕЦ В.Н. Основные свойства характеристических линий бифуркационных диаграмм	5	57
ПОДОЛЬЦЕВ А.Д., КУЧЕРЯВАЯ И.Н. Конечно-элементное моделирование магнитных и тепловых процессов при магнитно-жидкостной гипертермии биологических тканей	1	89
ПОДОЛЬЦЕВ А.Д., КУЧЕРЯВАЯ И.Н. Компьютерное моделирование демографических процессов в Украине с учетом пространственного распределения народонаселения	2	97
ПУСЬ В.В. Нецентральное распределение статистики Фишера в гармоническом анализе	5	19
РОМАНКЕВИЧ А.М., РОМАНКЕВИЧ В.А., МОРАВЕДЖ СЕЙЕД МИЛАД. О повышении надежности реконфигурируемых отказоустойчивых многопроцессорных систем управления сложными объектами	4	85

РЯБЦЕВ В.Г., МОАМАР Д.Н. Метод и средство визуализации алгоритмов текстов диагностирования запоминающих устройств	3	43
САМОЙЛОВ В.Д., НЕТЛЮХ О.П. Модель коммутационной структуры подстанции	1	77
САУХ С.Е. Неполная столбцово-строчная факторизация матриц для итерационного решения больших систем уравнений.	6	3
СЕРГИЕНКО А.М. Спецпроцессоры для авторегрессионного анализа сигналов . .	2	87
СЕРГИЕНКО А.М., ЛЕСИК Т.М. Перестраиваемые цифровые фильтры на ПЛИС	6	59
СМАКОВСКИЙ Д.С. Адаптивная интерполяция на основе кривых Фергюссона для построения сеточных функций	5	11
СТРИЖАК А.А. Структура платежных систем и моделирование их функциони- рования на основе системного анализа	6	97
ТАРАСОВ А.И., ДОЛГОВ А.И. Стратегия оптимизации систем охлаждения лопаток газовой турбины методом ЛП-поиска применительно к сетевой модели	1	105
ТИМЧЕНКО Л.И., ПОПЛАВСКИЙ А.А., КОКРЯЦКАЯ Н.И., ПОПЛАВСКИЙ А.В. Метод формирования границ туннеля для классификации изображений пятен лазер- ных пучков	3	111
ТКАЧЕНКО А.Н., ГРИЙО ТУКАЛО О.Ф. Метод направленного поиска векторов в кодových книгах	2	77
ФАТТАХОВА М.И. Анализ многопараметрической стратегии доступа в мультисер- висных беспроводных сотовых сетях связи	1	33
ФЕДОРЧУК В.А. Моделирование типовых распределенных звеньев механической системы буровой установки	3	95
ФРИЗ М.Е., ЩЕРБАК Л.Н. Эргодические свойства линейных процессов в задачах математического моделирования и статистического анализа случайных сигналов	1	3
ХАХАНОВ В.И., ХАХАНОВА И.В., ЛИТВИНОВА Е.И., ГУЗЬ О.А. Тестирование и верификация HDL-моделей цифровых систем на кристаллах	2	31
ШАМОЛИН М.В. Диагностика одной системы прямого управления движением лета- тельных аппаратов	1	45
ШАМОЛИН М.В. Диагностика движения летательного аппарата в режиме плани- рующего спуска	5	31
ШИХАЛИЕВ С.З. Сравнение эффективности неявного локально-одномерного и чебышевского $T_{230,15}$ -методов с помощью расчета термодиффузии в плазмoeлектро- дной системе с неподвижной дугой	1	15
ЭШМАТОВ Х., ХОДЖАЕВ Д.А., ЭШМАТОВ Б.Х., КУЧАРОВ О.Р. Компьютерное моделирование задачи о нелинейном флаттере вязкоупругой пластины из компо- зиционного материала с сосредоточенными массами	5	3
ЯРОВОЙ Р.В., ГРУЦ Ю.Н. Алгоритм повышенной точности синтеза интерполя- ционной кривой	5	105

ABOLNIKOV L., ZACHARIAH T. M. A Queueing Approach in Determining Optimal Number of Beds in a Hospital Serving Urgent and Non-Urgent Patients	5	93
DSHALALOW J.H., ROBINSON R. On Fluctuations of a Nonmonotone Marked Point Process	3	19
RAMESH BABU N., MURTY K.N., BALARAM V.V.S.S.S. Control of Time Scale Dynamical Systems with an Application to Concurrency Control for Real-time Database Systems.	3	83
ZAWADA M. Application of an Error Correction Model in Assessment and Forecasting of Energy Consumption in the European Union.	1	113

УДК 004.021:621.318.3

В. Я. Гальченко, д-р техн. наук, **А. Н. Якимов**
Луганский государственный медицинский университет
(Украина, 91045, Луганск, кв-л 50-летия обороны Луганска, 1,
тел.: (0642) 63-02-53, E-mail: halchvl@gmail.com)

Оптимальное конструирование электромагнитов с коническими полюсами для генерации высокооднородного магнитного поля

Рассмотрено применение метода оптимизации роом частиц при поиске оптимальной формы полюсных наконечников для обеспечения высокой однородности магнитного поля в рабочем объеме. Наконечники представлены в виде набора конических элементов при условии их постоянной намагниченности.

Розглянуто використання методу оптимізації роєм часток при пошуку оптимальної форми полюсних наконечників для забезпечення високої однорідності магнітного поля у робочому об'ємі. Наконечники мають вигляд набору конічних елементів в умовах їхньої постійної намагніченості.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптимальный синтез поля, оптимизация роом частиц, глобальный оптимум, источник магнитного поля, электромагнит, форма полюсов.

Магнитные поля с высокой степенью однородности широко применяются в различных областях науки и техники. Особенно жесткие требования к однородности поля предъявляются в магнитной томографии, где для получения качественных изображений в рабочем объеме ЯМР-томографа необходимо создавать магнитное поле высокой однородности (1—100 ppm) с напряженностью не менее 0,1 Т. (При высоких требованиях к однородности поля ее числовую оценку удобно выражать в миллионных долях относительного отклонения (ppm)). Обычно для этих целей используют массивные катушки, в том числе и сверхпроводящие, подбором формы, радиусов и положений которых удается добиться значительного повышения однородности магнитного поля [1—4]. Однако большие габариты и необходимость в системе охлаждения значительно повышают сложность и стоимость таких диагностических устройств, а также делают их техническое обслуживание достаточно трудоемким. Представляет интерес создание более компактных томографов, построенных с использованием ферромаг-

нитных элементов конструкции, позволяющих при меньшей массе и стоимости создавать магнитное поле с требуемыми характеристиками.

Известен факт использования для повышения однородности поля в межполюсном пространстве аксиально-симметричного электромагнита так называемых шим Роуза [5]. Идея этого подхода заключается в том, что полюсные наконечники электромагнита снабжаются подвижными кольцами. При этом подбор параметров выступов колец позволяет увеличить однородность магнитного поля в зазоре между полюсами. Данный подход получил дальнейшее развитие в работе [6], в которой полюсные наконечники постоянных магнитов представлены в виде наборов цилиндрических полюсных элементов, а оптимальные значения высот и радиусов цилиндрических элементов определены методом крупношагового нелинейного программирования. Применение этого подхода позволило синтезировать в рабочем объеме магнитное поле с однородностью 80—100 ppm.

В работах [7, 8] магнитное поле в межполюсном пространстве рассчитано с помощью метода эквивалентных витков, а задача оптимизации решена с использованием градиентных методов. В работе [9] профиль полюса представлен в виде ломаной и B -сплайна, однако задача оптимизации решена с помощью градиентного метода для двумерного случая, а постоянная плотность магнитного потока обеспечена лишь в точках, находящихся на одной прямой вблизи поверхности полюса.

Однако для практического применения более важен синтез поля в объеме пространства. В [10, 11] форма полюсных наконечников аксиального магнита описана с помощью Безье- и B -сплайнов, при этом задача синтеза решена методом анализа чувствительности с последующей оптимизацией методом наискорейшего спуска.

Таким образом, во всех этих исследованиях использованы локальные методы оптимизации. Однако при варьировании не только высот h_i полюсных элементов, но и их радиусов ρ_i целевая функция $f(\mathbf{h}, \mathbf{\rho})$, характеризующая однородность поля в рабочем объеме [12], становится многоэкстремальной, у нее появляются овраги и области типа «плато» (рис. 1). Следовательно, применяемые классические методы оптимизации не гарантируют в этих случаях нахождение глобального решения задачи.

В работе [12] для поиска оптимальных значений высот и радиусов цилиндрических полюсных элементов наконечников магнита предложено использовать оптимизацию роем частиц (PSO). Этот метод оптимизации не требует знания производных оптимизируемой функции, близости начального приближения к искомому решению, а также позволяет находить глобальное решение задачи оптимизации. В силу этих особенностей оптимизация роем частиц для магнитной системы, описанной в [6], позволила найти значения оптимальных параметров полюсных элементов, обеспечивающие в

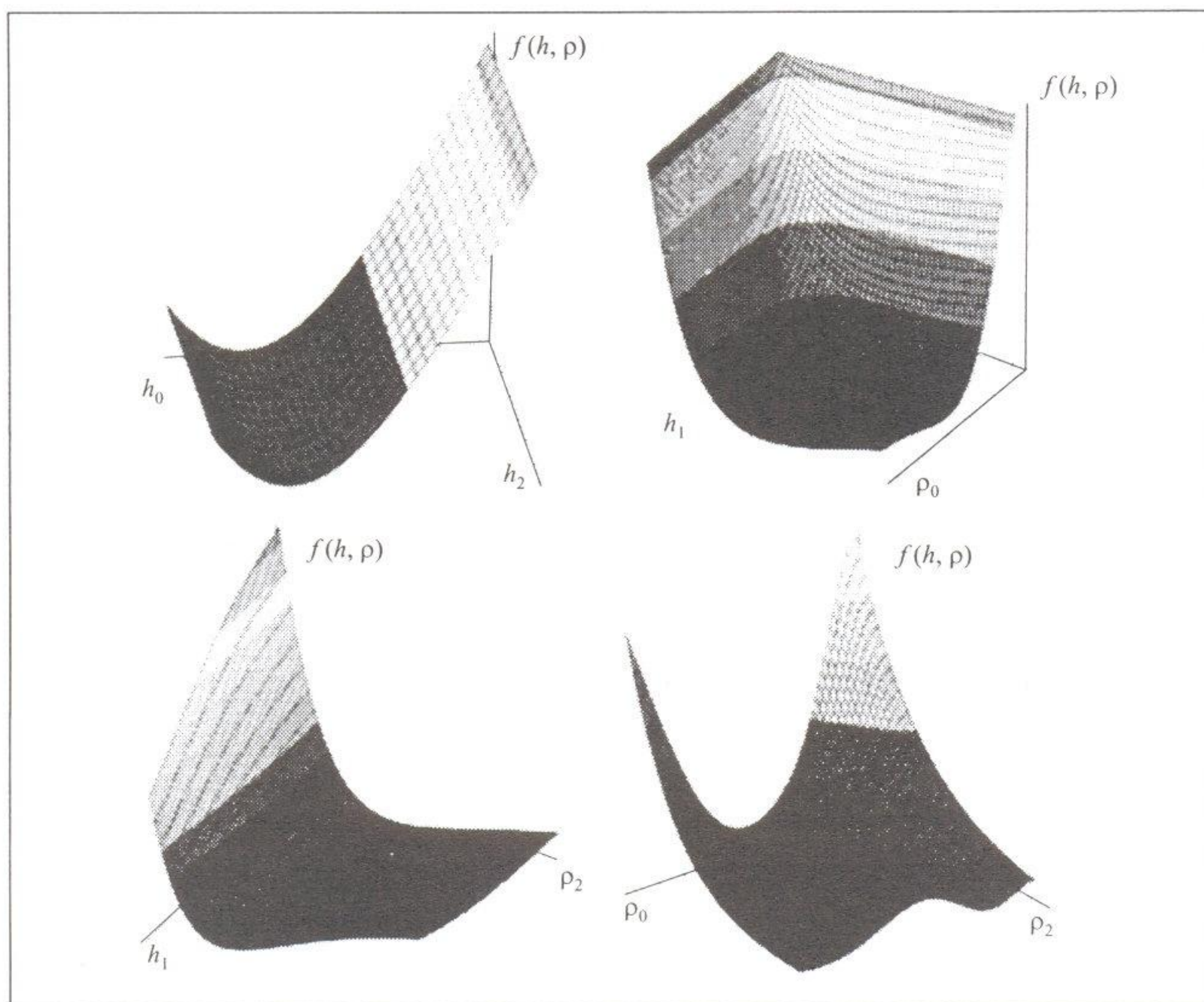


Рис. 1. Пространственные срезы оптимизируемой функции $f(\mathbf{h}, \boldsymbol{\rho})$ для полюсных наконечников с тремя цилиндрическими полюсными элементами

рабочем объеме значение однородности магнитного поля 20—30 ppm (при трех-четырех цилиндрических полюсных элементах), что в несколько раз превышает ранее найденные.

Рассмотрим метод оптимального синтеза формы поверхностей полюсов, состоящих из наборов конических ферромагнитных элементов, при условии их постоянной намагниченности, а следовательно, отсутствия ее зависимости от напряженности поля, обеспечивающей высокую однородность магнитного поля в межполюсном рабочем пространстве.

Пусть каждый конический полюсный элемент характеризуется двумя высотами, h_i и h_{i+1} , а также внутренним ρ_i и внешним ρ_{i+1} радиусами (рис. 2). При этом форма полюсных наконечников электромагнита однозначно описывается вектором параметров

$$\mathbf{X} = \{h_0, \rho_0, h_1, \rho_1, \dots, h_{2N-2}, \rho_{2N-2}, h_{2N-1}, \rho_{2N-1}\},$$

где N — число конических полюсных элементов.

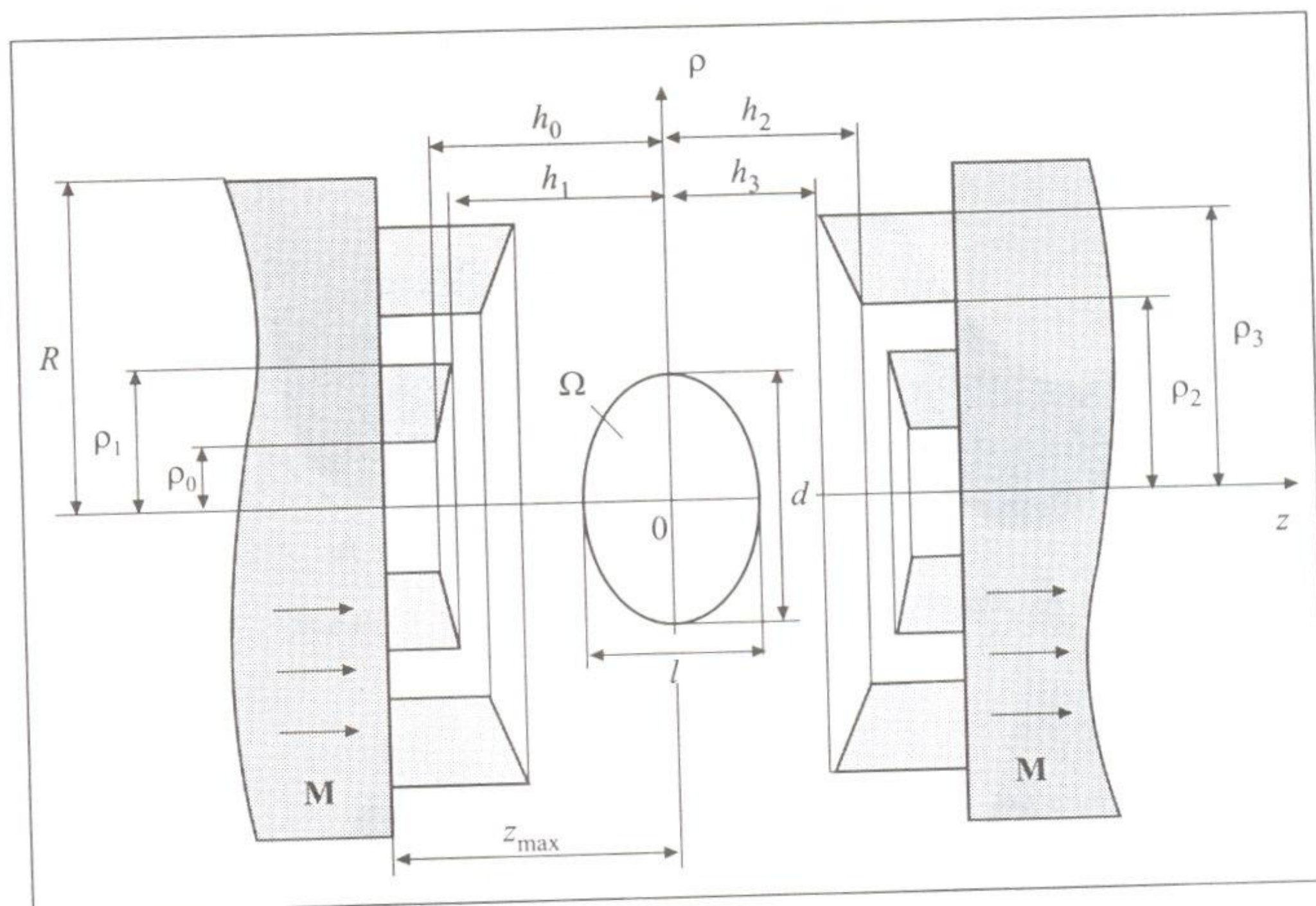


Рис. 2. Параметры полюсных конических элементов

Будем решать задачу, предполагая, что вектор намагниченности $\mathbf{M}$ не зависит от напряженности поля $\mathbf{H}$, является величиной постоянной и направлен вдоль оси вращения системы Oz . Поле внутри межполюсного пространства при данных допущениях можно рассчитать с использованием простого слоя магнитных зарядов, расположенных на поверхностях полюсных наконечников, по формуле

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=0}^{2N-1} \iint_{S_i} \frac{\sigma_i \cdot \mathbf{r}}{r^3} dS_i.$$

Здесь σ_i — плотность магнитных зарядов на поверхности i -го конусного элемента, $\sigma_i = (\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{M})$, где $\mathbf{n}_i$ — внешняя нормаль, проведенная к поверхности элемента; $\mathbf{r}$ — вектор, соединяющий точку на конической поверхности S_i с точкой внутри рабочей зоны Ω .

Таким образом, поверхность каждого полюсного элемента имеет свое значение поверхностного магнитного заряда, зависящее от угла между вектором намагниченности и нормалью к поверхности, при этом полюсные элементы левого полюсного наконечника имеют положительные значения магнитных зарядов, а правого — отрицательные.

Поверхность каждого i -го полюсного элемента удобно представить в следующем виде:

$$z_i(u) = h_{2i} + (h_{2i+1} - h_{2i})u,$$

$$\rho_i(u) = \rho_{2i} + (\rho_{2i+1} - \rho_{2i})u,$$

где $u \in [0; 1]$. Тогда компоненты напряженности магнитного поля, создаваемого конусными элементами обеих полюсов, могут быть вычислены по формулам

$$H_\rho(\rho, z) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{2N-1} \left[\sigma_i L_i \int_0^1 h_\rho(u) du \right],$$

$$H_z(\rho, z) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{2N-1} \left[\sigma_i L_i \int_0^1 h_z(u) du \right].$$

Здесь

$$h_\rho(u) = \Psi(u)(A(u) - B(u)),$$

$$h_z(u) = \Psi(u)C(u),$$

где

$$\Psi(u) = \frac{1}{[(\rho + \rho_i(u))^2 + (z - z_i(u))^2]^{3/2}},$$

$$A(u) = (\rho + \rho_i(u))\rho_i(u) \frac{E(k(u))}{1 - k^2(u)},$$

$$B(u) = 2\rho_i^2(u) \left[\frac{E(k(u))}{k^2(u)(1 - k^2(u))} - \frac{K(k(u))}{k^2(u)} \right],$$

$$C(u) = (z - z_i(u))\rho_i(u) \frac{E(k(u))}{1 - k^2(u)},$$

$$k(u) = \sqrt{\frac{4\rho\rho_i(u)}{(\rho + \rho_i(u))^2 + (z - z_i(u))^2}},$$

$L_i = \sqrt{(\rho_{2i+1} - \rho_{2i})^2 + (h_{2i+1} - h_{2i})^2}$ — длина образующей i -й конической поверхности; $E(k)$ и $K(k)$ — эллиптические интегралы I и II рода.

Рабочий объем магнитной системы Ω может иметь произвольную форму, например быть эллипсоидом вращения или цилиндром. Для данных рабочих объемов, в силу их аксиальной симметрии, однородность

магнитного поля достаточно обеспечить лишь в плоскости сечения, проходящей через ось симметрии Oz .

Для оценки однородности магнитного поля внутри рабочего объема регулярно расположены контрольные точки. При этом однородность поля в объеме можно оценить по формуле

$$\Delta = \frac{\max_k |\Delta H|}{H^{(0)}},$$

где $H^{(0)}$ — напряженность поля в центре рабочего объема системы; $\max_k |\Delta H|$ — наибольшее отклонение напряженности среди всех контрольных точек от ее значения в центре рабочего объема.

Для оптимизации формы полюсов удобно ввести в рассмотрение целевую функцию

$$f(\mathbf{h}, \mathbf{r}) = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} (H_z^{(k)} - H^{(0)})^2 + \sum_{k=0}^{K-1} (H_\rho^{(k)})^2}{(H^{(0)})^2},$$

где $H_z^{(k)}$ и $H_\rho^{(k)}$ — значения аксиальной и радиальной составляющих вектора напряженности в k -й контрольной точке рабочей области; K — число контрольных точек в рабочем объеме. Если важно не только создать высокооднородное магнитное поле, но и максимизировать значение его напряженности в центре системы, то в знаменателе целевой функции $f(\mathbf{h}, \mathbf{r})$ следует брать большую степень значения $H^{(0)}$.

Сформулируем задачу оптимизации. Требуется найти такие допустимые значения параметров конических полюсных элементов, при которых достигается глобальный оптимум целевой функции $f(\mathbf{h}, \mathbf{r}) \rightarrow \min$ при ограничениях $l/2 \leq h_i \leq z_{\max}$, $0 \leq \rho_0 \leq \rho_1 \leq \dots \leq \rho_{2N-1} \leq R$, обеспечивающих необходимый зазор между коническими элементами противоположных полюсов, а также непересекаемость радиусов соседних полюсных элементов.

Оптимизация предложенной целевой функции проводилась с помощью классического метода оптимизации роем частиц PSO [13, 14], который был модифицирован добавлением вещественных генетических операторов кроссовера и мутации, заимствованных из генетических алгоритмов. Использование эволюционирующего роя частиц позволило улучшить сходимость оптимизационного процесса и повысило вероятность нахождения глобального оптимума [15].

Для сравнения полученных результатов с достигнутыми ранее выберем размеры рабочего объема и ограничения на высоты и радиусы полюсных элементов такие же, как в работах [6, 12], а шаг между контрольными точками области Ω зададим равным 1 мм.

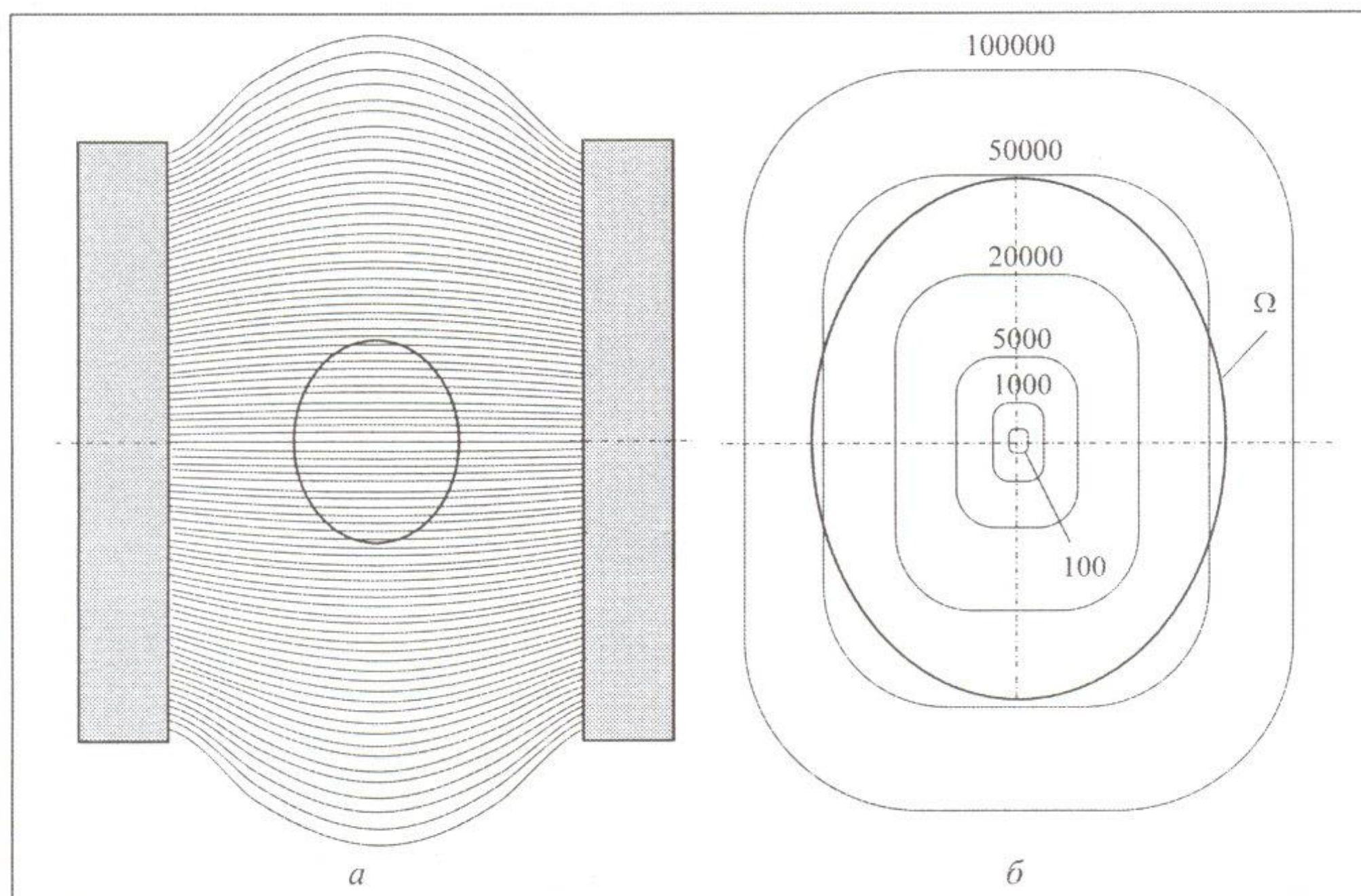


Рис. 3. Электромагнит с цилиндрическими параллельными полюсными элементами: *а* — картина распределения магнитного поля; *б* — изолинии однородности магнитного поля (ppm)

В случаях, когда параллельные полюсы максимально отдалены от рабочего объема и максимально приближены к нему, получены следующие значения однородности магнитного поля. При размерах полюсов $Z_{\max} = 150$ мм, $R = 230$ мм и размерах рабочего объема $l = 120$ мм, $d = 150$ мм значение Δ_z при $h_{\max}$ составляет 59166 ppm, а при $h = l/2$ — 28670 ppm, соответственно значение Δ_r при указанных параметрах h составляет 37978 ppm и 19552 ppm.

При максимальном отдалении полюсов значение однородности поля составляет 6 % для аксиальной и 4 % для радиальной составляющих напряженности поля, а поле в центре системы имеет значение $0,453722M$ А/м, где M — абсолютное значение намагниченности полюсов. Приближение полюсов почти вплотную к рабочему объему увеличивает напряженность поля в центре до $0,743645M$ А/м, но однородность в контрольной области увеличивается лишь в два раза.

На рис. 3 представлена картина распределения поля между параллельными цилиндрическими полюсами в случае $h = h_{\max}$. Как видим, поле в цилиндрических параллельных полюсах обладает высокой однородностью (менее 100 ppm) лишь в непосредственной близости к центру рабочего объема.

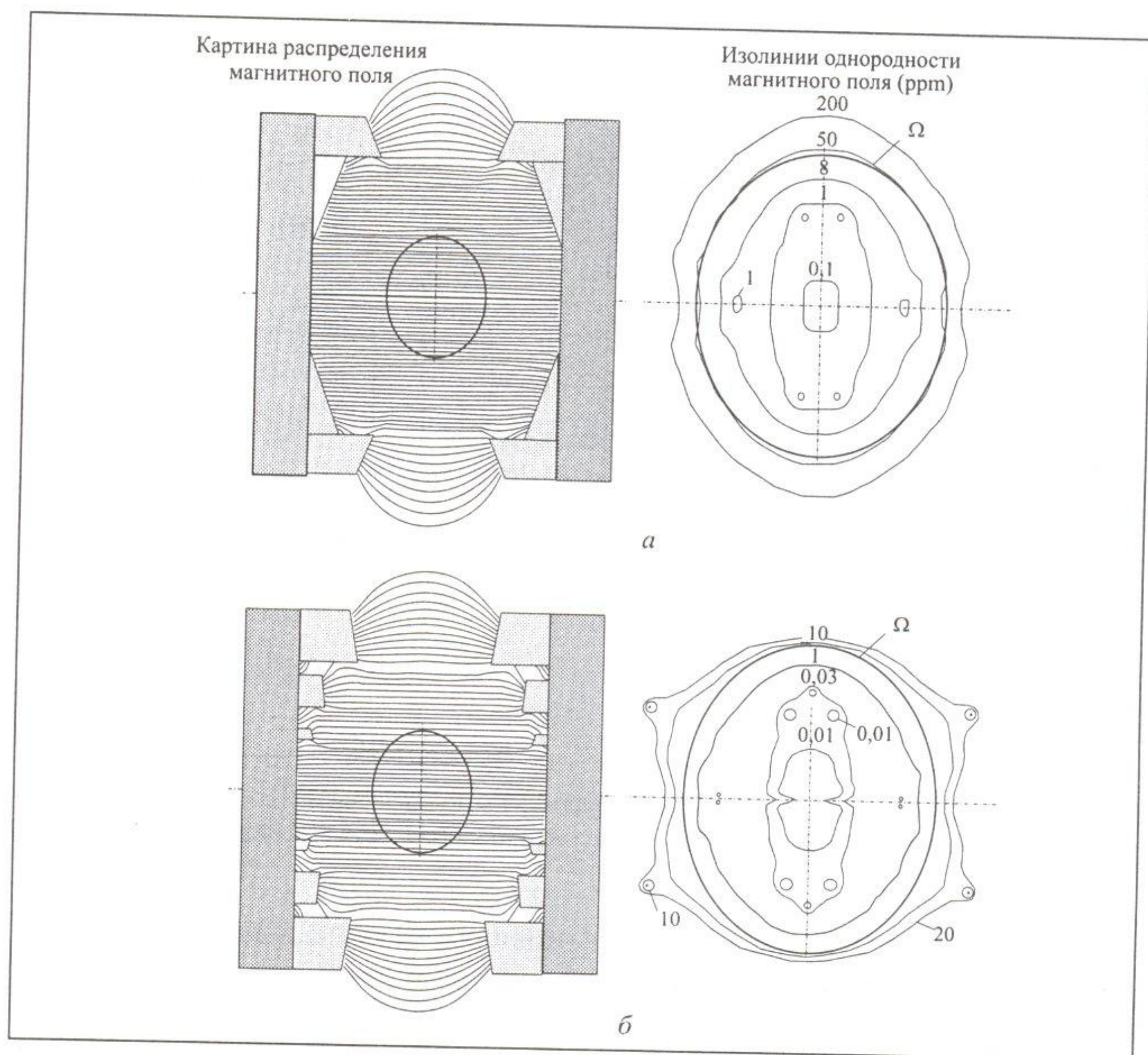


Рис. 4. Электромагнит с двумя (а) и тремя (б) коническими полюсными элементами

В таблице представлены результаты, полученные с помощью синтеза формы полюсных наконечников, содержащих по два и по три конических полюсных элемента. Приведенные значения высот h и радиусов r полюсных элементов обеспечивают создание в рабочем объеме с двумя коническими полюсными элементами поля с однородностью для аксиальных и радиальных компонент напряженности соответственно $\Delta_z = 0,0065 \%$ и $\Delta_p = 0,0048 \%$, а с тремя полюсными элементами — соответственно $\Delta_z = 6 \text{ ppm}$, $\Delta_p = 6 \text{ ppm}$.

Распределение поля для такой магнитной системы показано на рис. 4, а. Увеличение числа полюсных элементов от двух до трех позволяет добиться значительной однородности магнитного поля в рабочем объеме на уровне 6 ppm (см. таблицу и рис. 4, б).

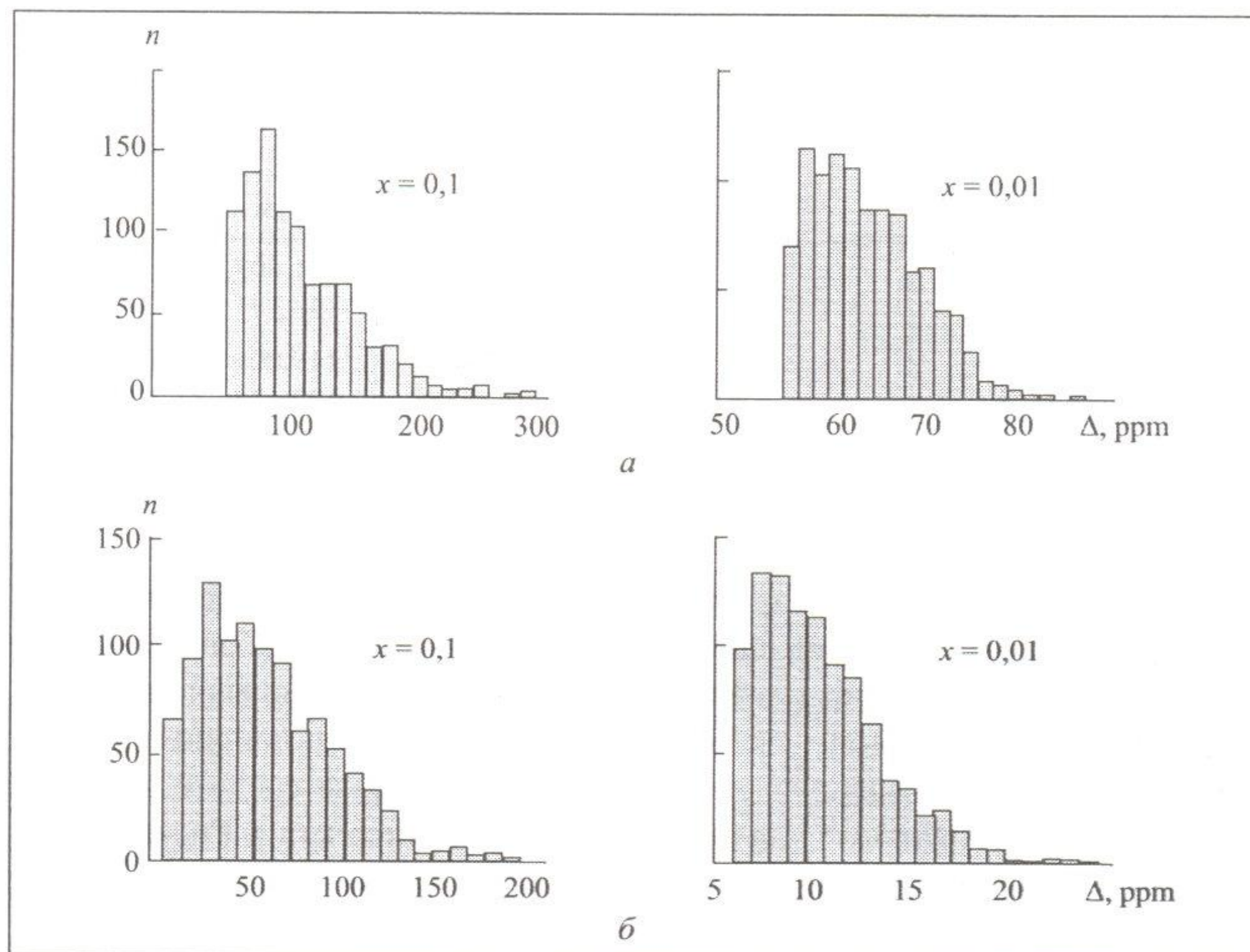


Рис. 5. Влияние погрешности изготовления полюсных элементов на однородность поля для электромагнита с двумя (а) и тремя (б) полюсными элементами

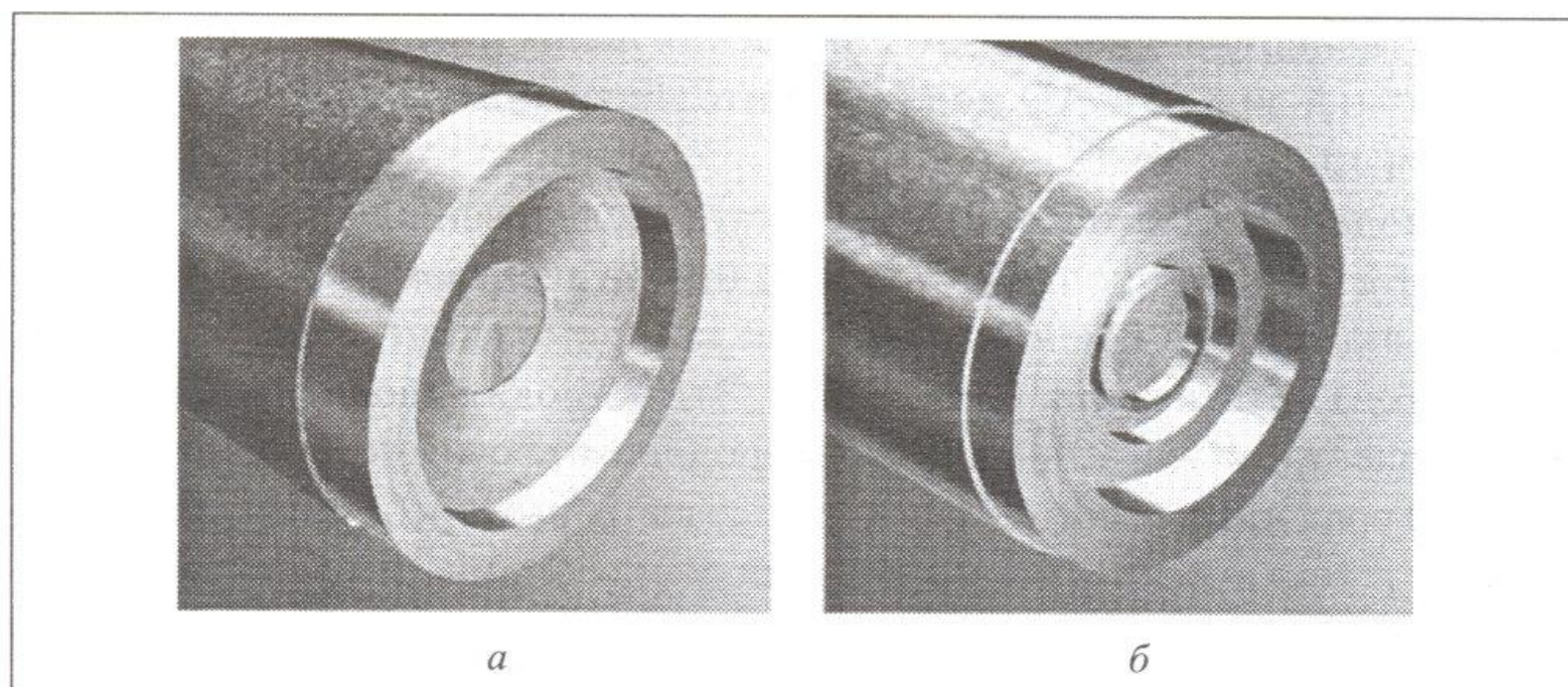


Рис. 6. 3D-CAD модели синтезированных полюсов электромагнита с двумя (а) и тремя (б) коническими элементами

Номер выступа	Параметры полюса					
	h	r	Два конических полюсных элемента		Три конических полюсных элемента	
			h , мм	r , мм	h , мм	r , мм
0	h_0	r_0	146,276	66,176	131,603	61,043
	h_1	r_1	110,490	170,821	134,571	73,378
1	h_2	r_2	68,843	170,821	119,006	100,509
	h_3	r_3	87,196	219,556	122,138	138,879
2	h_4	r_4			80,899	157,931
	h_5	r_5			90,967	222,250

Для того чтобы проанализировать влияние погрешностей изготовления полюсных элементов на однородность поля, найденные оптимальные значения параметров одновременно случайным образом подвергались возмущениям по нормальному закону со стандартными отклонениями 0,1 и 0,01 мм. На основе выборки объемом 1000 вычислены среднее значение однородности магнитного поля и его стандартное отклонение. Гистограммы влияния случайных отклонений в размерах полюсных элементов на однородность поля в рабочем объеме магнитной системы приведены на рис. 5.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что для получения высокооднородного магнитного поля полюсные элементы электромагнита должны быть изготовлены с точностью до 0,01 мм. При этом обеспечиваемые значения однородности поля составляют $\Delta = 65 \pm 5$ ppm и $\Delta = 10 \pm 3$ ppm соответственно для двух и трех конических полюсных элементов.

Внешний вид 3D-CAD моделей синтезированных полюсных наконечников показан на рис. 6.

Выводы. Разработанный в результате исследований метод оптимального синтеза формы полюсных наконечников электромагнита с коническими полюсными элементами основан на применении модифицированного метода оптимизации роом частиц. Это позволило добиться в рабочем объеме электромагнита значений однородности магнитного поля на уровне 6—10 ppm, что в значительной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к техническим устройствам подобного рода, и превосходит результаты, полученные ранее.

The use of the method for optimization by the particle swarm optimization technique under the search for the optimal form of the pole points has been considered to ensure high homogeneity of the magnetic field in the operation volume. The points are presented as a set of conical elements provided that they are permanently magnetized.

1. Ogle M. D., D'Angelo J. Design optimization method for a ferromagnetically self-shield MR magnet // IEEE Trans. Magn. . — 1991. — **27**, № 2. — P. 1689—1691.
2. Thompson M. R., Brown R. W., Srivastava V. C. An inverse approach to the design of MRI main magnets // IEEE Trans. Magn. — 1994. — **30**, № 1. — P. 108—112.
3. Xu Hao, Conolly S. M., Scott G. C., Macovski A. Homogeneous magnet design using linear programming // IEEE Trans. Magn. — 2000. — **36**, № 2. — P. 476—483.
4. Гальченко В. Я., Воробьев М. А. Использование генетических алгоритмов в структурном синтезе источников магнитных полей с заданными свойствами // Информационные технологии. — 2003. — № 7. — С. 7—12.
5. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей. — М. : Наука, 1964. — 348 с.
6. 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.
7. Соколов Д. Ю. Синтез высокооднородного поля постоянного магнита МР-томографа и задач реконструкции плотности объекта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики, оптики. — Санкт-Петербург, 2007. — 20 с.
8. Сизиков В. С., Соколов Д. Ю. О повышении однородности поля постоянного магнита МР-томографа // Изв. вузов. Приборостроение. — 2006. — **49**, № 12. — С. 32—38.
9. Subramaniam S., Arkadan A. A., Hoole S. R. Optimization of a magnetic pole face using linear constraints to avoid jagged contours // IEEE Trans. Magn. — 1994. — **30**, № 5. — P. 3455—3458.
10. Ryu J. S., Yao Y., Koh C. S., Kim D. S. Optimal shape design of 3-D nonlinear electromagnetic devices using parameterized design sensitivity analysis // IEEE Trans. Magn. — 2005. — **41**, № 5. — P. 1792—1795.
11. 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. — **42**, № 4. — P. 1351—1354.
12. Гальченко В. Я., Якимов А. Н., Остапущенко Д. Л. Параметрический синтез формы аксиально-симметричных полюсов электромагнита для создания однородного магнитного поля // Електротехніка і електромеханіка. — 2010. — № 2. — С. 33—36.
13. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proc. of the IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia). IEEE Service Center, Piscataway, NJ. — 1995. — 5 (3). — P. 1942—1948.
14. Clerc M. Particle swarm optimization. — USA. : ISTE Ltd., 2006. — 244 p.
15. 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.

Поступила 16.07.10;
после доработки 30.08.10

ГАЛЬЧЕНКО Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики Луганского государственного медицинского университета. В 1982 г. окончил Ворошиловградский машиностроительный ин-т. Область научных исследований — расчет и синтез магнитных и электромагнитных полей, неразрушающий контроль, приложение искусственного интеллекта, обработка сигналов и изображений.

ЯКИМОВ Александр Николаевич, преподаватель кафедры медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики Луганского государственного медицинского университета. В 2004 г. окончил Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, а в 2010 г. — Луганский национальный университет им. Т. Шевченко. Область научных исследований — задачи синтеза устройств для создания магнитных полей с заданными свойствами, математическое моделирование физических процессов и явлений.