

УДК 621.314.2: 681.14

СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ МАГНІТНИХ СИСТЕМ ПОЛЬОВИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ДАВАЧІВ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

© Володимир Гальченко, Михайло Воробйов, 2005

Луганський державний медичний університет,
кафедра медичної кібернетики, біофізики та медичної апаратури,
кв. 50-річчя оборони Луганська, 1, 91045, Луганськ, Україна

Запропоновано метод удосконалення магнітних давачів лінійних переміщень на основі структурного синтезу джерел інформаційного магнітного поля із заданим розподілом у просторі, розташованих в екрані з ферромагнітного матеріалу. Наведено приклади числового розв'язання задач синтезу давачів лінійних переміщень.

Предложен метод совершенствования магнитных датчиков линейных перемещений на основе структурного синтеза источников информационного магнитного поля с заданным распределением в пространстве, расположенных в экране из ферромагнитного материала. Приведены примеры численного решения задач синтеза датчиков линейных перемещений.

Method of linear movements sensor improvement is offered. Method is based on structural synthesis of informational magnetic field sources located in ferromagnetic screen with prescribed field distribution. The examples of numerical decisions of linear movements sensor synthesis problem are presented.

Електромагнітні давачі мають низку переваг [1–3], які зумовлюють їх широке застосування в сучасній техніці. Найпоширенішими пристроями такого типу є магнітні давачі лінійних переміщень (ДЛП). Концептуальною частиною принципу роботи магнітних ДЛП є використання магнітного поля із заданою конфігурацією у просторі як джерела інформації [1, 4, 5].

Конструкція ДЛП (рис. 1) складається з телескопічного ферромагнітного корпусу-екрана, у якому розташована соленоїдна багатоконтурна магнітна система, що намотана на немагнітному каркасі. На рухомому немагнітному штоку закріплено магніточутливий елемент (МЧЕ), який формує первинний сигнал перетворювача, вимірюючи подовжню складову поля, що генерується магнітною системою. Як МЧЕ можливе використання давачів Холла, магнітодіодів тощо.

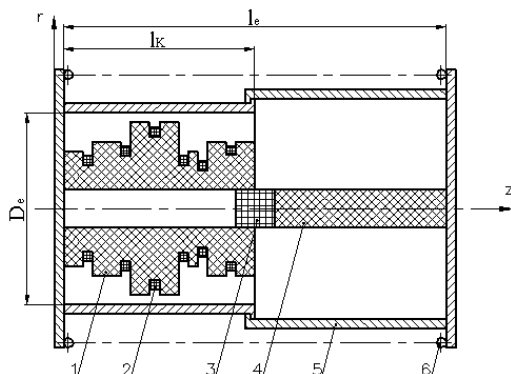


Рис. 1. Конструкція ДЛП:

1 – каркас, 2 – магнітна система, 3 – МЧЕ,
4 – шток, 5 – корпус, 6 – пружина

Отже, розподіл поля уздовж траєкторії переміщення МЧЕ визначає функціональну залежність сигналу від положення елемента, тобто функцію перетворення давача, як, наприклад, у [5]. Природно, що такі параметри магнітних давачів, як чутливість, габаритні розміри тощо значною мірою залежать від характеристик їхніх магнітних систем та полів, що генеруються ними. Крім того, існують обмеження, наприклад, щодо складності конструкції давача та його енергоспоживання, які в одних випадках залежно від призначення давача можуть виступати як рекомендації, а в інших – вимагати виконання конкретних жорстких умов.

Внаслідок зазначених особливостей під час розробки магнітних ДЛП особливу увагу необхідно приділяти проектуванню джерел магнітного поля із заданими властивостями. Цьому питанню присвячена доволі велика кількість робіт дослідників [6–13]. Підходи до синтезу магнітних систем, що запропоновані у цих роботах, є реалізацією методів параметричного синтезу, де оптимізація здійснювалась за допомогою варіювання струмами, звоями, координатами та геометричними розмірами контурів окремо або в різних комбінаціях. Однак за їх допомогою неможливо враховувати технологічні вимоги щодо складності конструкції давача, а головне – при їх використанні необхідно апріорі, не ґрунтуючись на об'єктивних оцінках, вибирати структури магнітної системи ДЛП, що призводить до непередбачених результатів і до необхідності, у разі невдачі, повторення вибору структури.

Внаслідок цього проектування джерела магнітного поля стає ітеративним процесом, який базується на евристичних прийомах. У випадку, що розглядається, структури магнітних систем ДЛП відрізняються між собою кількістю контурів, що входять до їх складу, і задача структурного синтезу полягає у визначенні системи з мінімальною кількістю контурів, і, отже, з найпростішою конструкцією, що забезпечує задані метрологічні характеристики давача.

Відповідно до наведених міркувань видається перспективною автоматизація вищезгаданого етапу проектування магнітних систем, тобто використання методів структурного синтезу. Один з таких підходів, який повністю розроблений і може бути застосований на практиці, описано у [14–16]. Відповідно до нього задача структурного синтезу формулюється як задача глобальної багатопараметричної оптимізації, у якій шуканими параметрами є структури магнітних систем, а для врахування всіх вимог до джерела інформаційного поля використовують вектор критеріїв оптимальності. Такі особливості задачі структурного синтезу як багатокритеріальність, змінна розмірність простору пошуку тощо унеможливають застосування стандартних методів оптимізації.

Підхід [14–16] базується на використанні генетичних алгоритмів (ГА), що добре себе зарекомен-

дували в задачах оптимального проектування. Особливості ГА, їх стохастична природа дають змогу будувати робастні й доволі ефективні алгоритми. Для роботи з вектором критеріїв класичний ГА був відповідно модифікований. Кількість критеріїв і їх зміст можуть бути різними залежно від вимог, які ставлять до магнітної системи. Зазвичай використовують такі критерії, як максимальне відносне відхилення напруженості магнітного поля від заданого, кількість контурів у системі, а також струм, що протікає в контурах, середня кількість звоїв у них, габаритні розміри тощо. Відповідно до особливостей символічної моделі, яка використовується в ГА, синтез магнітної системи здійснюється у два етапи: пошук оптимальної структури та її параметрів, а потім уточнення значень параметрів отриманої структури. Реалізація ГА, його параметри, символічна модель описані в [14 – 16].

Схема ГА, що використовується, відрізняється від традиційної схеми. Однією із головних відмінностей є послідовність реалізації основних генетичних операторів. Спочатку проходить стадія репродукції нових рішень, і лише після цього формується сукупність рішень для наступної ітерації із множини доступних на той час рішень. Включення принципу Парето домінування до оператора відбору уможливає розв'язання задач оптимального проектування у багатокритеріальній постановці.

ПОЧАТОК /* генетичний алгоритм */

сформуувати початкову сукупність рішень (популяцію);

ПОКИ НЕ виконана умова зупинки **ПОВТОРИТИ**

ПОЧАТОК

скопіювати поточну популяцію в проміжну популяцію;

ДЛЯ $i = 1$ до $i = \text{КІЛЬКІСТЬ_ШЛЮБНИХ_ПАР}$ **ПОВТОРИТИ**

ПОЧАТОК

вибрати шлюбну пару рішень (батьки) з поточної популяції за одним із правил:

панміксія, інбридінг або аутбридінг;

застосувати до вибраних рішень один з операторів схрещування: одно-

або двоточковий кросовер;

помістити два нові рішення (нащадки) у проміжну популяцію;

КІНЕЦЬ

ДЛЯ кожного рішення з поточної популяції **ПОВТОРИТИ**

ПОЧАТОК

застосувати з заданою ймовірністю один з операторів мутації: видалення

хромосоми, додавання хромосоми або точкова мутація;

помістити нове рішення в проміжну популяцію;

КІНЕЦЬ

застосувати оператор добору до проміжної популяції та одержати популяцію

нового покоління;

КІНЕЦЬ

КІНЕЦЬ

ПОЧАТОК /* оператор добору */

ДЛЯ кожного рішення з проміжної популяції **ПОВТОРИТИ**

ПОЧАТОК

обчислити ранг, що дорівнює кількості рішень, які домінують, це рішення за принципом Парето;

КІНЕЦЬ

відсортувати рішення відповідно до їх пристосованості (рангу): при однакових рангах рішення з меншим значенням узагальненого критерію є більш пристосованим;

ПОКИ є рішення з однаковими генотипами **I**, кількість рішень перевищує **РОЗМІР_ПОПУЛЯЦІЇ**

ПОВТОРИТИ

ПОЧАТОК

знайти, починаючи з гірших, два рішення з однаковими генотипами та вилучити менш пристосоване;

КІНЕЦЬ

ЯКЩО кількість рішень перевищує **РОЗМІР_ПОПУЛЯЦІЇ**

ТО відібрати найпристосованіший;

КІНЕЦЬ

У цій статті розглядається застосування для синтезу магнітної системи ДЛП-підходу, який запропоновано в [14–16]. Магнітна система являє собою набір коаксіально розташованих кругових контурів, що підключені послідовно. Вона описується вектором змінних за кількістю контурів, кожен компонент якого є параметрами відповідного контуру: напрямок намотування, кількість зwoїв, z -координата і радіус. Параметри контурів повинні задовольняти обмеження, які відображають вимоги до системи, що проектується:

$$I_{w_i} < I_{w_{MAX}}; \quad R_{u_i} < R_i < R_e; \quad 0 < Z_i < l_K,$$

де R_{u_i} , R_e , l – радіус штока, радіус екрана і довжина котушки джерела інформаційного поля; I_{w_i} , R_i , Z_i – МРС, радіус і z -координата i -го контуру.

Необхідний розподіл магнітного поля джерела задається сукупністю координат розташованих на осі контрольних точок, у яких значення напруженості поля або обчислюється за допомогою конкретної функціональної залежності, або регламентується для кожної точки окремо.

Поздовжня складова напруженості магнітного поля кругового контуру у феромагнітному екрані на осі системи z дорівнює [17]:

$$H_Z(z) = 2l_e^{-1} I_w \times \left[0,5 + R_K \sum_{n=1}^{\infty} \gamma \cos(\gamma(z-l_e)) \cos(\gamma(Z_K-l_e)) m_Z \right];$$

$$m_Z = K_1(\gamma R_K) + \frac{I_1(\gamma R_K) K_0(\gamma r_e)}{I_0(\gamma r_e)}; \quad \gamma = \frac{n\pi}{l_e},$$

де I_w , R_K , Z_K – МРС, радіус і z -координата контуру; r_e , l_e – радіус і довжина екрана; I_0 , K_0 , I_1 , K_1 – модифіковані функції Бесселя нульового та першого порядків.

Для підсумовування нескінченного ряду Фур'є використовують найпростішу регуляризацию підсумовування за кількістю членів [18]. Оцінка амплітуд гармонік поля обчислюється за формулою:

$$|A_m| \leq \varepsilon,$$

де A_m – амплітуда поточної гармоніки; ε – похибка обчислення амплітуди гармоніки. Величину ε вибирають, враховуючи необхідну точність обчислень, і зазвичай вона становить $\sim 10^{-6} - 10^{-7}$.

Відповідно до конструкції ДЛП довжина екрана є змінною і залежить від положення МЧЕ:

$$l_e = z + L_e - l_K,$$

де z , L_e – поточна координата МЧЕ і максимальна довжина екрана.

Важливою характеристикою джерела магнітного поля є відношення довжини робочої зони джерела до його довжини. Чим більша ця величина, тим ширший діапазон вимірюваної величини і менші габаритні розміри давача. Вибираючи відповідно координати контрольних точок, можна задавати необхідне співвідношення “робоча зона / довжина джерела” (“РЗ / ДД”).

Для ілюстрації застосування підходу, що розглядається, далі наведено приклади синтезу магнітних систем функціональних давачів лінійних перетворень з лінійною і параболічною функціями перетворення. Для обох прикладів геометричні параметри

давача були однакові: $R_{ш} = 0.002 \text{ м}$, $R_e = 0.0055 \text{ м}$, $L_e = 0.044 \text{ м}$, $l_K = 0.022 \text{ м}$. У першому прикладі функція розподілу напруженості магнітного поля має вигляд $H(z) = 20750 \cdot z + 300 \text{ А/м}$, у другому – $H(z) = 10^6 \cdot z^2 + 200 \text{ А/м}$. Чутливість давачів визначається коефіцієнтами функціональних залежностей. У кожному прикладі проектувалися дві системи зі співвідношенням “РЗ / ДД”, що дорівнює 0.8 і 0.9 і діапазоном вимірюваної величини давача 0.18 мм і 0.20 мм відповідно. Необхідне співвідношення задавалося за допомогою координат контрольних точок: у першому випадку точки розташовувалися на відрізку $[0.002; 0.02] \text{ м}$, у другому – $[0.001; 0.021] \text{ м}$. Кількість

точок дорівнювала 41, відстань між ними становила не більше ніж $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Результати синтезу наведені у табл. 1–4. Струми, що протікають у контурах, і максимальні відносні відхилення напруженості магнітного поля наведені у табл. 5.

Цікаво, що кількість контурів другої магнітної системи (табл. 2) менша, ніж першої (табл. 1), навіть при більшій довжині робочої зони. Однак це, що цілком логічно, відбулося за рахунок збільшення струму і похибки синтезу інформаційного поля. Аналогічно, більша, ніж в інших, кількість контурів четвертої системи (табл. 4) дала б змогу досягти такої самої похибки, як і в третій (табл. 3), але при меншому струмі

Таблиця 1

Параметри контурів магнітної системи ДЛП із лінійною функцією перетворення і співвідношенням “РЗ / ДД” = 0.8

№	Напрямок намотування	Кількість звоїв	Координата	Радіус
1	За стрілкою годинника	13	0.0212	0.0035
2		16	0.0130	0.0047
3		14	0.0096	0.0048
4		9	0.0022	0.0041
5		9	0.0206	0.0052
6		8	0.0166	0.0054
7		15	0.0059	0.0053
8		13	0.0216	0.0054
9		15	0.0169	0.0049

Таблиця 2

Параметри контурів магнітної системи ДЛП із лінійною функцією перетворення і співвідношенням “РЗ / ДД” = 0.9

№	Напрямок намотування	Кількість звоїв	Координата	Радіус
1	За стрілкою годинника	10	0.0126	0.0053
2		5	0.0162	0.0042
3		5	0.0088	0.0040
4		3	0.0019	0.0036
5		7	0.0052	0.0048
6		9	0.0186	0.0052
7		13	0.0219	0.0038

Таблиця 3

**Параметри контурів магнітної системи ДЛП із параболічною функцією перетворення
і співвідношенням “РЗ / ДД” = 0.8**

№	Напрямок намотування	Кількість звоїв	Координата	Радіус
1	За стрілкою годинника	4	0.0077	0.0049
2		3	0.0093	0.0037
3		16	0.0211	0.0041
4		9	0.0209	0.0035
5		12	0.0128	0.0054
6		6	0.0049	0.0054
7		15	0.0170	0.0048
8		4	0.0016	0.0043

Таблиця 4

**Параметри контурів магнітної системи ДЛП із параболічною функцією перетворення
і співвідношенням “РЗ / ДД” = 0.9**

№	Напрямок намотування	Кількість звоїв	Координата	Радіус
1	За стрілкою годинника	13	0.0219	0.0020
2		11	0.0198	0.0041
3		15	0.0153	0.0048
4		16	0.0200	0.0042
5		8	0.0111	0.0042
6		8	0.0197	0.0047
7		8	0.0138	0.0054
8		3	0.0013	0.0026
9		2	0.0170	0.0024
10		11	0.0082	0.0051
11		11	0.0041	0.0049

Таблиця 5

Результуючі характеристики магнітних систем

Характеристики	Приклад 1		Приклад 2	
	“РЗ / ДД” = 0.8	“РЗ / ДД” = 0.9	“РЗ / ДД” = 0.8	“РЗ / ДД” = 0.9
I, A	0.1202	0.2648	0.1339	0.0878
$\varepsilon_{max}, \%$	0.4191	0.6129	0.4936	0.4830

На рис. 2 і 3 наведено розподіли відносних відхилень напруженості магнітного поля синтезованих систем. Координати контрольних точок показано на

графіках у безрозмірних відносних одиницях, що одержані відношенням координати точки до довжини робочої зони.

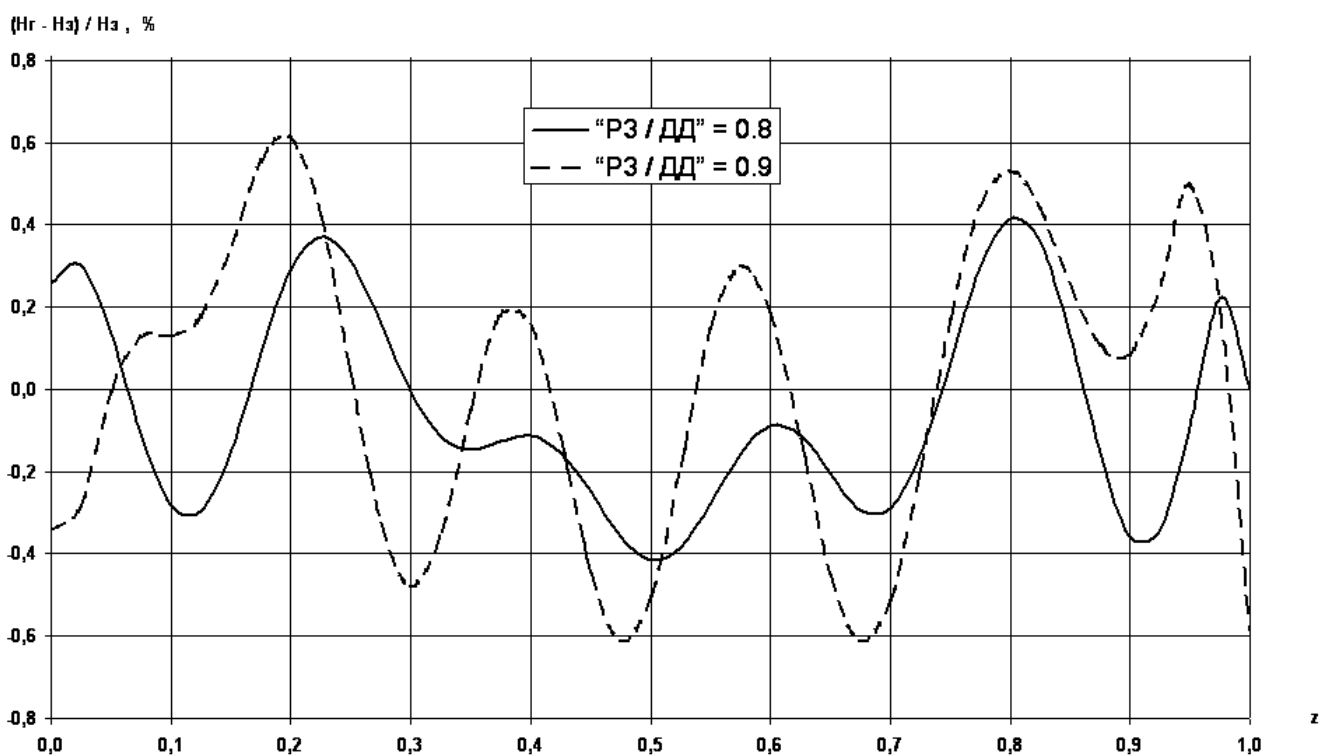


Рис. 2. Розподіл відносних відхилень напруженості магнітного поля уздовж довжини робочої зони ДЛП із лінійною функцією перетворення

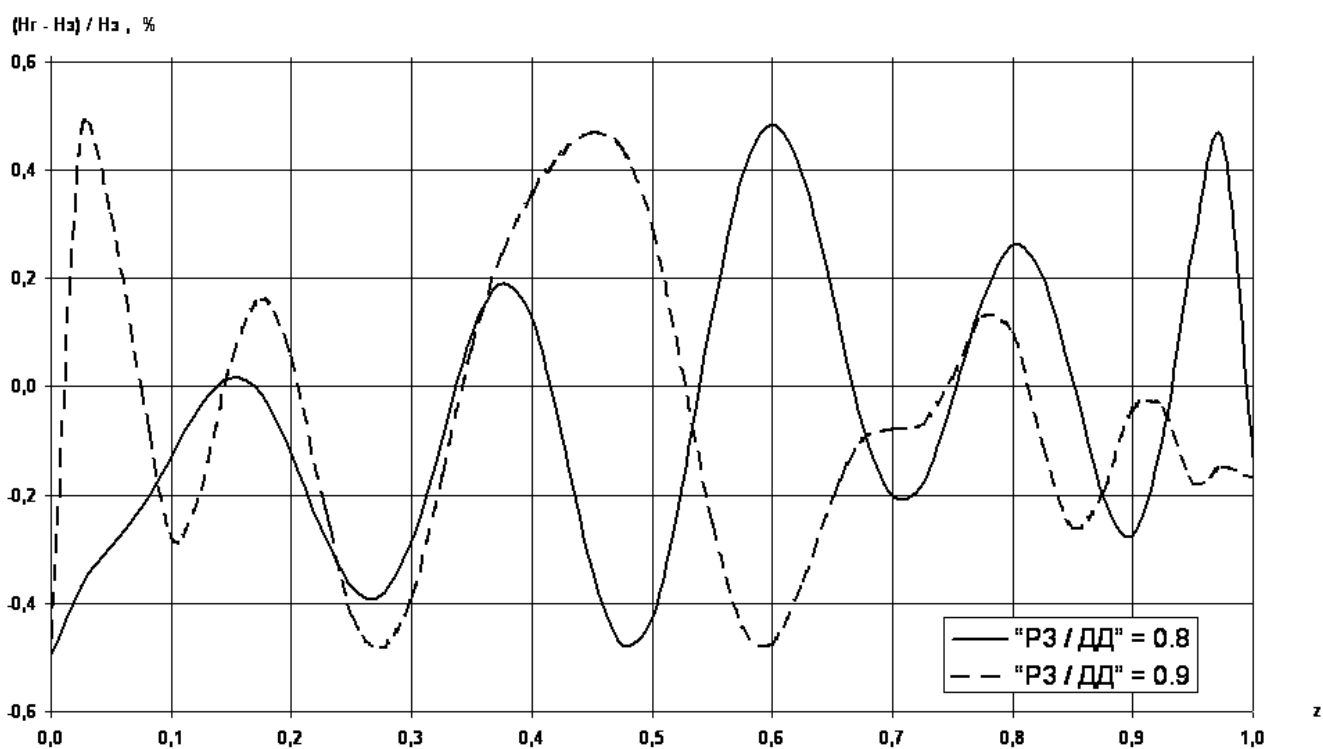


Рис. 3. Розподіл відносних відхилень напруженості магнітного поля уздовж довжини робочої зони ДЛП із параболічною функцією перетворення

Отже, методика синтезу ДЛП, що запропонована, дає змогу проектувати малогабаритні функціональні давачі з довільно заданою функцією перетворення, які характеризуються високими показниками використання довжини джерела інформаційного магнітного поля.

Описаний метод структурного синтезу джерел магнітного поля може бути також успішно застосований і для проектування інших технічних пристроїв, до складу яких входять соленоїдальні магнітні системи з наперед заданою у просторі робочою зоною, наприклад: вихорострумові перетворювачі, коерцитиметри для магнітних випробувань розімкнутих зразків, магнітні лінзи тощо.

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. – М., 1965. 2. Зарипов М.Ф., Ураксеев М.А. Функциональные преобразователи перемещения. – М., 1976. 3. Колюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. – М., 1987. 4. Датчики и методы повышения их точности / А.В. Быценко, В.В. Яковенко, И.М. Сагайда и др. – К, 1989. 5. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Лойко А.В. Миниатюрный датчик линейных перемещений // Изв. вузов. Приборостроение. – 1990. – № 5. – С. 33–38. 6. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Донская Л.В. Синтез катушки в магнитной системе датчика линейных перемещений // Изв. вузов. Электромеханика. – 1990. – № 6. – С. 75–78. 7. Стадник И.П. Метод последовательных приближений для линейных интегральных уравнений первого рода и его применение к решению задач синтеза магнитных полей. Часть 1. // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 6. –

С. 601–606. 8. Adamiak K. Wariacyjne metody syntezy pola magnetycznego na osi solenoidu walcowego // Arch. Elektrotechniki. – 1981. – Т. 30. – З. 4. – С. 1023–1030. 9. Lugansky L.B. On optimal synthesis of magnetic fields // Meas. Sci. Technol. – 1990. – V. 1. – № 1. – P. 53–58. 10. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Бондаренко В.Е. Синтез магнитных систем с дискретными источниками поля // Изв. вузов. Электромеханика. – 1991. – № 8. – С. 16. 11. Гальченко В.Я., Павлов А.К. Параметрический нелинейный синтез круговых и прямоугольных многоконтурных систем источников магнитных полей // Український метрологічний журнал. – 2002. – Вип. 1. – С. 25–30. 12. Павлов А. К., Гальченко В.Я. Информационные модели для проектирования источников магнитных полей // Информационные технологии. – 2002. – № 7. – С. 47–53. 13. Павлов О.К., Гальченко В.Я. Нелинейный синтез функциональных давачів лінійних переміщень // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – Вип. 61. – С. 96–100. 14. Гальченко В.Я., Воробьев М.А. Структурный синтез мер магнитной индукции с заданными свойствами // Український метрологічний журнал. – 2003. – Вип. 1. – С. 16–21. 15. 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. 16. Воробьев М.А. Интеллектуальная система компьютерного проектирования соленоидальных многосекционных источников магнитных полей с заданным распределением поля в объеме пространства // Искусственный интеллект. – 2004. – № 1. – С. 144–152. 17. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. – М. 1983. 18. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М. 1978.