

СИНТЕЗ РАДІО-ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ ПРИ ЗАДАНИХ ОБМЕЖЕННЯХ НА ВИХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЗА УМОВ ЗАДАНИХ ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ

В статті поставлено та розв'язано задачу синтезу радіо-електронних кіл при заданих обмеженнях на вихідні характеристики та за умов заданих допусків на параметри елементів. Запропоновано перетворення поставленої задачі до оптимізаційної з метою знаходження хоча б одного її розв'язку. Також розглянуті на прикладі два алгоритми розв'язування оптимізаційної задачі із процедурами випадкового пошуку.

Ключові слова: задача синтезу, обмеження на характеристики, допуски на параметри елементів, ISNAP, метод випадкового пошуку, радіо-електронне коло (РЕК).

P.H. STAKHIV, M.P. DYVAK, S.YA. KREPYCH

National University "Polytechnic of Lviv"
Ternopil National Economic University

SYNTHESIS RADIO-ELECTRONIC CIRCUITS BY THE SPECIFIED RESTRICTIONS ON BASELINE CHARACTERISTICS AND BY CONDITIONS OF SPECIFIED TOLERANCES ON THE PARAMETERS OF THE ELEMENTS

The article is established and solved task of synthesis of radio-electronic circuits with given constraints on the output characteristics and the conditions of setted tolerance on the parameters of the elements. Was suggested a transformation of the task to an optimization in order to find at least one of its solutions. Also were considered on the example two algorithms for solving of optimization task with with procedure random search.

Keywords: synthesis problem, restrictions on specifications, tolerances on the parameters of the elements, ISNAP, the method of random search, Radio-electronic round (REC).

Вступ

При проектуванні та дослідженні радіо-електронних кіл (РЕК) доводиться розв'язувати як задачі аналізу так і задачі синтезу. Задача аналізу – визначення характеристик РЕК за відомою схемою і параметрами елементів, а задача синтезу – визначення схеми та параметрів РЕК за заданими його характеристиками [1].

У традиційній постановці задачу синтезу РЕК математично формулюють як оптимізаційну задачу, в якій цільова функція включає вимоги до характеристик синтезованого пристрою [2]. Однак достатньо часто розв'язок задачі синтезу як нелінійної оптимізаційної задачі не може бути імплементований в практичній реалізації. За цих умов доцільно функцію мети задачі синтезу будувати виходячи із заданих обмежень на значення вихідних характеристик. У такій постановці задачі можна розв'язувати методом аналізу інтервальних даних [3].

Разом з тим, при розв'язуванні задачі синтезу з одночасним забезпеченням функціональної придатності РЕК необхідно обчислити параметри елементів РЕК у такий спосіб, щоб з врахуванням їх відхилень, які задаються допусками, забезпечити функціональну придатність РЕК [4]. Зазначені задачі мають надзвичайну практичну цінність. На сьогоднішній день такі задачі не тільки не розв'язувались, але і відсутні їх постановки в літературі в силу надзвичайно великої обчислювальної складності.

Зважаючи на вище зазначене, актуальною є задача синтезу РЕК за умов відомого схемо-технічного рішення, заданих обмежень на значення вихідних характеристик та одночасно заданих допусків на параметри РЕК.

Постановка задачі

Спочатку розглянемо постановку задачі синтезу РЕК із врахуванням обмежень на їх характеристики, які переважно є нелінійними за параметрами [5].

Характеристиками РЕК можуть бути коефіцієнти підсилення та згасання на певній частоті, струми та напруги на ділянках кола тощо. У такому випадку кожна i -та характеристика y_i РЕК є функцією параметрів $\vec{b} = (b_1, \dots, b_j, \dots, b_m)^T$ елементів. Здебільшого при дослідженні функціонування пристроїв використовують нелінійні залежності вихідних характеристик пристрою від його параметрів, тобто кожна i -та характеристика y_i , $i = 1, \dots, N$ є функцією $g_i(\vec{b})$ векторного аргументу параметрів $\vec{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$ [6]. Зважаючи на задані допуски на характеристики РЕК, які забезпечують його функціональну придатність, при синтезі доцільно вихідні характеристики РЕК представляти в інтервальному вигляді:

$$[y_i^-, y_i^+], \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

У випадку відомих залежностей $g_i(\vec{b})$ між значеннями параметрів та вихідними характеристиками

пристрою, та із урахуванням обмежень (1) отримуємо:

$$y_i^- \leq g_i(\vec{b}) \leq y_i^+, i=1, \dots, N. \quad (2)$$

де $[y_i^-, y_i^+]$ – інтервали обмежень на значення вихідної характеристики РЕК.

Така постановка задачі з точки зору практики є не зовсім коректною, оскільки розв'язок інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (2) (ІСНАР) у вигляді вектора параметрів $\vec{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$ при його практичній реалізації не забезпечить виконання умов функціональної придатності хоча б в силу того, що існують технологічні відхилення параметрів елементів РЕК від номінальних значень при їх виготовленні.

За цих умов перепишемо задачу (2) в іншому вигляді. А саме, задавши відносні відхилення параметрів РЕК від номінальних та перейшовши в ІСНАР (2) до відносних відхилень характеристик РЕК від номінальних:

$$y_{0i} + y_{0i} \cdot \delta y_i^- \leq g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+] \leq y_{0i} + y_{0i} \cdot \delta y_i^+, i=1, \dots, N. \quad (3)$$

де $[\delta \vec{b}] = [\delta \vec{b}^-; \delta \vec{b}^+]$ - допуски на параметри РЕК; $\delta \vec{b}^-, \delta \vec{b}^+$ - відносні відхилення параметрів елементів РЕК від номінальних; \vec{b}_0 - невідомий вектор номінальних значень параметрів елементів РЕК; $y_{0i}, i=1, \dots, N$ - номінальні значення вихідних характеристик РЕК; $\delta y_i^-, \delta y_i^+, i=1, \dots, N$ - відносні відхилення характеристик від номінальних.

Якщо усі функції $g_i(\vec{b})$ на проміжку $[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+]$ є монотонними, то користуючись правилами інтервальної арифметики [7] отримуємо таку ІСНАР:

$$y_{0i} \cdot \delta y_i^- \leq g_i[\vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+] \leq y_{0i} \cdot \delta y_i^+, i=1, \dots, N. \quad (4)$$

Функції мети задачі синтезу РЕК

Система (3) є ІСНАР, для знаходження її хоча б одного розв'язку із множини необхідно перейти до дискретної оптимізаційної задачі, як це показано у праці [8]:

$$F(\vec{b}_k) \xrightarrow{\vec{b}_k} \min, \quad (5)$$

де $F(\vec{b}_k)$ - значення функції мети, яка побудована на основі ІСНАР (3) і на кожній ітерації визначає досягнуту «якість» наближення оцінки вектора параметрів РЕК до шуканих номінальних значень. При цьому ітераційну процедуру оцінювання вектора параметрів РЕК необхідно організувати у такий спосіб, щоб забезпечити зменшення значень функції мети $F(\vec{b}_1) > \dots > F(\vec{b}_k) > \dots > F(\vec{b}_{k=K} = \vec{b}_0 \in \Omega)$ за скінчену та якомога меншу кількість ітерацій $k = K$.

Спираючись на ІСНАР (3), умови забезпечення функціональної придатності на k -тій обчислювальній ітерації в задачі синтезу РЕК сформулюємо в такому вигляді:

$$g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+] \subset [y_{0i}^-, y_{0i}^+], i=1, \dots, N, \quad (6)$$

де $[y_{0i}^-, y_{0i}^+]$ - інтервали обмежень на номінальні значення вихідної характеристики РЕК.

Умови (6) забезпечують отримання такого вектора параметрів $\vec{b}_k = \vec{b}_0$ елементів щоб при заданих допусках на параметри елементів забезпечити обчисленні значення усіх вихідних характеристик РЕК в межах заданих відповідних інтервалів обмежень на значення вихідних характеристик.

У праці [9] розглянуто подібні умови (6) для задач параметричної ідентифікації. Спираючись на умови (5) та по аналогії з результатами праці [10], визначимо функцію мети $F(\vec{b}_k)$ в задачі (5), як різницю центрів найбільш віддалених між собою інтервалів $g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+], i=1, \dots, N$, отриманих для поточного наближення вектора оцінок параметрів \vec{b}_k , та відповідних заданих інтервалів $[y_{0i}^-, y_{0i}^+]$ - у випадку, коли найбільш віддалені між собою інтервали для i -ї вихідної характеристики не перетинаються. Формально зазначену умову запишемо у такому вигляді:

$$F(\vec{b}_k) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \text{mid}(g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+]) - \text{mid}([y_{0i}^-, y_{0i}^+]) \right\}, \quad (7)$$

$$\text{якщо } g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+] \cap [y_{0i}^-, y_{0i}^+] = \emptyset \exists i=1, \dots, N,$$

де $\text{mid}(\cdot)$ - означає оператор виділення центру інтервалу.

Для випадків, коли усі інтервали $g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+], i=1, \dots, N$ й відповідні задані інтервали допустимих значень вихідних характеристик РЕК перетинаються, то спираючись на результати праці [8] функцію якості наближення $F(\vec{b}_k)$ в задачі (5) визначатимемо у такому вигляді :

$$F(\vec{b}_k) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \text{wid}(g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+]) - \text{wid}(g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}^+] \cap [y_{0i}^-, y_{0i}^+]) \right\}, \quad (8)$$

$$\text{якщо } g_i[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+] \cap [y_{0i}^-, y_{0i}^+] \neq \emptyset \quad \forall i = 1, \dots, N,$$

де $wid(\cdot)$ - означає оператор визначення ширини інтервалу.

Проведемо аналіз функції мети в залежності від досягнутої «якості» поточного наближення параметрів РЕК. Для цього скористаємося рисунком 1. На рис.1 наведено графічну ілюстрацію для обох випадків (вирази (7) та (8)) обчислення функції мети. Як бачимо з рис.1 а), в першому випадку (обчислення за виразом (7)), при заданих допусках на параметри РЕК обчислені інтервали значень вихідних характеристик РЕК та заданих інтервалів допустимих значень цих характеристик суттєво відрізняються. При чому найбільше відхилення спостерігається між центрами інтервалів $g_i[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+]$ та $[y_{0i}^-, y_{0i}^+]$ для характеристики з номером $i = 3$. Модуль цього відхилення і є значенням функції мети. Можна припустити, що у цьому випадку обчислені інтервали значень характеристики отримані за наявності достатньо «грубих», тобто не точних оцінок \bar{b}_k номінальних значень параметрів РЕК.

Як тільки оцінки \bar{b}_k параметрів РЕК в процесі обчислень уточнюються, то обчислені інтервали значень характеристик та задані інтервали допустимих значень цих характеристик перетинаються, як це показано на рис.1 б). Тоді функцію мети обчислюємо за виразом (8).

Як бачимо з рис.1 б) найбільше відхилення спостерігається між інтервалами $g_i[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+]$ та $[y_{0i}^-, y_{0i}^+]$ для характеристики з номером $i = 2$. Саме це відхилення, обчислене за виразом (8), визначає значення функції мети на зазначеній ітерації пошуку.

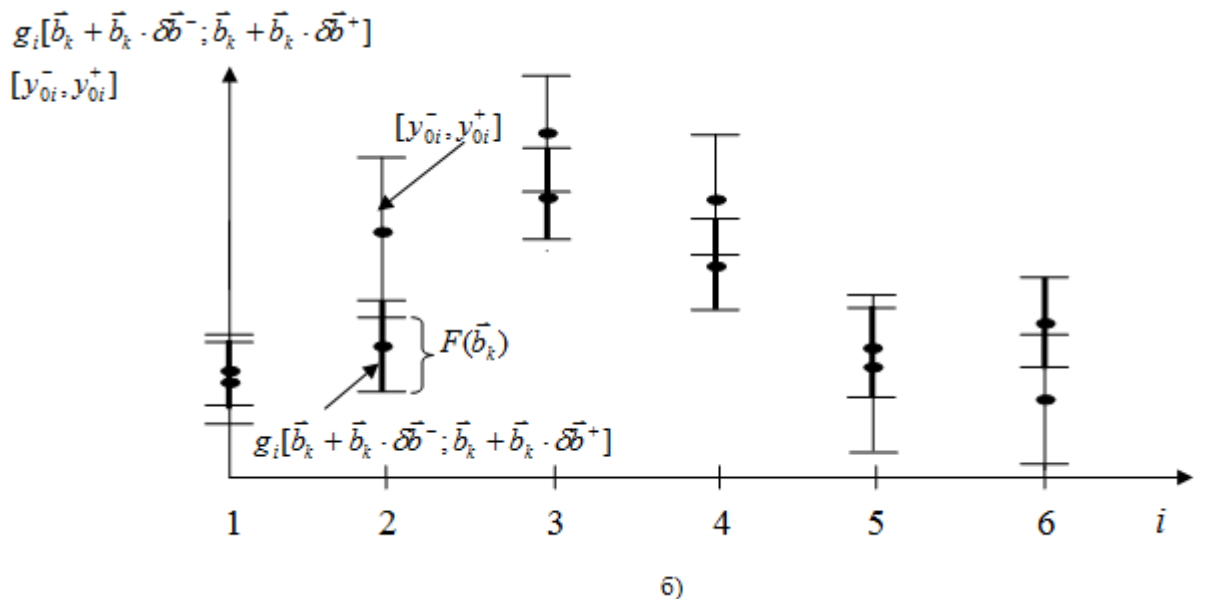
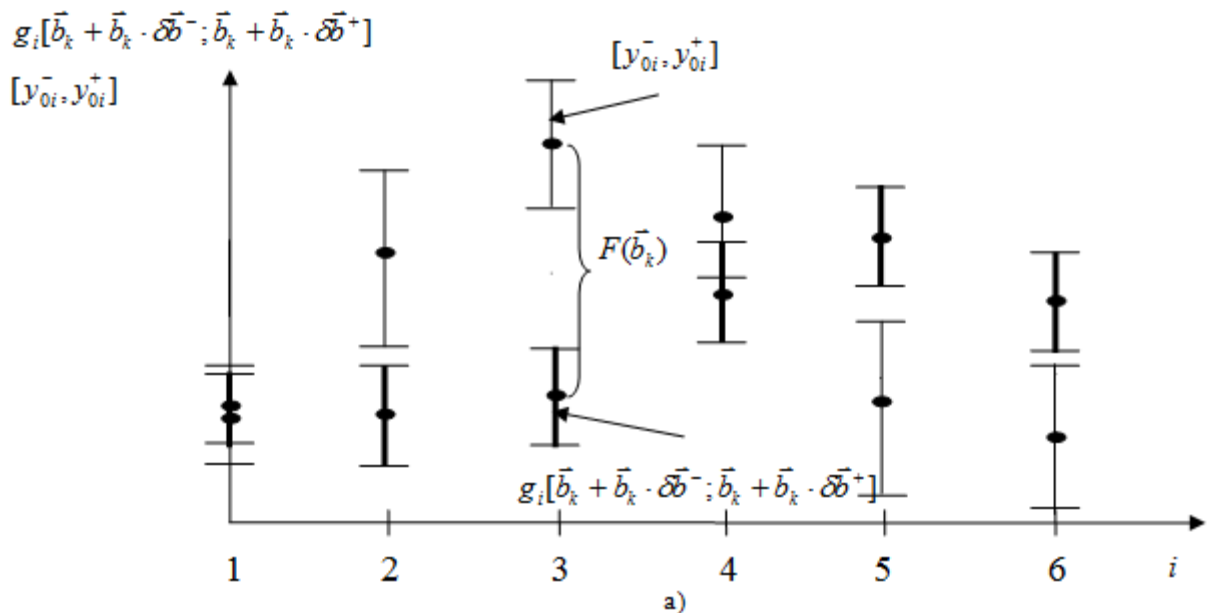


Рис. 1. Ілюстрація до обчислення функції мети: а)- за формулою (7) для випадку неточного наближення оцінок параметрів РЕК; б)- за формулою (8) для випадку уточнення оцінок параметрів РЕК.

Очевидно, що чим більша кількість рівнянь в ІСНАР (3), тим складніше знайти розв’язок ІСНАР. Враховуючи, що зазначена задача не може бути розв’язана за наперед задану кількість ітерацій, такого типу задачі відносять до NP-повних. Одним з методів пошуку невідомого вектора параметрів РЕК є метод випадкового пошуку. Метод випадкового пошуку застосовано для подібних задач розглядався в багатьох працях, зокрема Дивака М.П., Стахівка П.Г., Співак І.Я., Дивака Т.М. [11]. Проте в нашому випадку задача суттєво ускладнюється через те, що при обчисленні інтервалів значень $g_i[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+]$ вихідних характеристик РЕК використовуємо не просто оцінки \bar{b}_k вектора номінальних значень параметрів \bar{b}_0 (як це в класичних обчислювальних схемах), а певні інтервальні оцінки $[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+]$ цього вектора, обумовлені заданими допусками на параметри елементів РЕК.

Метод розв’язку задачі синтезу РЕК

Основною особливістю методу випадкового пошуку є те, що в процесі обчислення поточного наближення $[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+]$ використовують процедури його генерування[12]. Блок схема-алгоритму наведена на рис.2.

Крок 1. Задання початкового вектора параметрів і відповідного інтервалу $[\bar{b}_{k=0} + \bar{b}_{k=0} \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_{k=0} + \bar{b}_{k=0} \cdot \delta\bar{b}^+]$.

Крок 2. Обчислення інтервалів значень кожної вихідної характеристики $g_i[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+]$, $i = 1, \dots, N$.

Крок 3. Обчислення функції мети $F(\bar{b}_k)$ та перевірка «якості» поточного наближення параметрів до номінальних. Якщо отримана оцінка \bar{b}_k вектора номінальних значень параметрів \bar{b}_0 забезпечує умови функціональної придатності РЕК для заданих допусків на параметри, тобто $F(\bar{b}_k) = 0$, то поточний вектор \bar{b}_k є номінальним і зупинка пошукової процедури. Якщо умова $F(\bar{b}_k) = 0$ не виконується, то переходимо на крок 4 до процедури формування наступного наближення вектора параметрів на наступній $k+1$ ітерації.

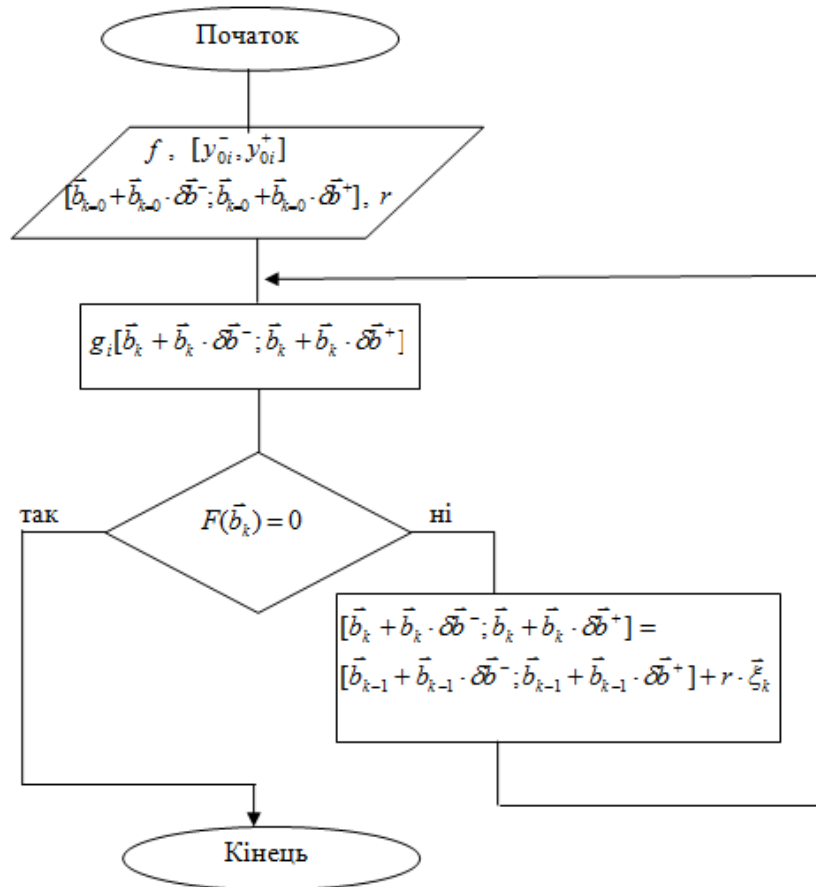


Рис. 2. Блок-схема алгоритму випадкового пошуку

Крок 4. Формулювання випадковим чином поточного вектора оцінок параметрів РЕК:

$$[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+] = [\bar{b}_{k-1} + \bar{b}_{k-1} \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_{k-1} + \bar{b}_{k-1} \cdot \delta\bar{b}^+] + r \cdot \bar{\xi}_k, \tag{9}$$

де r - довжина кроку;

$$\bar{\xi}_k = \left(\frac{\Delta b_{1k}}{R_k}, \dots, \frac{\Delta b_{mk}}{R_k} \right)^T; \tag{10}$$

$$R_k = \sqrt{\Delta b_{1k}^2 + \dots + \Delta b_{mk}^2} \tag{11}$$

$\Delta b_{1k}, \dots, \Delta b_{mk}$ - випадкові числа, згенеровані відповідно до випадкового закону розподілу на інтервалі [-1;1]. Після формування інтервалу значень оцінок параметрів переходимо на крок 2.

Запропонована процедура генерування випадковим чином поточного вектора оцінок параметрів є неефективною з точки зору обчислювальної складності та збіжності. Доцільно застосувати адаптивний алгоритм випадкового пошуку з змінним кроком (радіусом пошуку). Адаптивний алгоритм випадкового пошуку так само як і звичайний, за основу бере випадкові вибірки, котрі використовуються для визначення

напрямку пошуку, однак довжина кроку (радіусу) в даному алгоритмі буде змінюватись відповідно до отриманого успіху. Тобто, якщо дві послідовні ітерації дають зменшення значення функції мети, то крок збільшується в k_{in} раз, а якщо M послідовних ітерацій не дають зменшення функції мети, то крок зменшується в k_{dec} раз [13].

Приклад застосування

Розглянемо особливості реалізації та часові витрати на виконання кожної із вище описаних процедур на прикладі пошуку вектора параметрів елементів смугового фільтра, схема якого наведена на рис.3.

Вираз для обчислення модуля коефіцієнта передачі смугового фільтра на рис.3, представлений формулою:

$$|K(f)| = \frac{1}{\sqrt{R_0^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot L_0} - 2\pi \cdot f \cdot C_0\right)^2 + 1}}, \tag{12}$$

де f - частота; R_0, C_0, L_0 - невідомі (в задачі синтезу) номінальні значення параметрів елементів фільтра, відповідно: резистора, конденсатора та котушки індуктивності.

За вихідні характеристики фільтра, які необхідно забезпечити в процесі синтезу прийемо модуль коефіцієнта передачі на різних частотах. Задамо необхідні номінальні значення модуля коефіцієнта передачі $|K(f_i)| = K_{0i}, i = 1, \dots, N$ на різних частотах і допустимі відхилення від цих значень в межах 20%, тобто $\delta K_i = 0,2$. Тоді вважатимемо, що зазначене коло є функціонально придатним.

Допустимі значення для цієї характеристики на різних частотах представлено у таблиці 1 та на рис.4.

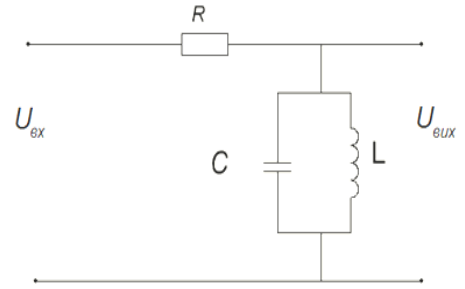


Рис. 3. Схема смугового фільтра

Таблиця 1

Обмеження на вихідні характеристики РЕК на різних частотах

i	f_i	K_{0i}	$K_i^- = K_{0i} - K_{0i} \cdot \delta K_i$	$K_i^+ = K_{0i} + K_{0i} \cdot \delta K_i$
1	10	0,0006	0,0005	0,0007
2	410	0,0266	0,0213	0,0319
3	810	0,0583	0,0466	0,07
4	1410	0,1442	0,1154	0,1731
5	1810	0,3063	0,2451	0,3676
6	2110	0,7381	0,5904	0,8857
7	2410	0,7187	0,575	0,8625
8	3010	0,2332	0,1866	0,2799
9	3610	0,1427	0,1142	0,1713
10	4210	0,1052	0,0842	0,1263

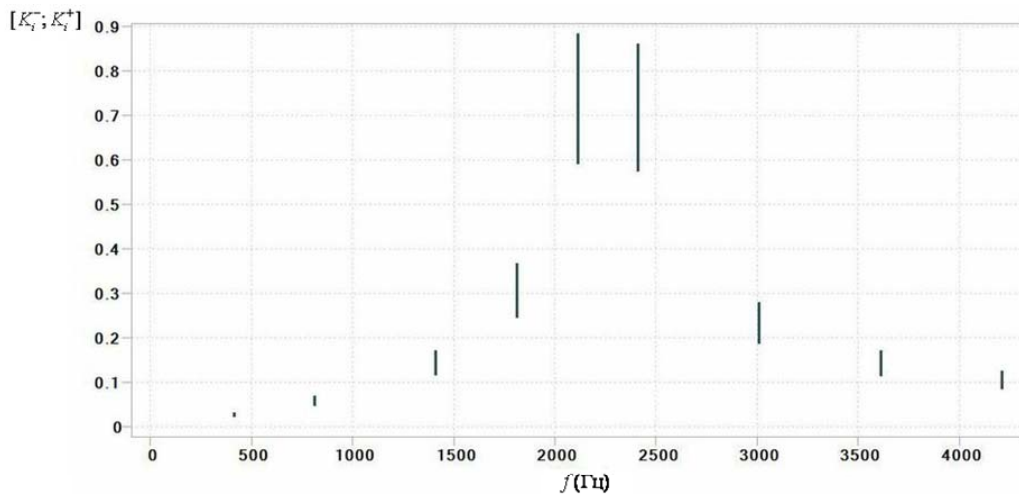


Рис. 4. Допустимі значення для модуля коефіцієнта передачі смугового фільтра

Таким чином задано не тільки вихідні дані стосовно синтезу РЕК, але і задано умови функціональної придатності цього кола.

Задамо допуски на усі параметри елементів РЕК в розмірі 5%, тобто $\delta b_j^- = -0,05$, а $\delta b_j^+ = 0,05$ та представимо вектор параметрів елементів РЕК в інтервальному вигляді:

$$[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+] = ([R_0 + R_0 \cdot \delta R^-; R_0 + R_0 \cdot \delta R^+], [C_0 + C_0 \cdot \delta C^-; C_0 + C_0 \cdot \delta C^+], [L_0 + L_0 \cdot \delta L^-; L_0 + L_0 \cdot \delta L^+]) \quad (13)$$

Зауважимо, що номінальні значення параметрів R_0, C_0, L_0 елементів фільтра є невідомими, тобто невідомим є вектор \vec{b}_0 . Підставимо в ІСНАР (3) замість $g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+]$ функцію для модуля коефіцієнта передачі на різних частотах із заміною номінальних значень параметрів R_0, C_0, L_0 на відповідні інтервали $[R_0 + R_0 \cdot \delta R^-; R_0 + R_0 \cdot \delta R^+], [C_0 + C_0 \cdot \delta C^-; C_0 + C_0 \cdot \delta C^+], [L_0 + L_0 \cdot \delta L^-; L_0 + L_0 \cdot \delta L^+]$, а замість інтервалів $[y_{0i}^-; y_{0i}^+]$ підставимо $[K_{0i}^-; K_{0i}^+]$, отримаємо таку ІСНАР:

$$\left\{ \begin{aligned} K_{01}^- &\leq \frac{1}{\sqrt{[0,95R_0; 1,05R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot [0,95L_0; 1,05L_0]} - 2\pi \cdot f_1 \cdot [0,95C_0; 1,05C_0]\right)^2 + 1}} \leq K_{01}^+ \\ \dots \\ K_{0i}^- &\leq \frac{1}{\sqrt{[0,95R_0; 1,05R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_i \cdot [0,95L_0; 1,05L_0]} - 2\pi \cdot f_i \cdot [0,95C_0; 1,05C_0]\right)^2 + 1}} \leq K_{0i}^+ \\ \dots \\ K_{0N}^- &\leq \frac{1}{\sqrt{[0,95R_0; 1,05R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_n \cdot [0,95L_0; 1,05L_0]} - 2\pi \cdot f_n \cdot [0,95C_0; 1,05C_0]\right)^2 + 1}} \leq K_{0N}^+ \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Розв'яжемо отриману систему із застосуванням алгоритмів випадкового пошуку. Для цього розроблено програма пошуку невідомого вектора параметрів елементів РЕК на основі звичайного алгоритму випадкового пошуку та адаптивного. Для реалізації вище зазначених методів використовувався ПК у такій комплектації: тип процесора - Mobile DualCore Intel Core i5-2410M, 2655 MHz (27 x 98); системна пам'ять - 8106 MB (DDR3-1333 DDR3 SDRAM).

Форма введення початкових даних для реалізації алгоритму звичайного випадкового пошуку представлена на рис. 5. Кількість випадковим чином згенерованих, згідно з рівномірним законом розподілу, точок в просторі параметрів на відстані радіусу від початково заданого вектора параметрів рівна 100. Загальна кількість ітерацій 1.000.000, яку можна збільшити, якщо «якість» оцінювання не буде досягнуто.

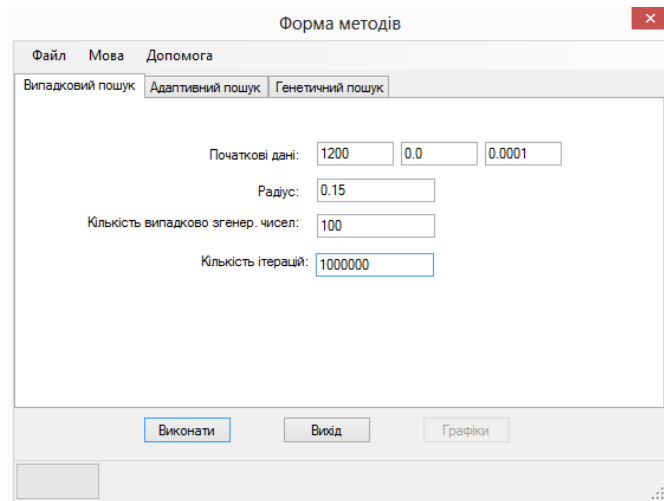


Рис. 5. Форма введення початкових даних для методу випадкового пошуку

Рис.6 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів РЕК. Інтервали значень для отриманих параметрів РЕК: $[R^-; R^+] = [949.99; 1049.99] \text{ Ом}$ $[C^-; C^+] = [0,48; 0,54] \text{ мкФ}$ $[L^-; L^+] = [9; 10] \text{ мГн}$. Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 4.001.209 ітерацій, на які було витрачено близько 40 хвилин часу.

Слід зауважити, що отримані інтервали значень параметрів радіоелементів в наведеному прикладі мають виключно теоретичне значення, оскільки на практиці їх значення необхідно обирати в межах відомих рядів номінальних значень.

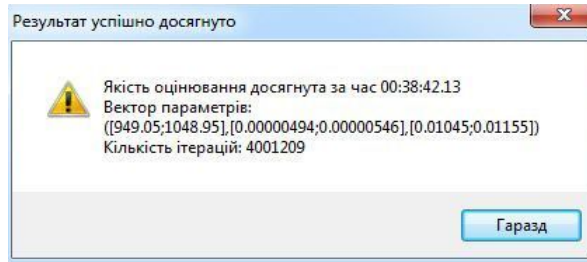


Рис. 6. Результат виконання методу випадкового пошуку

На рис.7 червоним кольором наведено характеристику модуля коефіцієнта передачі синтезованого фільтра з урахуванням заданих допусків на параметри РЕК. Сірим кольором наведено інтервали допустимих значень, які визначають функціональну придатність РЕК. Як бачимо з рис.7, характеристика синтезованого фільтра на заданих частотах знаходиться в допустимих межах.

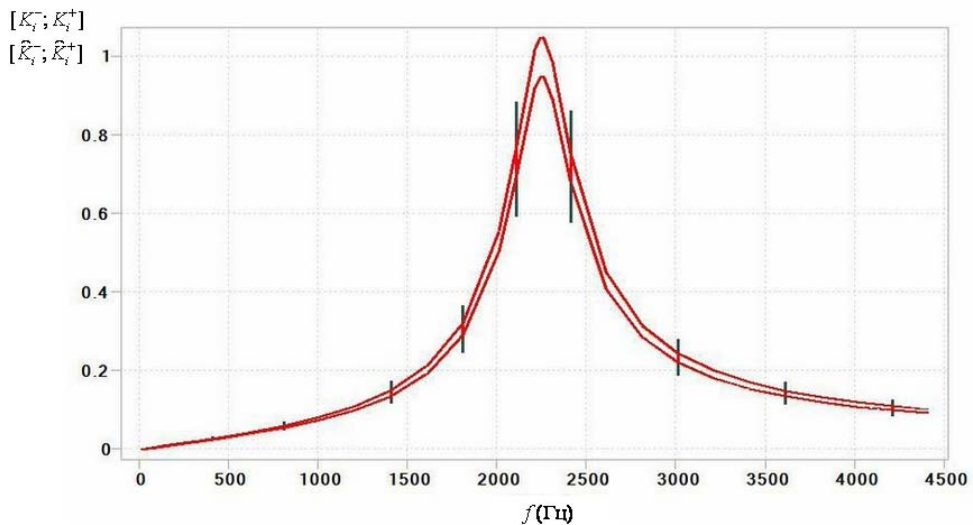


Рис. 7. Графік порівняння допустимих значень модуля коефіцієнта передачі та цієї ж характеристики для синтезованого фільтра з урахуванням допусків на параметри РЕК.

Згідно рис.6, який демонструє виконання звичайного алгоритму випадкового пошуку, можна побачити, що якість оцінювання досягнута за досить великий час та кількість ітерацій. Тому доцільним є застосування адаптивного алгоритму випадкового пошуку зі змінним кроком. Форма введення початкових даних для реалізації вказаного алгоритму наведена рис.8. У зазначеному алгоритмі запропоновано ввести додаткові змінні: зміну M – кількості повернень до попередньої точки у разі неможливості знаходження кращої, $M = 10000$; зміні k_{dec} та k_{in} – коефіцієнти зменшення та збільшення кроку, $k_{dec} = 0.618$ та $k_{in} = 1.618$.

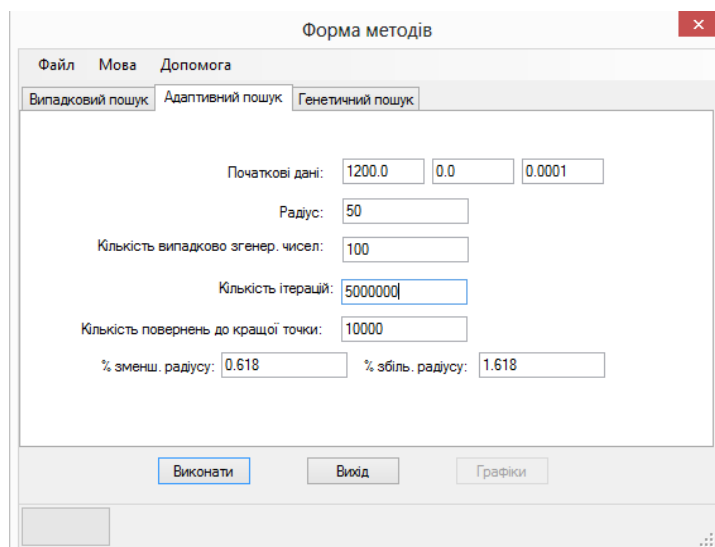


Рис. 8. Форма ведення початкових даних для адаптивного алгоритму випадкового пошуку зі змінним кроком

Інтервали значень для отриманих параметрів РЕК у випадку реалізації цього алгоритму: $[R^-; R^+] = [949.99; 1049.99] \text{ Ом}$ $[C^-; C^+] = [0, 4; 0, 49] \text{ мкФ}$ $[L^-; L^+] = [9, 9; 11] \text{ мГн}$. Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 1.007.604 ітерацій, на які було витрачено близько 20 хвилин часу.

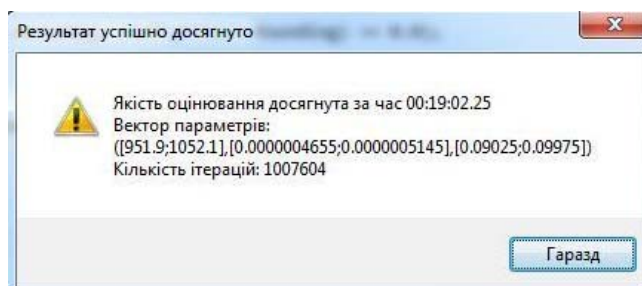


Рис. 9. Результат виконання адаптивного алгоритму випадкового пошуку зі змінною кроку

На рис.10 червоним кольором показана історія пошуку вектора параметрів в процесі виконання алгоритму, чорним кольором – згенеровані випадковим чином згідно з рівномірним законом розподілу вектори параметрів, зеленим – точка, яка в просторі параметрів задає шуканий вектор номінальних значень параметрів фільтра.

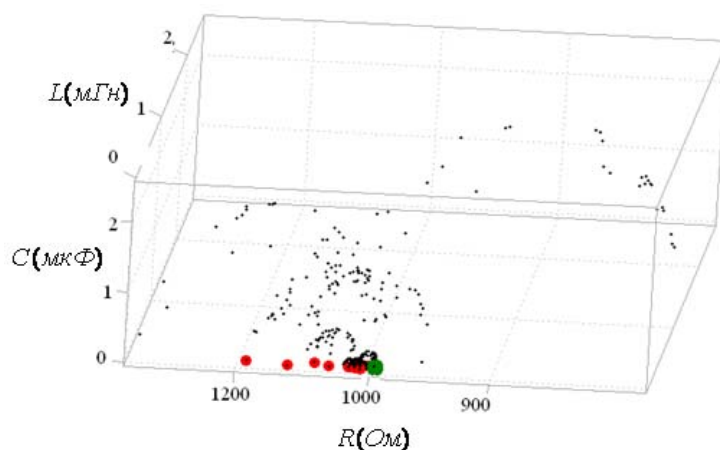


Рис. 10. Ілюстрація процедури випадкового пошуку

Згідно рис.9, який демонструє виконання адаптивного алгоритму випадкового пошуку зі змінним кроком, можна побачити, що якість оцінювання в порівнянні зі звичайним алгоритмом досягнута за меншу кількість ітерацій і відповідно за менший проміжок часу.

Висновки

Вперше поставлено та розв'язано задачу синтезу РЕК при заданих обмеженнях на вихідні характеристики та за умов заданих допусків на параметри елементів. Показано, що зазначена задача є задачею розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь. Запропоновано для знаходження її хоча б одного розв'язку перетворення до оптимізаційної задачі із дискретною цільовою функцією. Розглянуто два алгоритми розв'язування оптимізаційної задачі із процедурами випадкового пошуку. Отримані теоретичні результати підтверджено прикладом синтезу смугового фільтра.

Література

1. Парасочкін В.О. Основи теорії кіл: Навч. посіб./ В.О. Парасочкін. – О.: Наука і техніка, 2006. – 156с.
2. Іноземцев Г.Б. Математичне моделювання та оптимізація систем електроспоживання у сільському господарстві/ Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський// К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010. – 140с.
3. Дивак М.П. Оцінка точності параметрів радіоелектронних кіл методами аналізу інтервальних даних. - Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка'2001. - Київ: ІЕД НАНУ, 2001. - С. 29 - 33.
4. Дивак М.П. Вирішення задач синтезу допусків на параметри РЕК методом допускового еліпсоїдного оцінювання з використанням паралельних обчислень/ М.П. Дивак, С.Я. Максимова/ Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2011. – Тернопіль: Економічна думка, 2011. – С.97-101
5. Кривошейкин А.В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей/ А.В.

Кривошейкин. – М.: Радио и связь, 1983. -136с.

6. Yuriy Bobalo. Estimation of functional usability of radio electronic circuits by applying method of confidence ellipsoids/ Yuriy Bobalo, Petro Stakhiv, Svitlana Krepych/ Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Polytechnic National University, Volume 2, No.2, 2012. – P.1-7

7. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления/Г.Алефельд, Ю.Херцбергер – М.: Мир, 1987. – 360с.

8. Дивак М.П. Ідентифікація параметрів різницевого оператора в задачах моделювання процесів поширення забруднень методами аналізу інтервальних даних / М.П.Дивак, А.В.Пукас, Т.М.Дивак// 36.Наук.Праць ДонНТУ. Серія інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2009. – Вип.10(153) – С.224-229

9. Дивак М.П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора / М.П. Дивак, Т.М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С.Степашко - Київ: МННЦ ІТС, 2009. - Вип.1– 236с. – С.35-43

10. Дивак М.П. Кількісні характеристики оцінки якості структури моделі у вигляді інтервального різницевого оператора / М.П. Дивак, Т.М. Дивак, І. Ф. Войтюк // Відбір і обробка інформації. Міжвідомчий збірник наукових праць. – Вип. 34 (110). – 2011

11. Дивак М.П. Ітераційний метод пошуку допустимого розв'язку ІСЛАР в задачах ідентифікації параметрів динамічних моделей “вхід-вихід” / М.П. Дивак, П.Г. Стахів, І.Я. Каліщук // Відбір та обробка інформації. - 2005. – Випуск 23 (99). – С. 40-48.

12. Алексеева Е.В. Численные методы оптимизации/Е.В.Алексеева, О.А.Кутненко, А.В.Плясунов//Учебное пособие, Новосибирск, 2008. – 126с.

13. Чипига А.Ф. Анализ методов случайного поиска глобальных экстремумов многомерных функций / А.Ф.Чипига, Д.А.Колков//Фундаментальные исследования. – 2006. – №2.

References

1. Parasochkin V.O. Fundamentals of circuit theory:Textbook./V.O. Parasochkin – O.: Science and Technology, 2006. – 156P.
2. Inozemtsev G.B. Mathematical modeling and optimization of power consumption in agriculture /G.B.Inozemtsev, V.V.Kozirskiy//К.: Publishing Center NULandES of Ukraine, 2010. – 140P.
3. Dyvak M.P. Evaluation of the accuracy parameters of radio electronic circuits analysis methods of interval data. - Institute of Electrodynamics NASU. Electrical Engineering'2001. - Kyiv: IE NASU, 2001.-P. 29 - 33.
4. Dyvak M.P. Solving the problem of synthesis of tolerances for parameters REC by the method of tolerance ellipsoidal estimation by using parallel computing / M.P.Dyvak, S.Ya.Maksymova/ Modern Computer Information Technology: Materials of the All-Ukrainian school-workshop of young scientists and students ACIT'2011. – Ternopil: Economic thought, 2011. – P.97-101
5. Kryvosheykyn A.V. Accuracy parameters and configure the analog electronic circuits/ A.V.Kryvosheykyn – M.: Radio and Communications, 1983. -136P.
6. Yuriy Bobalo. Estimation of functional usability of radio electronic circuits by applying method of confidence ellipsoids/ Yuriy Bobalo, Petro Stakhiv, Svitlana Krepych/ Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Polytechnic National University, Volume 2, No.2, 2012. – P.1-7
7. G. Alefeld Introduction to interval computations/ G. Alefeld, Yu.Hertsberher – M.: World, 1987. – 360P.
8. Dyvak M.P. Parameter identification of difference operator in the task of modeling of the processes of spread of contamination by interval data analysis methods / M.P.Dyvak, A.V.Pukas, T.M.Dyvak// Collected Works DNTU. The series of Informatics, Cybernetics and Computer Science. – 2009. – Num.10(153) – P.224-229
9. Dyvak M.P. Features of construction of interval system of algebraic equation and method of its solution in problems of identification of interval linear difference operator / M.P.Dyvak, T.M.Dyvak // Inductive modeling of complex systems. Collected Works / executive editor V.S.Stepashko - Kyiv: IRTC ITS, 2009. - Num.1 – P.35-43
10. Dyvak M.P. Quantitative characteristics of valuation of quality of model structure in the form of interval difference operator / M.P.Dyvak, T.M.Dyvak, I.F.Voytyuk // Selection and processing of information. Interdepartmental collection of scientific papers. – Num. 34 (110). – 2011
11. Dyvak M.P. Iterative method for finding acceptable solution to task ISLAR in the tasks of parameter identification of dynamic models "input-output" / M.P.Dyvak, P.G.Stakhiv, I.Ya.Kalishchuk // Selection and processing of information. - 2005. – Num.23 (99). – P. 40-48.
12. Alekseeva E.V. Numerical optimization/E.V. Alekseeva , O.A.Kutnenko, A.V.Plyasunov // Textbook, Novosibirsk, 2008. – 126P.
13. Чупыга А.Ф. Analysis of the methods of random search of global extrema of multidimensional functions/A.F.Chupyha, D.A.Kolkov //Fundamental research. – 2006. – №2.

Рецензія/Peer review : 5.9.2014 р. Надрукована/Printed :23.10.2014 р.

Рецензент: д.т.н., професор Лупенко С.А.