

В. Я. Гальченко, д.т.н., профессор

e-mail: halchvl@gmail.com

Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченко, 460, Черкасы, 18006, Украина

ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Электромагнитные измерительные преобразователи в обязательном порядке содержат в своем составе полезадающие элементы конструкции, к числу которых относятся катушки с постоянным или переменным током, постоянные магниты, ферромагнитные или токопроводящие немагнитные элементы, предназначенные для формирования электромагнитного потока. Проектирование новых преобразователей является наиболее эффективным в случае его реализации на основе решения обратной задачи, когда в качестве исходных данных задается их желаемая характеристика, а результатом служит реализующая эту характеристику конструкция. Рассматриваются методы как параметрического синтеза в линейной и нелинейной постановке, так и структурно-параметрического синтеза различных преобразователей. Приводятся примеры синтеза датчика линейных перемещений, вихретоковых преобразователей, коэрцитиметра, эталонов магнитных единиц, мер магнитной индукции, источников постоянного и переменного магнитного поля, применяемых в составе устройств намагничивания-размагничивания.

Ключевые слова: электромагнитные измерительные преобразователи, оптимальный синтез, обратная задача, параметрический синтез, структурный синтез, метаэвристики, однокритериальная оптимизация, многокритериальная оптимизация.

Вступление. Электромагнитные измерительные преобразователи (ЭИП) нашли широкое применение в промышленности. Непрерывно растущая потребность в новых ЭИП, характеризующихся улучшенными техническими и метрологическими характеристиками, предопределяет необходимость проектирования все новых их образцов. Для решения этой проблемы приходится проводить многовариантные проектные расчеты, результатом которых является выбор одного из вариантов, обеспечивающего приемлемые характеристики. Такой подход хоть и можно считать приемлемым, но вряд ли можно назвать эффективным. Условимся в дальнейшем считать каждый из рассматриваемых при проектировании конструктивных вариантов ЭИП, характеризующихся различным набором полезобразующих элементов, среди которых катушки с постоянным или переменным током, постоянные магниты, ферромагнитные или токопроводящие немагнитные элементы, предназначенные для формирования электромагнитного потока, структурой ЭИП. Процесс проектирования образцов ЭИП может быть более совершенным в результате его реализации на основе решения так называемой об-

ратной задачи. В этом случае формулировка задачи состоит в задании в качестве исходных данных желаемых характеристик ЭИП, а результатом служит реализующая эти характеристики структура. Обратные задачи характеризуются значительными трудностями при их решении, что обусловлено существенной неустойчивостью их решения, и относятся к классу некорректно поставленных задач. Эта особенность предполагает использование специальных математических методов их решения, в основе которых лежит идея регуляризации. Особенно сложно поддаются решению нелинейные обратные задачи. При моделировании ЭИП достаточно редко удается избежать нелинейной постановки задачи. Это оказывается возможным только лишь в редких случаях, когда в состав структуры ЭИП не входят ферромагнитные элементы конструкции или в случае незначительных по величине магнитных полей, что позволяет не учитывать нелинейный характер зависимости индукции поля от напряженности и делает возможным решение задачи в линейном приближении. Если же приходится решать нелинейную задачу, то вычислительные затраты многократно возрастают и к сложностям ре-

шения некорректных задач еще дополнительно добавляются проблемы решения нелинейных задач электродинамики, в общем случае, в трехмерном пространстве, что само по себе не является тривиальным. Чаще всего задачи электродинамики решаются численно с применением методов конечных элементов, граничных и пространственных интегральных уравнений, что обусловлено современными требованиями к точности решения таких задач.

Цель данной работы – обобщение опыта проектирования новых образцов ЭИП с усовершенствованными техническими и метрологическими характеристиками как задачи оптимального синтеза структур на основе решения обратных задач электродинамики и демонстрация на примерах преимуществ данного подхода.

Теоретическая часть

1. Оптимальный параметрический синтез датчиков линейных перемещений

Первоначально рассмотрим задачу в *линейной постановке*. При проектировании ряда измерительных приборов для получения первичной информации широкое применение находят магнитные датчики линейных перемещений (ДЛП). Основными преимуществами таких датчиков являются высокая чувствительность, возможность построения датчиков с широким диапазоном измеряемой величины, возможность синтеза заданной функции преобразования. Конструкция магнитного функционального ДЛП представлена на рис. 1. Магнитное поле генерируется обмотками соленоидного источника магнитного поля (СИМП) с постоянным током 2, которые располагаются на немагнитном каркасе 1. Продольная составляющая напряженности магнитного поля регистрируется ферромультипликативным чувствительным элементом 3, который закреплен на подвижном штоке 4. Обмотки располагаются в ферромагнитном экране 5. На основе ДЛП может строиться ряд других датчиков, таких как датчики давления, уровня, положения и т.д., что обуславливает повышенный интерес к их проектированию. При конструировании ДЛП в обязательном порядке решается задача синтеза СИМП, которые обеспечивают требуемое распределение магнитного поля на оси и располагаются в экране из ферромагнитного материала с диаметром D_e и длиной l_e (см. рис. 1), причем метрологические характеристики и чувствительность ДЛП зависят от точности синтеза и

конфигурации аксиальной составляющей напряженности магнитного поля в рабочей зоне, а габариты датчика – от эффективности использования длины СИМП в качестве рабочей зоны. Функция преобразования ДЛП может быть линейной или принимать иной вид, что зависит от распределения осевой составляющей поля вдоль оси датчика. Рабочая зона проектируемого СИМП задается в виде ограниченного числа контрольных точек на отрезке оси (с, d) с указанием в них требуемой напряженности поля H_c .

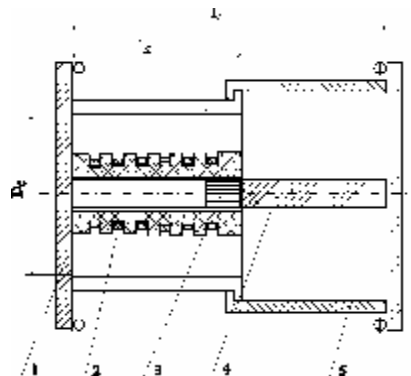


Рис. 1. Конструкция функционального магнитного ДЛП

Задача синтеза СИМП с заданным распределением напряженности поля на оси источника решается путем разбиения искомого источника на секции w_j на отрезке оси (a, b) и отыскания таких величин токов Iw_j в секциях, при которых среднеквадратичное отклонение действительного распределения поля в рабочей зоне от требуемого было бы минимальным. Дискретные источники поля могут включаться последовательно, встречно и/или согласно. Желательным представляется именно последовательное включение дискретных источников поля, так как в таком случае возможно питание СИМП от одного источника тока. Расстояние между секциями обмотки выбирается одинаковым, радиус секций обмоток также является постоянной величиной, что позволяет рассматривать линейную постановку задачи.

$$H_c(z) = \int_a^b K(z_j, z) w(z_j) dz_j,$$

$$a \leq z_j \leq b, \quad c \leq z \leq d$$

$$\int_c^d \left[\int_a^b K(z_j, z) w(z_j) dz_j - H_c(z) \right]^2 dz + \alpha \Omega,$$

где α – параметр регуляризации,

Ω – стабилизатор первого порядка.

Таким образом, задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода.

На втором этапе рассмотрим подобную задачу, но уже в *нелинейной постановке*. Интерес представляет поиск оптимальной конфигурации информационной катушки ДЛП в пространстве геометрических параметров катушки. Решением задачи параметрического синтеза СИМП является такая совокупность геометрических размеров, координат, определяющих взаимное расположение секций, величин тока и количества витков в секциях, т.е. интенсивности дискретных источников магнитного поля и их расположения в пространстве, при которых обеспечивается требуемое распределение напряженности магнитного поля в заданной области, как показано на рис. 2.

Некоторые из возможных конфигураций распределения поля на оси ДЛП иллюстрируются рис. 3. Точность решения задачи синтеза СИМП характеризуется величиной максимального относительного отклонения действительной величины напряженности магнитного поля в рабочей зоне от требуемой. В частном случае нелинейная задача синтеза СИМП с непрерывной круговой обмоткой, которая решается относительно, например, радиусов, описывается нелинейным интегральным уравнением 1-го рода с оператором Урысона:

$$\int_{\Omega} K[x, s, y(s)] ds = f(x), \quad x \in Q,$$

где $K(x, s, y(s))$ – ядро ИУ;

$f(x)$ – правая часть уравнения с областью определения Q ;

$y(s)$ – искомая функция с областью определения Ω .

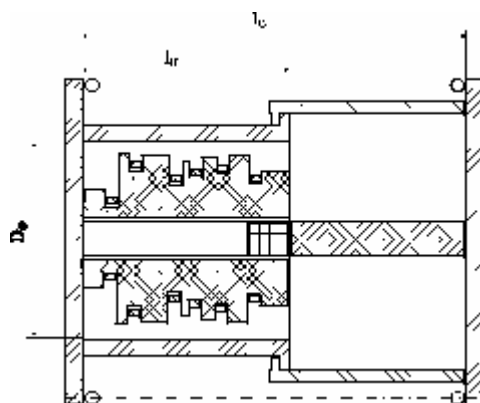


Рис. 2. Конструкция функционального ДЛП, для которого задача синтеза СИМП рассматривается в пространстве геометрических параметров катушки

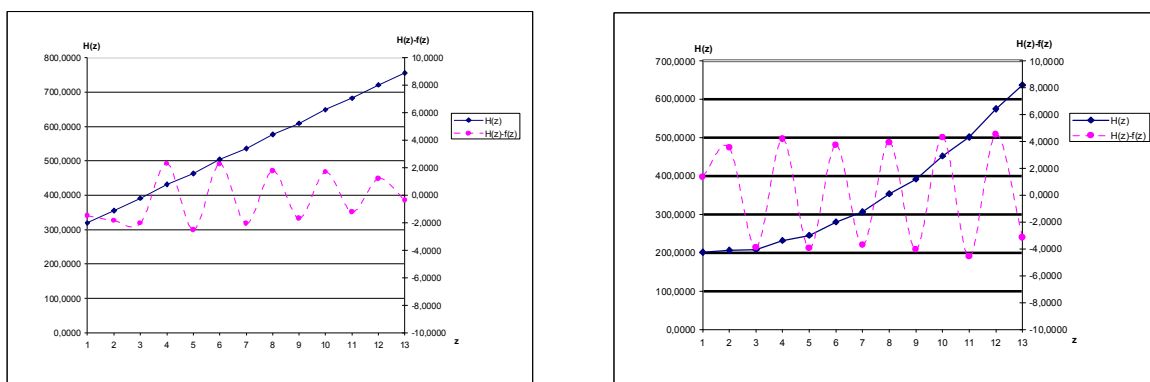


Рис. 3. Графики распределения информационного магнитного поля синтезированных катушек и абсолютного отклонения полученной напряженности поля от требуемой:

а) $H(z) = 20750 \cdot z + 300$, А/м

б) $H(z) = 10^6 \cdot (z - 10^{-3})^2 + 200$, А/м

Функция $K(x, s, y(s))$ представляет собой зависимость, по которой может быть рассчитана напряженность магнитного поля одной секции в заданной контрольной точке, $f(x)$ – требуемое значение напряженности магнитного поля в контрольной точке, $y(s)$ ассоциируется с искомыми параметрами СИМП, который обеспечивает заданную конфигурацию магнитного поля. Проблему синтеза СИМП предлагается рассматривать как задачу минимизации интегрального отклонения действительного распределения напряженности магнитного поля в контрольных точках от требуемого путем варьирования параметрами СИМП:

$$F = \sum_{i=1}^m |H(Q_i) - H(Q_i)_T|^\gamma \rightarrow \min,$$

где $H(Q_i)$ – действительное значение напряженности магнитного поля в i -й контрольной точке, $H(Q_i)_T$ – требуемое значение напряженности магнитного поля в i -й контрольной точке, m – число контрольных точек, в которых требуется обеспечение заданной напряженности поля, $\gamma = 8, 9, \dots$

2. Оптимальный параметрический синтез вихретоковых преобразователей

В вихретоковой дефектоскопии СИМП с рабочей зоной, расположенной в плоскости, перпендикулярной оси источника (рис. 4), находят применение в составе вихретоковых преобразователей (ВТП) с заданной конфигурацией зондирующего поля. Целью разработки и совершенствования методов синтеза та

ких ВТП является реализация в конструкциях ВТП новых технических возможностей, улучшение их эксплуатационных характеристик или повторение достигнутых в данном направлении результатов со значительными упрощениями конструкции. Использование указанных ВТП, в которых целенаправленное изменение конфигурации зондирующего поля в соответствии с заданными функциями распределения позволяет улучшить селективность и чувствительность преобразователей, повысить помехоустойчивость вследствие сужения зоны взаимодействия зондирующего поля с объектом, а также ограничения магнитных потоков рассеяния преобразователей, делает применение их достаточно перспективным. Конструктивные особенности структур ВТП представлены на рис. 4, где изображены ВТП с цилиндрической и радиальной генераторными катушками. Предлагается подход к синтезу СИМП, позволяющий решать задачу синтеза ВТП как в линейной постановке (варьированием параметрами I, ω), так и в нелинейной постановке (в пространстве переменных, определяющих геометрию генераторной катушки). Кроме того, предусмотрена возможность комбинирования указанных способов, т.е. выполнение поиска оптимального решения одновременным выбором геометрических параметров секций и их м.д.с. Выбор Z -координат секций может происходить как без ограничений, так и с условием, что некоторые секции сгруппированы и в обязательном порядке должны располагаться в одной плоскости.

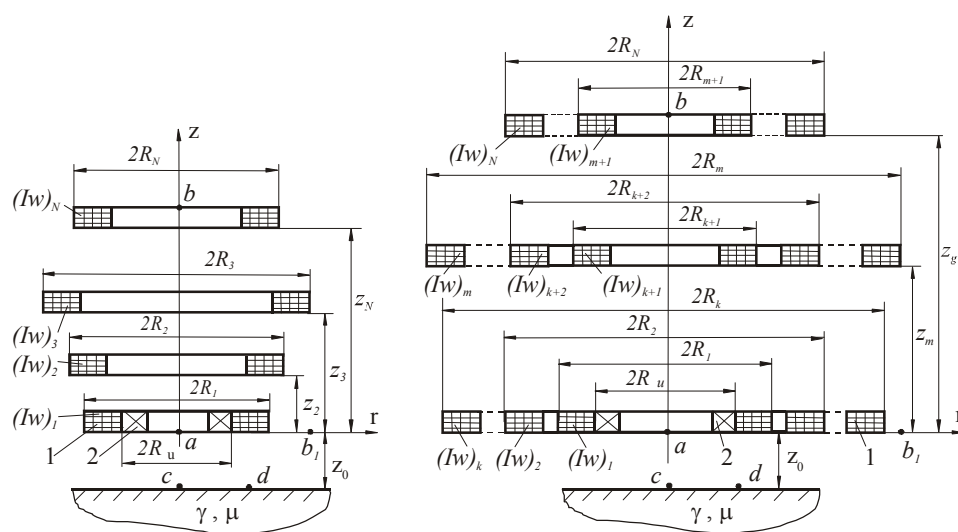


Рис. 4. Соленоидные источники магнитных полей накладных ВТП с рабочей зоной, расположенной в плоскости, перпендикулярной оси источника

Для решения задачи нелинейного параметрического синтеза СИМП с заданным распределением магнитного поля в области предложены специальные алгоритмы поиска оптимума в многомерной овражной ситуации. Основной идеей алгоритмов является организация покоординатного спуска вдоль ортогональных осей, соответствующих собственным векторам матрицы Гессе оптимизируемого функционала. Рассмотрена проблема учета ограничений на варьируемые параметры СИМП, вызванная необходимостью учета как простых ограничений для обеспечения требований к габаритам СИМП, так и специфических ограничений на взаимное расположение дискретных источников поля для выполнения условия их непересечения.

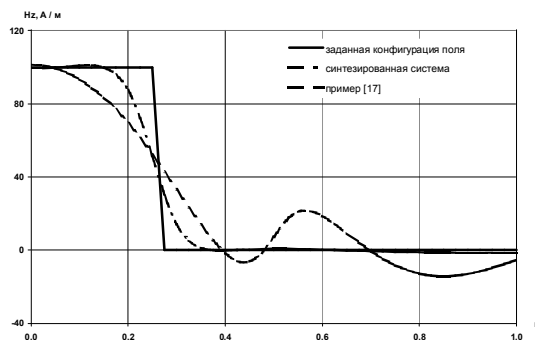


Рис. 5. Распределения зондирующих полей ВТП с П-образной формой в зоне контроля

Предложен модифицированный алгоритм покоординатного спуска с учетом ограничений на взаимное расположение секций СИМП с конечным поперечным сечением. Наибольший интерес вызывает магнитная система накладного ВТП с П-образной формой зондирующего поля в плоскости, параллельной рабочему торцу преобразователя (рис. 5).

3. Оптимальный структурно-параметрический синтез магнитных систем источников поля ЭИП

Исследуемые СИМП состоят из совокупности определенным образом расположенных в пространстве дискретных источников магнитных полей, которые в соответствии с принципом суперпозиции формируют некоторое распределение поля в рабочем объеме всей системы. Под дискретным источником магнитного поля понимается соленоидная секция — совокупность витков с током. В общем случае геометрическая форма секции

может быть произвольной. Магнитные системы могут быть как однородными по форме секций, так и смешанными (рис. 6). Интенсивность дискретного источника поля определяется числом витков и током, протекающим в нем. Подключенные последовательно секции магнитной системы питаются от единого источника тока. Дискретные переменные принято отождествлять со структурой магнитной системы, а непрерывные переменные — с параметрами рассматриваемой структуры. Следовательно, в качестве признаков структуры магнитной системы можно выделить число секций, их форму, направление намотки и число витков. Геометрические размеры и местоположение секций в пространстве являются параметрами структуры. Другими словами, магнитные системы, отличающиеся числом секций или их формой, а также характером подключения, имеют различную структуру, тогда как изменение расположения секций не является структурным преобразованием СИМП.

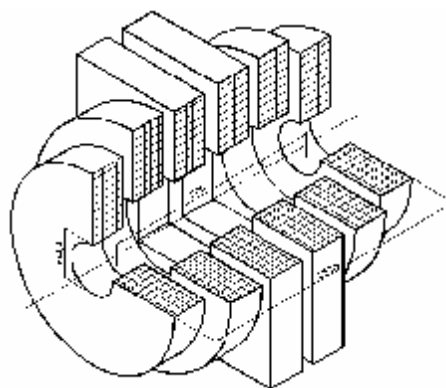


Рис. 6. Пример гетерогенной магнитной системы из шести секций

Концептуальная модель задачи оптимального структурного синтеза СИМП может быть сформулирована следующим образом. Необходимо найти оптимальную по сложности структуру магнитной системы, которая обеспечивала бы в пределах заранее обусловленной погрешности заданные пространственные свойства и физические параметры магнитного поля, создаваемого в рабочей области системы, а также соответствовала многочисленным конструктивным и иным требованиям: достижения особых размеров рабочей области; ограничений габаритных размеров системы; уменьшения потребляемой мощности и длины обмоточного провода и др. Опи-

санная задача оптимального структурного синтеза СИМП включает в себя несколько связанных между собой задач об определении: числа источников поля, их интенсивностей и геометрических форм, а также задачу нерегулярного размещения разнотипных источников. Таким образом, задача оптимального структурного синтеза является задачей глобальной векторной оптимизации, причем критерии отклонения поля и минимизации числа секций являются обязательными критериями, отражающими качество генерируемого в рабочей области СИМП поля и сложность системы. С математической точки зрения, рассматриваемая задача является многопараметрической многоэкстремальной задачей с ярко выраженной многосвязной невыпуклой областью поиска переменных размерности. Учитывая вышесказанное, становится очевидной целесообразность применения генетических алгоритмов для решения поставленной задачи. Генетические алгоритмы хорошо себя зарекомендовали как эффективные методы поиска для широкого класса задач оптимизации, не требующие дополнительной информации о характере исследуемой функции, которая может не иметь аналитического описания, ее свойствах (дифференцируемость, непрерывность и т.д.), не накладывающие ограничений на область поиска, которая может быть невыпуклой или многосвязной. Разработан метод и программное обеспечение оптимального структурного синтеза СИМП, базирующиеся на использовании генетического алгоритма, к отличительным особенностям которого относятся: модификации операторов генетического алгоритма, которые учитывают переменную длину представлений возможных решений в алгоритме; предложенная приблизительная оценка подобия решений, введение которой обусловлено невозможностью вычисления расстояния Хемминга для их представлений; использование принципа Парето-доминирования для работы с вектором критериев оптимальности.

4. Оптимальный параметрический синтез аксиально-симметричных источников магнитного поля ЭИП с ферромагнитными элементами конструкции

Наряду с безарматурными источниками магнитного поля (ИМП) в составе ЭИП ши-

рокое применение нашли также источники, содержащие ферромагнитные элементы конструкции. Значительную долю таких устройств составляют устройства с аксиально-симметричными магнитными системами (АСМС). Наличие магнитной арматуры в составе ИМП существенно повышает сложность их синтеза. При проектировании источников поля, содержащих ферромагнитные элементы (ФЭ), необходимо определить значения их конструктивных параметров, которые бы обеспечили требуемое распределение магнитного поля с учетом их намагничивания. В силу сложного характера зависимости между значениями искомых параметров и топографией создаваемого поля задача поиска их оптимальных значений обычно формулируется и решается как задача параметрического синтеза. Также к проектируемому ИМП предъявляется ряд дополнительных требований, связанных с минимизацией объема их ФЭ, потребляемой мощности, ограничениями на допустимые геометрические размеры их конструктивных элементов и др., т.е. данная задача формулируется как многокритериальная. Проектирование ИМП с использованием метода оптимального параметрического синтеза предполагает построение параметризованных моделей источников. В процессе проведения синтеза, изменяя численные значения конструктивных параметров источников, удается подобрать их оптимальные значения, при которых получаемая топография магнитного поля в рабочем объеме Ω (рис. 7) в наилучшей степени соответствует необходимому физически реализуемому распределению поля. Отметим, что конфигурация магнитного поля в Ω контролируется в ряде контрольных точек, которые могут регулярно или нерегулярно располагаться в рабочем объеме.

Введем в рассмотрение модель АС ИМП, в которой в качестве варьируемых величин используются в общем случае геометрические размеры ФЭ конструкции и первичных источников поля (ПИП), численные значения протекающих токов I , а также координаты взаимного расположения конструктивных элементов в пространстве (см. рис. 7). В качестве ПИП в общем случае выступают катушки с током и постоянные магниты. ПИП и ФЭ могут использоваться при построении ИМП в произвольном количестве.

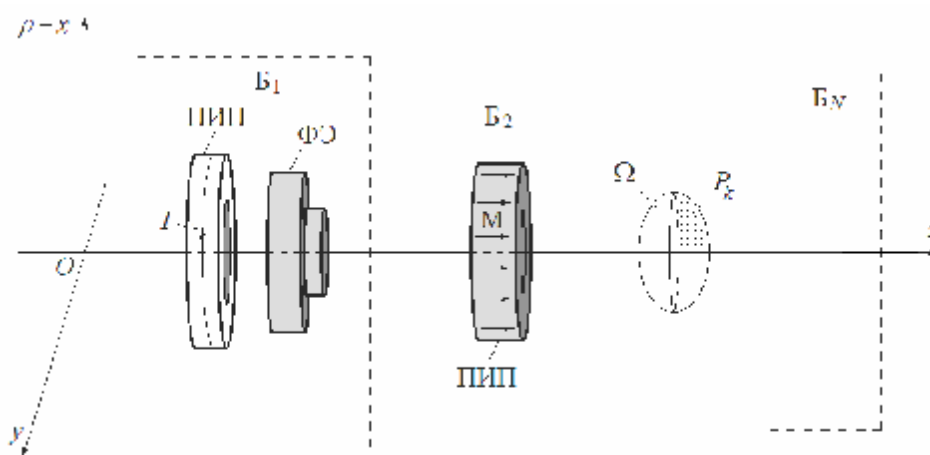


Рис. 7. Обобщенная схема аксиально-симметричных источников магнитного поля:
 $B_1, B_2, \dots, B_N$ – конструктивные блоки источника магнитного поля

Ферромагнитные элементы, входящие в состав ИМП, могут являться магнитопроводами, магнитными концентраторами, полюсными наконечниками, применение которых позволяет направленно изменять топографию поля, создаваемого ПИП. На практике на величины варьируемых параметров вводится ряд дополнительных ограничений, связанных с возможностью физической реализации ИМП. Эти ограничения могут быть связаны с требованиями к взаимной непересекаемости отдельных конструктивных элементов источников, допущениями о величине их минимальных и максимальных габаритов, предельным значением протекающих в катушках плотностей токов, не допускающим перегрев их обмоток. Для представления формы профиля МС предлагается ограничиться дискретизацией АС ИМП, при которой ФЭ представляются наборами цилиндрических или конических элементов. В рамках предложенной концепции решение задачи оптимального параметрического синтеза предполагает многократное повторение решения задачи расчета распределения поля в рабочем объеме при различных значениях конструктивных параметров магнитной системы. В оптимизационной постановке решение задачи оптимального параметрического синтеза ИМП предусматривает решение двух основных подзадач: эффективную реализацию метода расчета поля в рабочем объеме, а также разработку алгоритма многокритериальной оптимизации, позво-

ляющего находить оптимальные значения конструктивных параметров проектируемой магнитной системы с учетом ряда критериев. При этом высокой эффективности вычислительного процесса синтеза можно достичь при гармоничном сочетании алгоритмов расчета поля и оптимизации с учетом максимального числа специфических особенностей решаемой задачи. Для контроля получаемого распределения магнитного поля в рабочем объеме Ω вводится множество контрольных точек. В качестве погрешности синтеза магнитного поля заданной топографии принимается максимальное относительное отклонение напряженности поля в контрольных точках от требуемых значений. Требуемое значение напряженности магнитного поля может задаваться таблично или аналитически в виде некоторой функциональной зависимости. В основе метода синтеза применяется бионический алгоритм оптимизации, обеспечивающий возможность поиска глобального оптимума многоэкстремальных, многомерных овражных функций и функций, имеющих области типа «плато», являющихся характерными при решении задач данного типа, т.е. обратных задач в оптимизационной постановке. Значения целевых функций в рамках предложенного метода синтеза определяются алгоритмически, т.е. в результате численного расчета поля. В силу многоэкстремальности возникающих на практике оптимизируемых функций предложено в качестве основы такого алгоритма использо-

вать мультиагентные оптимизационные техники, обладающие глобальными поисковыми свойствами. Разработан гибридный бионический алгоритм оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава роя, позволяющий находить глобальное решение задачи параметрического синтеза. Гибридный алгоритм адаптирован для поиска Парето-оптимальных решений путем использования

рангов доминирования для каждого решения роя совместно с учетом приоритета каждого из частных критериев. Пример параметрического многокритериального синтеза коэрцитиметра с частично замкнутой магнитной системой и высокооднородным магнитным полем в рабочем объеме иллюстрируется рис. 8, 9.

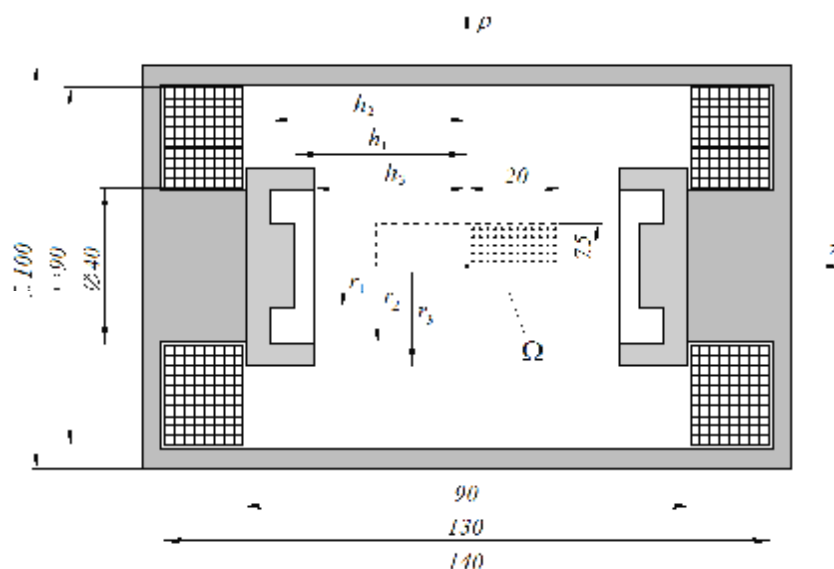


Рис. 8. Размеры и параметры синтезируемого коэрцитиметра с тремя полюсными элементами

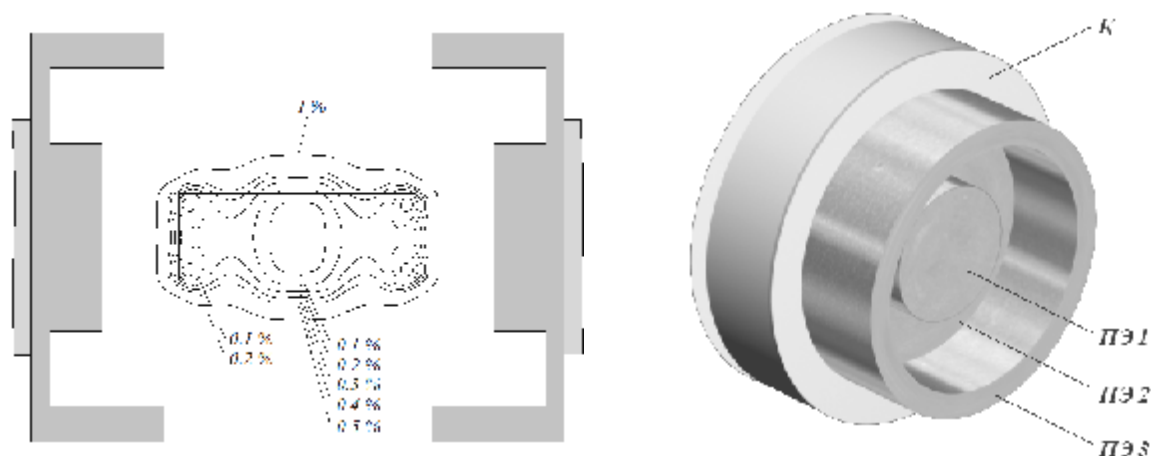


Рис. 9. Изолинии однородности поля в рабочем объеме коэрцитиметра и 3D-CAD модель полюсного наконечника магнитной системы коэрцитиметра:

K – катушка, ПЭ – полюсные элементы

Список литературы

- Galchenko V. Ya., Vorob'ev M. A. Structural synthesis of attachable eddy-current probes with a given distribution of the probing field in the test zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005. Vol. 41. No. 1. P. 29–33.
- Galchenko V. Ya., Yakimov A. N., Ostapushchenko D. L. Solution of the inverse problem of creating a uniform magnetic field in coercimeters with partially closed magnetic systems. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2011. Vol. 47. No. 5. P. 295–307.
- Galchenko V. Ya., Yakimov A. N., Ostapushchenko D. L. Pareto optimal parametric synthesis of axisymmetric magnetic systems with allowance for nonlinear properties of the ferromagnet. *Technical Physics*. 2012. Vol. 57. No. 7. P. 893–899.
- Galchenko V. Ya., Yakimov A. N. A turmitobionic method for the solution of magnetic defectometry problems in structural-parametric optimization formulation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. Vol. 50. No. 2. P. 59–71.
- Galchenko V. Ya., Yakimov A. N. Creating uniform magnetization in short cylindrical ferromagnetic samples. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. Vol. 50. No. 4. P. 198–204.
- Яковенко В. В., Гальченко В. Я., Донская Л. В. Синтез катушки в магнитной системе датчика линейных перемещений. *Электромеханика*. 1990. № 6. С. 75–78.
- 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.
- Гальченко В. Я., Якимов А. Н., Остапушенко Д. Л. Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции. *Информационные технологии*. 2010. № 10. С. 9–16.
- Гальченко В. Я., Якимов А. Н. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роем частиц: учеб. пособие. Черкассы: ФЛП Третьяков А. Н., 2015. 160 с.
- Galchenko, V. Ya., Vorob'ev, M. A. (2005) Structural synthesis of attachable eddy-current probes with a given distribution of the probing field in the test zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 41, No. 1, pp. 29–33.
- Galchenko V. Ya., Yakimov, A. N. Ostapushchenko, D. L. (2011) Solution of the inverse problem of creating a uniform magnetic field in coercimeters with partially closed magnetic systems. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 47, No 5, pp. 295–307.
- Galchenko, V. Ya., Yakimov, A. N. Ostapushchenko, D. L. (2012) Pareto optimal parametric synthesis of axisymmetric magnetic systems with allowance for nonlinear properties of the ferromagnet. *Technical Physics*, vol. 57, No. 7, pp. 893–899.
- Galchenko, V. Ya., Yakimov, A. N. (2014) A turmitobionic method for the solution of magnetic defectometry problems in structural-parametric optimization formulation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 50, No. 2, pp. 59–71.
- Galchenko, V. Ya. Yakimov, A. N. (2014) Creating uniform magnetization in short cylindrical ferromagnetic samples. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 50, No. 4, pp. 198–204.
- Yakovenko, V. V. Galchenko, V. Ya., Donskaia, L. V. (1990) Synthesis of a coil in the magnetic system of a linear displacement transducer. *Elektromekhanika*, No. 6, pp. 75–78 [in Russian].
- Halchenko, V. Ya., Vorob'ev, M. A. (2003) The use of genetic algorithms in the structural synthesis of sources of magnetic fields with prescribed properties. *Informatsionnyye tehnologiyi*, No. 7, pp. 7–12 [in Russian].
- Galchenko, V. Ya., Yakimov, A. N., Ostapushchenko, D. L. (2010) Search for a global optimum of functions using a hybrid of multi-agent swarm optimization with evolutionary composition of the population composition. *Informatsionnyye tehnologiyi*, No. 10, pp. 9–16 [in Russian].
- Galchenko, V. Ya., Yakymov, A. N. (2015) Population meta-heuristic algorithms for optimization by a swarm of particles. *Cherkassy: FLP Tretyakov A. N.* 160 p. [in Russian].

References

V. Ya. Galchenko, *Dr.Tech.Sc., professor*
e-mail: halchvl@gmail.com
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

OPTIMUM SYNTHESIS OF STRUCTURES OF ELECTROMAGNETIC MEASURING TRANSDUCERS

Electromagnetic measuring transducers necessarily contain in their structure field-setting elements of the structure, including coils with direct or alternating current, permanent magnets, ferromagnetic or current-carrying non-magnetic elements intended for the formation of electromagnetic flow. The design of new transducers is the most effective in the case of its implementation based on the solution of the inverse problem, when the desired characteristic is given as the initial data, and the design realizing this characteristic is the result. Methods of both parametric synthesis in linear and nonlinear formulation and structurally-parametrical synthesis of various converters are considered. Examples of the synthesis of a linear displacement transducer, eddy current converters, coercimeters, standards of magnetic units, magnetic induction measures, sources of a constant and alternating magnetic field, used in magnetization-demagnetization devices, are given.

Keywords: *electromagnetic measuring transducers, optimal synthesis, inverse problem, parametric synthesis, structural synthesis, metaheuristics, one-criterion optimization, multi-criteria optimization.*

Статтю представляє В. Я. Гальченко, д.т.н., професор.