

Крепич С. Порівняльний аналіз часової складності процедур випадкового пошуку в задачі синтезу при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик та допусків на параметри його елементів / С. Крепич // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2015. — Том 77. — № 1. — С. 204-218. — (Приладобудування та інформаційно-вимірвальні технології).

УДК 519.876.5

С. Крепич

Тернопільський національний економічний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЧАСОВОЇ СКЛАДНОСТІ ПРОЦЕДУР ВИПАДКОВОГО ПОШУКУ В ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ ПРИ ЗАДАНИХ ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕННЯХ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

Резюме. Розглянуто приклад задачі аналізу аналогового фільтра при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик та допусків на параметри його елементів. Розв'язком задачі синтезу аналогового фільтра є розв'язок інтервальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Задача синтезу в такому випадку зводиться до деякої оптимізаційної задачі, котру доцільно розв'язувати методами випадкового пошуку.

Ключові слова: процедури випадкового пошуку, вихідна характеристика, допуски на параметри.

S. Krepych

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RANDOM SEARCH PROCEDURES TIME COMPLEXITY IN THE SYNTHESIS TASK UNDER GIVEN ACCEPTABLE VALUES OF ITS ELEMENT PARAMETERS OUTPUT CHARACTERISTICS AND TOLERANCES

Summary. The example of analog filter synthesis task under given acceptable values of its output parameter characteristics and tolerances has been analyzed. The solution of the task on the analog filter synthesis is the solution of the non-linear algebraic equations interval system. The task of synthesis in this case is reduced to some optimization task. The method for constructing of the objective function of the analog filter synthesis task has been interpreted and the example of the synthesis task transformation into optimization task for finding at least one ISNAE solution has been presented. One of methods for finding the unknown vector of analog filter parameters is the method of random search. But the sufficient difference in the application of the method in question in the paper is the application not only the estimation of the nominal values parameters vector while calculating output characteristics values intervals (as it is in classical schemes), but some interval estimations of this vector caused by the specified elements parameters tolerances. While investigating the methods of filter synthesis different procedures of random search were analyzed for the synthesis method implementation: the random search method with linear tactics, the method of random search under the most favorable attempt, the method of random search taking advantage of the directional cone, the method of random search with random step adaptation.

Using programming language C# taking advantage of Microsoft Visual Studio the software procedures implementation of the mentioned above random search methods has been developed and their computation complexity on the example of the analog filter synthesis task has been analyzed. The interval of the filter amplitude-frequency characteristics, the initial filter parameters vector in the interval form, the initial approximation radius, the number of random generated numbers and the number of iterations were taken as input values. As the result of comparative analysis of the filter synthesis random search procedures the most effective method was found to be the method based on the random search procedure taking advantage of the directional cone.

Key words: random search procedure, output characteristics, parameter tolerances.

Постановка проблеми. У традиційній постановці задачу синтезу радіоелектронних пристроїв математично формулюють як оптимізаційну задачу, в якій цільова функція забезпечує вимоги до характеристик синтезованого пристрою [1]. При розв'язуванні задачі синтезу з одночасним забезпеченням функціональної придатності радіоелектронних пристроїв необхідно обчислити параметри у такий спосіб, щоб із урахуванням їх відхилень, які задаються допусками, забезпечити функціональну придатність радіоелектронного пристрою. Зазначені задачі мають надзвичайну практичну цінність [2].

На сьогодні існуючі методи розв'язку задач синтезу радіо-електронних пристроїв часто використовують у процедурах випадкового пошуку. Серед найвідоміших методів синтезу радіоелектронних пристроїв при одночасному задаванні допустимих значень вихідних характеристик відомими є такі: з лінійною тактикою; за найкращою спробою; із використанням направляючого конуса; із адаптацією розподілу випадкового кроку [3]. Водночас часова складність реалізації цих процедур саме для задач синтезу радіоелектронних пристроїв за умови заданих допустимих значень вихідних характеристик є малодослідженою.

Аналіз досліджень і публікацій. Методи синтезу радіоелектронних пристроїв достатньою мірою описані в працях [4,6,7]. Методи синтезу радіоелектронних пристроїв при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик, в яких використовуються також процедури випадкового пошуку, наведено у працях [8,9]. Проте ще відсутні публікації щодо обґрунтування вибору процедури випадкового пошуку за критерієм мінімальної часової складності при реалізації методів синтезу радіоелектронних пристроїв при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик і одночасно заданих допусків на параметри його елементів.

Мета роботи. Проведення порівняльного аналізу часової складності методів синтезу радіоелектронних пристроїв при одночасному задаванні допустимих значень вихідних характеристик та допусків на параметри його елементів із застосуванням різних процедур випадкового пошуку і на цій основі обґрунтування вибору методу з мінімальною часовою складністю. Для реалізації мети запропоновано використати приклад синтезу аналогового фільтра.

Постановка задачі. Розглянемо приклад синтезу аналогового фільтра, наведеного на схемі, що на рис.1, при заданих допустимих значеннях його модуля коефіцієнта передавання на різних частотах.

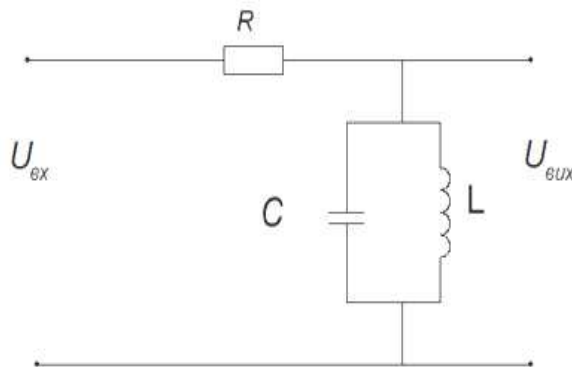


Рисунок 1. Схема аналогового фільтра

Figure 1. Scheme of analog filter

Вираз для обчислення модуля коефіцієнта передавання фільтра (рис.1) представлений формулою [4]

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

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, прийmemo модуль коефіцієнта передавання на різних частотах [5]. Задамо необхідні номінальні значення модуля коефіцієнта передавання $|K(f_i)| = K_{0i}, i = 1, \dots, N$ на різних частотах і допустимі відхилення від цих значень

$$[K_{0i}^-; K_{0i}^+] = [|K(f)| - \delta K_i \cdot |K(f)|; |K(f)| + \delta K_i \cdot |K(f)|], \quad (2)$$

де $\delta K_i > 0$ – відносне відхилення модуля коефіцієнта передавання від номінальних значень; $[K_{0i}^-; K_{0i}^+]$ – інтервали допустимих значень модуля коефіцієнта передавання. Тоді вважатимемо, що зазначене коло є функціонально придатним.

Тепер задамо допуски на усі параметри елементів фільтра та представимо вектор параметрів елементів фільтра в інтервальному вигляді

$$[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+] = ([R_0^-; R_0^+], [C_0^-; C_0^+], [L_0^-; L_0^+]) \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} [R_0^-; R_0^+] &= [R_0 - R_0 \cdot \delta R; R_0 + R_0 \cdot \delta R], \\ [C_0^-; C_0^+] &= [C_0 - C_0 \cdot \delta C; C_0 + C_0 \cdot \delta C], \\ [L_0^-; L_0^+] &= [L_0 - L_0 \cdot \delta L; L_0 + L_0 \cdot \delta L] \end{aligned} \quad (4)$$

$\delta R > 0, \delta C > 0, \delta L > 0$ – відносні відхилення параметрів елементів фільтра.

Зауважимо, що номінальні значення параметрів R_0, C_0, L_0 елементів фільтра є невідомими. Задамо обмеження на модуль коефіцієнта передавання для різних частот у вигляді

$$\begin{cases} K_{01}^- \leq |K(f_1)| \leq K_{01}^+ \\ \dots\dots\dots \\ K_{0i}^- \leq |K(f_i)| \leq K_{0i}^+ \\ \dots\dots\dots \\ K_{0N}^- \leq |K(f_N)| \leq K_{0N}^+ \end{cases} \quad (5)$$

Тепер підставимо в отриману систему (5) інтервали $[R_0^-; R_0^+], [C_0^-; C_0^+], [L_0^-; L_0^+]$, які задають допуски на параметри елементів, замість номінальних значень параметрів R_0, C_0, L_0 у формулі (1). Отримаємо таку інтервальну систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР):

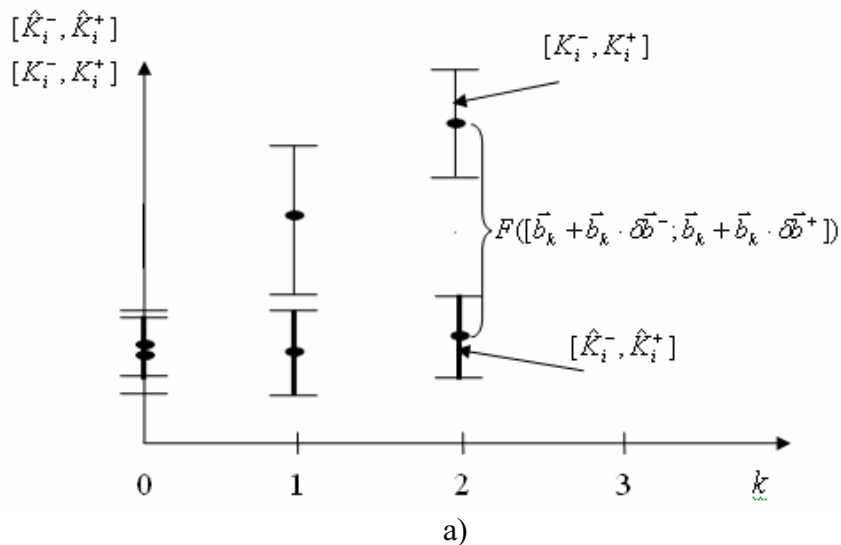
$$\left\{ \begin{array}{l}
 K_{01}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[R_0^-; R_0^+]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot [L_0^-; L_0^+]} - 2\pi \cdot f_1 \cdot [C_0^-; C_0^+] \right)^2 + 1}} \leq K_{01}^+ \\
 \dots \\
 K_{0i}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[R_0^-; R_0^+]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_i \cdot [L_0^-; L_0^+]} - 2\pi \cdot f_i \cdot [C_0^-; C_0^+] \right)^2 + 1}} \leq K_{0i}^+ \\
 \dots \\
 K_{0N}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[R_0^-; R_0^+]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_n \cdot [L_0^-; L_0^+]} - 2\pi \cdot f_n \cdot [C_0^-; C_0^+] \right)^2 + 1}} \leq K_{0N}^+
 \end{array} \right. \quad (6)$$

Для знаходження хоча б одного розв'язку ІСНАР(6) із множини скористаємось, за аналогією, результатами праці [6], перетворивши зазначену задачу до дискретної оптимізаційної задачі

$$F([\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta \bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta \bar{b}^+]) \xrightarrow{[\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta \bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta \bar{b}^+]} \min, \quad (7)$$

де $F([\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta \bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta \bar{b}^+])$ – значення функції мети, яка побудована на основі ІСНАР (6) і на кожній ітерації визначає досягнуту «якість» наближення оцінки вектора параметрів фільтра до шуканих номінальних значень. При цьому ітераційну процедуру оцінювання вектора параметрів фільтра необхідно організувати у такий спосіб, щоб забезпечити зменшення значень функції мети $F(\bar{b}_1) > \dots > F(\bar{b}_k) > \dots > F(\bar{b}_{k=K} = \bar{b}_0 \in \Omega)$ за скінчену та якомога меншу кількість ітерацій $k = K$.

Розглянемо детально процедуру перетворення задачі знаходження хоча б одного розв'язку ІСНАР (6) до оптимізаційної задачі (7). Скористаємось графічною ілюстрацією для пояснення процедури отримання функції мети.



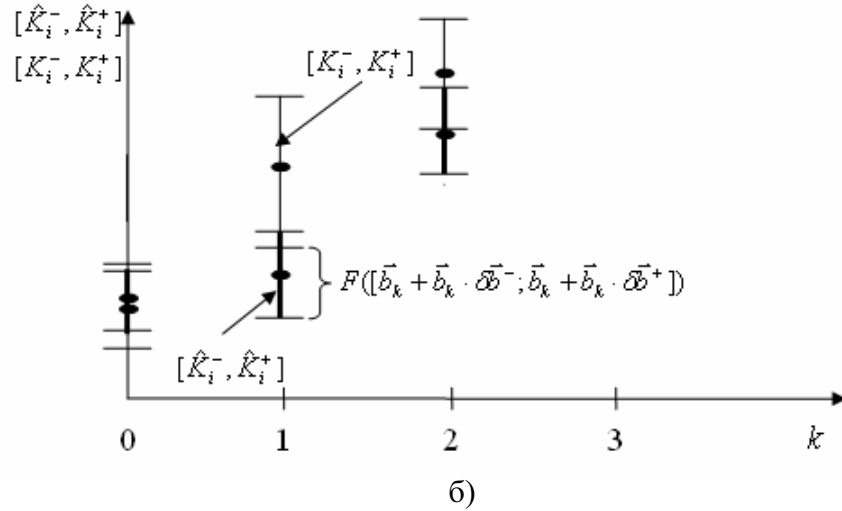


Рисунок 2. Ілюстрація для визначення функції мети в задачі синтезу: а) випадок $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_i^-; K_i^+] = \emptyset$, б) випадок $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_i^-; K_i^+] \neq \emptyset$

Figure 2. Illustration to determine the objective function in the task of synthesis: a) case $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_i^-; K_i^+] = \emptyset$, b) case $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_i^-; K_i^+] \neq \emptyset$

На рисунку наведено задані інтервали допустимих значень на вихідні характеристики РЕП $[K_i^-; K_i^+]$ та інтервали допустимих значень на вихідні характеристики РЕП, отримані з одного розв'язку ІСНАР(6)

$$[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] = \frac{1}{\sqrt{[R_0^-; R_0^+]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_i \cdot [L_0^-; L_0^+]} - 2\pi \cdot f_i \cdot [C_0^-; C_0^+] \right)^2 + 1}} \quad (8)$$

Умовою забезпечення функціональної придатності, як впливає із системи (6), є $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \subset [K_i^-; K_i^+] \forall i = 1..N$.

Тоді, спираючись на результати праці [7], функцію мети $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}_k^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}_k^+])$ визначаємо як різницю центрів найвіддаленіших між собою інтервалів $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+], i = 1, \dots, N$, отриманих для поточного наближення вектора оцінок параметрів $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}_k^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}_k^+]$, та відповідних заданих інтервалів $[K_{0i}^-; K_{0i}^+]$ – у випадку, коли найвіддаленіші між собою інтервали для i -ї вихідної характеристики не перетинаються. Формально зазначену умову запишемо у вигляді

$$F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}_k^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta \vec{b}_k^+]) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \left| \text{mid}([\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+]) - \text{mid}([K_{0i}^-; K_{0i}^+]) \right| \right\}, \quad (9)$$

якщо $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_{0i}^-; K_{0i}^+] = \emptyset \exists i = 1, \dots, N$, де $\text{mid}(\cdot)$ – означає оператор виділення центру інтервалу.

Для випадків, коли усі інтервали $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+], i = 1, \dots, N$ й відповідні задані інтервали допустимих значень вихідних характеристик фільтра перетинаються, то

спираючись на результати праці [6], функцію якості наближення $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+])$ в задачі (7) визначатимемо у вигляді

$$F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+]) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \text{wid}([\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+]) - \text{wid}([\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_{0i}^-; K_{0i}^+]) \right\}, \quad (10)$$

якщо $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_{0i}^-; K_{0i}^+] \neq \emptyset \quad \forall i = 1, \dots, N$, де $\text{wid}(\cdot)$ – означає оператор визначення ширини інтервалу.

Зазначені випадки зображені на рис.2 – а) та б) відповідно.

Тепер перейдемо до розгляду методів розв'язування задачі (7). Одним із методів пошуку невідомого вектора параметрів аналогового фільтра є метод випадкового пошуку. Метод випадкового пошуку для подібних задач розглядався в багатьох працях, зокрема Дивака М.П., Стахіва П.Г., Співак І.Я., Дивака Т.М. [8]. Проте в нашому випадку задача суттєво ускладнюється через те, що при обчисленні інтервалів значень $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+]$ вихідних характеристик фільтра використовуємо взамін точкової оцінки \vec{b}_k вектора номінальних значень параметрів \vec{b}_0 (як це в класичних обчислювальних схемах) інтервальні оцінки $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+]$ цього вектора, обумовлені заданими допусками на параметри елементів фільтра.

Виходячи з викладеного, для розв'язування задачі синтезу аналогового фільтра у вигляді задачі оптимізації (7) запропоновано розглянути й дослідити процедури випадкового пошуку, які описано у праці Растрігіна Л.А.[9]:

- випадковий пошук із лінійною тактикою;
- випадковий пошук за найкращою спробою;
- випадковий пошук із використанням направляючого конуса;
- випадковий пошук із адаптацією розподілу випадкового кроку.

В основі обчислювальних схем, розглянутих у праці Растрігіна Л.А., є правила урахування історії пошуку у послідовності $\vec{b}_1 \rightarrow \vec{b}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \vec{b}_i \rightarrow \dots \rightarrow \vec{b}_k$. Основним правилом, на якому ґрунтуються процедури випадкового пошуку та обчислювальні схеми оптимізації, є правило, що ймовірність вдалого кроку у напрямку, який був успішним на попередніх ітераціях, тобто коли функція мети зменшувалася, буде більшою, ніж ймовірність вдалого кроку, вибраного випадковим чином.

Процедура випадкового пошуку з лінійною тактикою (ВПЗЛП). Випадковий пошук такого роду побудуємо за допомогою двох операторів: генерування випадкового вектора параметрів $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+]$ або повторення кроку за аналогією з попередньою ітерацією. Дія кожного із них може призвести до одного з двох результатів: значення функції $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+])$ або зменшиться, або залишиться без змін. Процедура випадкового пошуку з лінійною тактикою спирається на таке очевидне припущення відносно об'єкта оптимізації: ймовірність вдалого кроку у напрямку, який був успішним на попередній ітерації, тобто коли функція мети зменшувалася, буде більшою, ніж ймовірність вдалого кроку вибраного випадковим чином. При пошуку параметрів елементів фільтра це означатиме доцільність повторити успішний крок, а у випадку невдачі – обирати напрям пошуку випадковим чином. Лінійність тактики вказаної процедури полягає в імітації лінійної поведінки, тобто в прямому повторенні вдалого кроку [10].

Формально правило обчислення поточного значення параметрів фільтра у цій процедурі випадкового пошуку запишемо у такому вигляді:

$$[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+] = [\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+] + \Delta[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+], \quad (11)$$

$$\text{де } \Delta[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+] = \begin{cases} r \cdot \vec{\xi}, \text{ якщо } F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]) - \\ - F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+]) \geq 0 \\ \Delta[\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+], \text{ якщо } F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]) - \\ - F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+]) < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

r – поточний радіус; $\vec{\xi}$ – одиничний випадковий вектор, рівномірно розподілений за усіма напрямками простору параметрів, що оптимізуються; $\Delta[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]$, $\Delta[\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+]$ – величина кроку на k -тій та на $k-1$ ітераціях.

Зазначена схема має просту геометричну інтерпретацію. Фактично, це спуск із довжиною кроку r або у випадковому напрямку $\vec{\xi}$ у просторі оцінок вектора параметрів $[\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta b}^+]$, або із послідовним застосуванням оператора повторення по поверхні, яка задана функцією $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+])$ у напрямку такому ж, як на попередніх кроках, до тих пір, поки значення функції $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta b}^+])$ не почне зростати. Це є сигналом того, що обраний напрям більше не перспективний, потрібно обирати новий – випадковий.

Розглянемо специфіку й можливості описаної обчислювальної схеми. Нехай p – ймовірність того, що величина випадкового кроку $\Delta[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+] = r \cdot \vec{\xi}$ успішна, а q – ймовірність повторення попереднього успішного кроку. Описана обчислювальна схема буде ефективною, коли часто «спрацьовує» оператор повторення кроку, так як в ці моменти гарантовано зменшується значення функції мети. Звідси випливає: для ефективної роботи даного алгоритму необхідно, щоб ймовірність q була більшою ніж p . Спираючись на властивості функції мети $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta b}^+])$, можемо припустити, що ефективність розглянутої лінійної стратегії у процедурі випадкового пошуку буде висока для початкових ітерацій, коли оцінки параметрів є «грубими» і функція мети на цій ділянці є монотонно спадною.

Процедура випадкового пошуку за найкращою спробою (ВПпНС). Випадковий пошук такого роду побудований на обчисленні значень функції мети в L точках, згенерованих випадковим чином на деякій локальній області пошуку. Набір цих точок представимо таким виразом:

$$[\vec{b}_l + \vec{b}_l \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_l + \vec{b}_l \cdot \vec{\delta b}^+] = [\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+] + r \cdot \vec{\xi}_l, l=1, \dots, L, \quad (13)$$

де $[\vec{b}_l + \vec{b}_l \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_l + \vec{b}_l \cdot \vec{\delta b}^+]$ – одна точка із набору, що претендують на «покращену» оцінку вектора $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]$ параметрів фільтра на k -тій ітерації; $\vec{\xi}_l$ –

одиничний випадковий вектор, рівномірно розподілений за усіма напрямками простору параметрів, які оптимізуються.

Вибір напрямку $\vec{\xi}^*$ найкращої спроби визначаємо так:

$$F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}^*) = \min_{l=1, \dots, L} (F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}_l)) \quad (14)$$

Основна складність у використанні розглянутої обчислювальної схеми полягає у виборі числа L . Чим більше значення L , тим вищою буде обчислювальна складність реалізації методу із цією процедурою, оскільки збільшується кількість поточних оцінок параметрів фільтра, для яких необхідно обчислювати значення функції мети за формулами (9) чи (10). Водночас зменшення значення L може призвести до збільшення кількості ітерацій обчислювального методу і тим самим підвищити його часову складність.

Процедура випадкового пошуку із використанням направляючого конуса (ВПіЗВНК). Розглянемо обчислювальну схему у процедурі випадкового пошуку мінімуму функції мети $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^+])$ із використанням направляючого конуса [11].

На початковій ітерації випадкового пошуку ($k=0$) задаємо початкове наближення вектора параметрів $[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^+]$. В околі цього наближення на поверхні уявної гіперсфери, радіусом r , тобто на відстані r від точки $[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^+]$ у просторі параметрів на основі рівномірного закону розподілу генеруємо n випадкових точок

$$[\vec{b}_n + \vec{b}_n \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_n + \vec{b}_n \cdot \vec{\delta}^+] = [\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}_n, n = 1, \dots, N. \quad (15)$$

Серед згенерованих точок вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети:

$$[\vec{b}_1 + \vec{b}_1 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_1 + \vec{b}_1 \cdot \vec{\delta}^+] = \arg \min_{n=1, \dots, N} (F([\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}_n)). \quad (16)$$

Отримана оцінка вектора параметрів фільтра є наближенням для наступної ітерації. Додатково у цій процедурі обчислюємо вектор пам'яті, який визначає успішний напрям пошуку:

$$\vec{w} = ([\vec{b}_1 + \vec{b}_1 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_1 + \vec{b}_1 \cdot \vec{\delta}^+] - [\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta}^+]) / r. \quad (17)$$

На наступних ітераціях у просторі параметрів будуємо уявний гіперконус із вершиною $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^+]$, яка є поточною оцінкою вектора параметрів, з кутом розкриття ψ і віссю \vec{w}_k . Цей гіперконус «відсікає» від гіперсфери з центром у точці $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^+]$ і радіусом r деяку поверхню. На отриманій поверхні в просторі параметрів генеруємо на основі рівномірного закону розподілу n випадкових

точок за формулою (15), де вектор $\vec{\xi}_n$ в даному випадку обчислюємо виходячи із обмежень на параметри конуса. Серед згенерованих точок вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети

$$[\vec{b}_{k+1} + \vec{b}_{k+1} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_{k+1} + \vec{b}_{k+1} \cdot \vec{\delta}^+] = \underset{n=1, \dots, N}{\operatorname{argmin}} (F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}_n)). \quad (18)$$

Отримана оцінка вектора параметрів є наближенням для наступної $k+1$ ітерації пошукової процедури. Додатково у цій процедурі перевизначаємо вектор пам'яті:

$$\vec{w}_{k+1} = \alpha \cdot \vec{w}_k + \beta \cdot \frac{[\vec{b}_{k+1} + \vec{b}_{k+1} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_{k+1} + \vec{b}_{k+1} \cdot \vec{\delta}^+] - [\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta}^+] }{r}, \quad (19)$$

де α - ($0 \leq \alpha \leq 1$) – коефіцієнт забування, а β – коефіцієнт інтенсивності врахування нової інформації.

Пошук продовжується до тих пір, поки зменшується значення функції мети. Якщо ж значення функції мети не зменшується на певній ітерації, то замість конуса використовуємо гіперсферу, як на початковій ітерації для заданого вектора оцінок параметрів. Якщо ж і далі серед згенерованих точок неможливо знайти точку, яка забезпечує зменшення функції мети, то у цьому випадку налаштуємо довжину кроку r , як правило зменшуємо її.

Процедура випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку (ВПіЗАРВК). Основною характеристикою цього розподілу є математичне сподівання $M(\vec{\xi})$. Суть випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку полягає у зміні $M(\vec{\xi})$ таким чином, щоб якомога більше враховувати «історію» пошуку, а саме «успішні» кроки. Отже, математичне сподівання випадкового напрямку $\vec{\xi}$ змінюватимемо із урахуванням вектора пам'яті \vec{w}_{k+1} . Тоді вектор, що задає випадковий напрямок у задачі пошуку, матиме вигляд

$$\vec{\xi}_{k+1} = \vec{\xi}_0 + \vec{w}_{k+1}, \quad (20)$$

де $\vec{\xi}_0$ – деякий «нульовий вектор», що задається математичним сподіванням початкового розподілу.

Вектор пам'яті \vec{w}_{k+1} визначає зміщення «випадкового руху» в процесі пошуку. Передбачається, що це зміщення має бути направлене у бік, де функція мети набуває нульового значення. У цьому випадку вектор пам'яті відображає історію пошуку і коригує перспективний напрям руху до мети. При цьому напрямок \vec{w}_{k+1} на кожній ітерації коригується.

Очевидно, що у такому підході закладено певну евристику: напрям потрібно формувати як зважену суму випадкових кроків, причому «успішні» кроки потрібно брати із позитивними вагами, а «неуспішні» – з від'ємними. При цьому перевага повинна надаватися даним із «короткою історією».

Дослідження обчислювальної складності методу синтезу аналогового фільтра при заданих допустимих значеннях модуля коефіцієнта передавання та заданих допусках на параметри його елементів.

Розглянемо обчислювальну складність описаних вище методів випадкового пошуку на прикладі аналогового фільтра, представленого на рис.1. Задамо необхідні номінальні значення модуля коефіцієнта передавання $|K(f_i)| = K_{0i}, i = 1, \dots, N$ на різних частотах і допустимі відхилення від цих значень у межах 20%, тобто $\delta K_i = 0,2$ (табл.1).

Допустимі значення для цієї характеристики на різних частотах представлено у табл.1 та на рис.3.

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	70700	0,295810306	0,236648245	0,354972
2	70750	0,324681261	0,259745009	0,389618
3	70800	0,359323772	0,287459018	0,431189
4	70850	0,401452582	0,321162066	0,481743
5	70900	0,453384085	0,362707268	0,544061
6	70950	0,518154327	0,414523461	0,621785
7	71000	0,599350631	0,479480504	0,719221
8	71050	0,699805336	0,559844269	0,839766
9	71100	0,816863688	0,65349095	0,980236
10	71150	0,931096493	0,744877195	1,117316
11	71200	0,997002478	0,797601983	1,196403
12	71250	0,973189315	0,778551452	1,167827
13	71300	0,87619141	0,700953128	1,05143
14	71350	0,756847583	0,605478066	0,908217
15	71400	0,647525248	0,518020198	0,77703
16	71450	0,557289514	0,445831611	0,668747
17	71500	0,48507222	0,388057776	0,582087
18	71550	0,427376843	0,341901475	0,512852
19	71600	0,380851292	0,304681033	0,457022
20	71650	0,342842745	0,274274196	0,411411
21	71700	0,311367179	0,249093743	0,373641

Задамо допуски на усі параметри елементів фільтра у розмірі 5%, тобто $\delta b_j^- = -0,05$, а $\delta b_j^+ = 0,05$, та представимо вектор параметрів елементів фільтра в інтервальному вигляді $[0,95\vec{b}_0; 1,05\vec{b}_0] = ([0,95R_0; 1,05R_0], [0,95C_0; 1,05C_0], [0,95L_0; 1,05L_0])$.

Підставимо отриманий допусковий вектор параметрів у ІСНАР(6) та отримаємо

$$\left\{ \begin{array}{l}
 K_{01}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[0,95R_0;1,05R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot [0,95L_0;1,05L_0]} - 2\pi \cdot f_1 \cdot [0,95C_0;1,05C_0] \right)^2 + 1}} \leq K_{01}^+ \\
 \dots \\
 K_{0i}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[0,95R_0;1,05R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_i \cdot [0,95L_0;1,05L_0]} - 2\pi \cdot f_i \cdot [0,95C_0;1,05C_0] \right)^2 + 1}} \leq K_{0i}^+ \\
 \dots \\
 K_{0N}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[0,95R_0;1,05R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_n \cdot [0,95L_0;1,05L_0]} - 2\pi \cdot f_n \cdot [0,95C_0;1,05C_0] \right)^2 + 1}} \leq K_{0N}^+
 \end{array} \right. \quad (21)$$

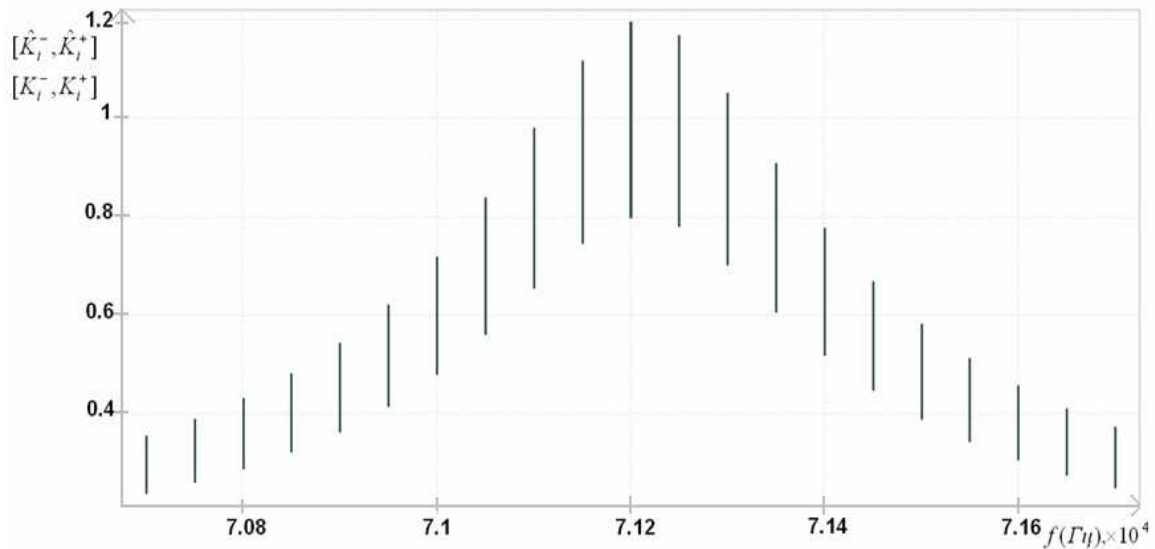


Рисунок 3. Допустимі (інтервальні) значення для модуля коефіцієнта передавання аналогового фільтра

Figure 3. Acceptable (interval) values for modulus of the analog filter transmission coefficient

Програмна реалізація проводилась на ПК з такими характеристиками: 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 усіх методів наведена на рис.4. Кількість випадковим чином згенерованих, згідно з рівномірним законом розподілу, точок у просторі параметрів на відстані радіуса від початково заданого вектора параметрів дорівнює 100. Загальна кількість ітерацій 1.000.000, яку можна збільшити, якщо «якість» оцінювання не буде досягнуто.

Початкові дані:

Радіус:

Кількість випадково згенер. чисел:

Кількість ітерацій:

Рисунок 4. Форма введення початкових даних для методів випадкового пошуку

Figure 4. The form of introduction initial data for random search methods

Рис.5 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку із лінійною тактикою. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [945,25; 1044,75] Ом$ $[C^-; C^+] = [0,46; 0,5] мкФ$ $[L^-; L^+] = [8,5; 9,5] мкГн$. Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 3.925.148 ітерацій, на які витрачено більше 40 хвилин часу.

Рис.6 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку за найкращою спробою. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [940,5; 1039,5] Ом$ $[C^-; C^+] = [0,48; 0,53] мкФ$ $[L^-; L^+] = [8,7; 9,7] мкГн$. Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 3.787.209 ітерацій, на які витрачено трохи менше 40 хвилин часу.

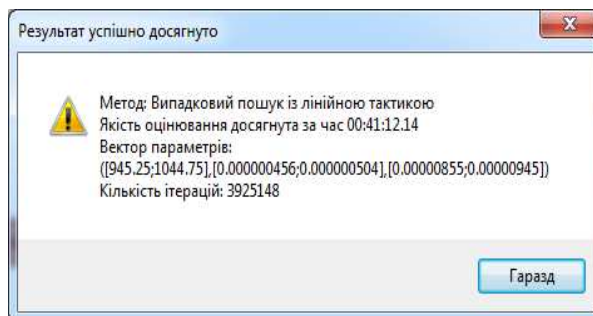


Рисунок 5. Результат виконання методу випадкового пошуку із лінійною тактикою

Figure 5. The result of random search method performance with linear tactics

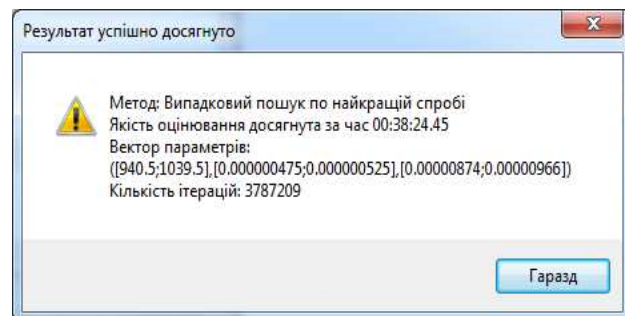


Рисунок 6. Результат виконання методу випадкового пошуку за найкращою спробою

Figure 6. The result of random search method performance in the best attempt

Рис.7 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку із використанням направляючого конуса. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [948,1; 1047,9] Ом$ $[C^-; C^+] = [0,48; 0,53] мкФ$ $[L^-; L^+] = [9,5; 10,5] мкГн$. Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 1.928.327 ітерацій, на які було витрачено близько 20 хвилин часу.

Рис.8 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [950,0; 1050,0] Ом$ $[C^-; C^+] = [0,38; 0,42] мкФ$ $[L^-; L^+] = [8,5; 9,5] мкГн$. Для їх пошуку обчислювальною

процедурою було реалізовано 2.803.751 ітерацій, на які було витрачено близько 30 хвилин часу.

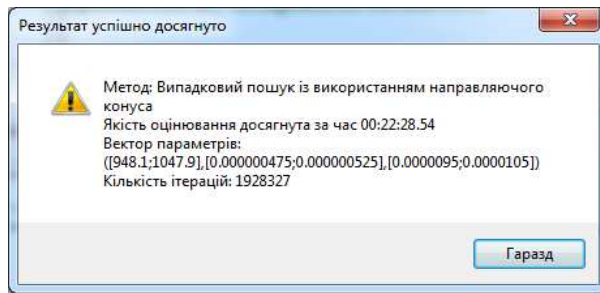


Рисунок 7. Результат виконання методу випадкового пошуку з використанням направляючого конуса

Figure 7. The result of random search method performance taking advantage of directional cone

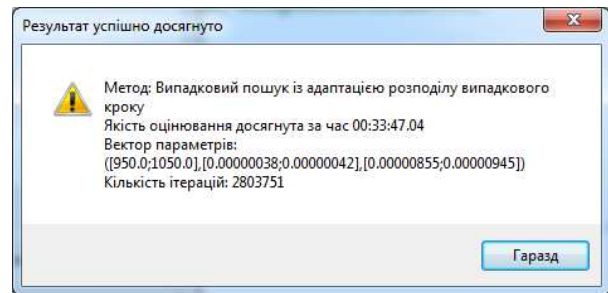


Рисунок 8. Результат виконання методу випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку

Figure 8. The result of random search method performance with random step adaptation

На рис.9 наведено характеристику модуля коефіцієнта передавання аналогового фільтра з урахуванням заданих допусків на параметри фільтра для кожного з представлених вище методів. Пунктирною лінією наведена характеристика модуля коефіцієнта передавання розрахована за методом випадкового пошуку із лінійною тактикою, одинарною лінією – характеристика, розрахована методом випадкового пошуку за найкращою спробою, штрих-пунктирною лінією – характеристика, розрахована методом випадкового пошуку із використанням направляючого конуса, та потовщеною лінією – характеристика, розрахована методом випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку. Вертикальними відрізками наведені інтервали допустимих значень, які визначають функціональну придатність фільтра. Як бачимо з рис.9, характеристика синтезованого фільтра на заданих частотах знаходиться в допустимих межах.

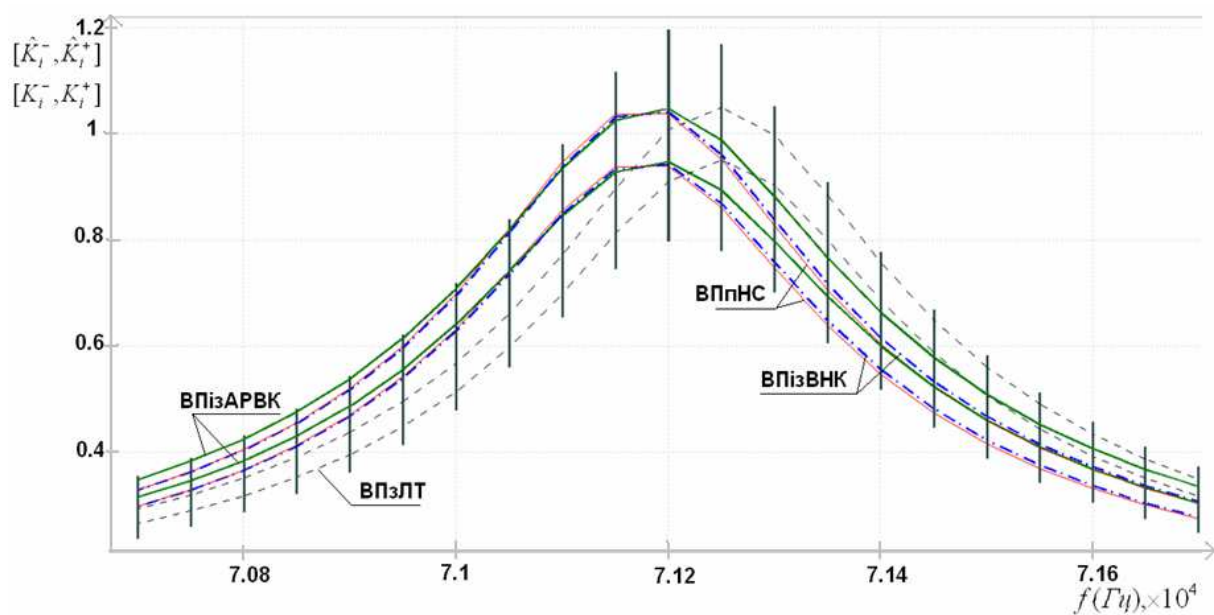


Рисунок 9. Інтервальні оцінки модуля коефіцієнта передавання аналогового фільтра при застосуванні різних процедур випадкового пошуку

Figure 9. Interval estimation of module of the analog filter transfer coefficient while using different random search procedures

На рис.10. графіком представлено порівняння часової складності застосування для задачі синтезу аналогового фільтра методів випадкового пошуку. З порівняльного графіка бачимо, що найкращим за часовою складністю до вказаної задачі є метод випадкового пошуку із використанням направляючого конуса.

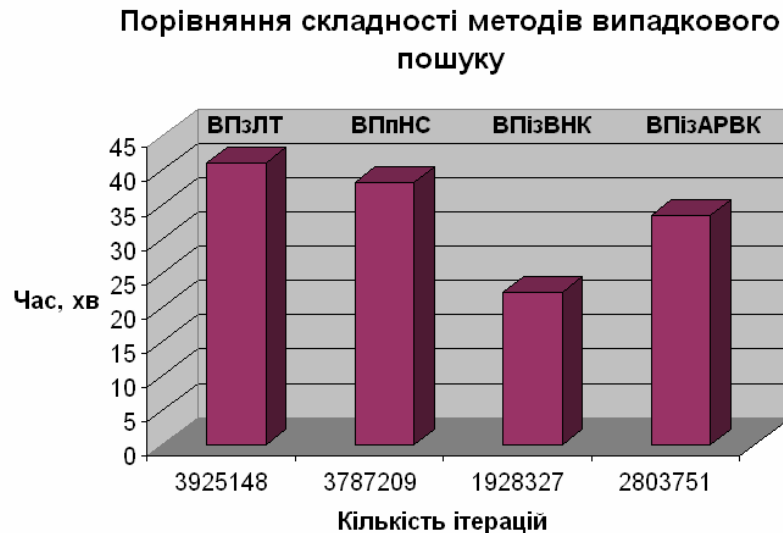


Рисунок 10. Графік порівняння часової складності методів випадкового пошуку

Figure 10. Graph of the time complexity comparison of the random search methods

Висновки. Проведено порівняльний аналіз задачі синтезу радіоелектронних пристроїв з заданими обмеженнями на вихідні характеристики та при заданих допусках на параметри елементів. Порівняльний аналіз проведено на прикладі синтезу параметрів елементів аналогового фільтра. Показано, що задача синтезу є задачею розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь і зводиться до деякої оптимізаційної задачі. Обґрунтовано метод побудови цільової функції задачі синтезу РЕП із заданими обмеженнями на вихідні характеристики та при заданих допусках на параметри елементів.

В процесі дослідження методів синтезу РЕП розглянуто різні процедури випадкового пошуку при реалізації методів синтезу, зокрема: метод випадкового пошуку із лінійною тактикою; метод випадкового пошуку за найкращою спробою; метод випадкового пошуку із використанням направляючого конуса; метод випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку.

Встановлено, що найефективніший метод синтезу РЕП, який ґрунтується на процедурі випадкового пошуку із використанням направляючого конуса. Зокрема, часова складність реалізації методу на 91% вища, ніж при використанні методу випадкового пошуку із лінійною тактикою, на 65% – методу випадкового пошуку за найкращою спробою та на 47% – методу випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку.

Conclusions. Comparative analysis of the task on synthesis of radio-electronic devices with the specific limits on the output characteristics and under given tolerances on the

element parameters have been carried out. It was carried out on the example of the analog filter elements parameters synthesis.

It was shown that the synthesis task is the task of solution of the non-linear algebraic equations interval system and is reduced to some optimization task. The method for constructing of the objective function of the RED synthesis task with given limits on the output characteristics and under given elements parameter tolerances has been interpreted.

While investigating different methods of RED synthesis, different random search procedures for implementation of synthesis methods have been analyzed: the random search methods with linear tactics, the method of random search under the most favorable attempt, the method of random search taking advantage of the directional cone, the method of random search with random step adaptation.

The most effective method of RED synthesis was found to be the method based on the random search procedure taking advantage of the directional cone. Besides, the time complexity of the method implementation is by 91% higher than that used by the linear tactics random search method, by 65% higher than by the random search method under the most favorable attempt and by 47% higher than by the random search with random search adaptation.

Список використаної літератури.

1. Іноземцев, Г.Б. Математичне моделювання та оптимізація систем електроспоживання у сільському господарстві [Текст] / Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010. – 140 с.
2. Дивак, М.П. Вирішення задач синтезу допусків на параметри РЕК методом допускового еліпсоїдного оцінювання з використанням паралельних обчислень [Текст] / 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.
3. Дивак, М.П. Ітераційний метод пошуку допустимого розв'язку ІСЛАР у задачах ідентифікації параметрів динамічних моделей «вхід-вихід» [Текст] / М.П. Дивак, П.Г. Стахів, І.Я. Каліщук // Відбір та обробка інформації. – 2005. – Вип.23(99). – С.40–48.
4. Yuriij, Bobalo. Estimation of functional usability of radio electronic circuits by applying method of confidence ellipsoids [Text] / Yuriij Bobalo, Petro Stakhiv, Svitlana Krepych / Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Polytechnic National University, 2012. Volume 2, No.2, – P.1–7
5. Кривошейкин, А.В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей [Текст] / А.В. Кривошейкин. – М.: Радио и связь, 1983. – 136 с.
6. Дивак, М.П. Ідентифікація параметрів різницевого оператора в задачах моделювання процесів поширення забруднень методами аналізу інтервальних даних [Текст] / М.П. Дивак, А.В. Пукас, Т.М. Дивак // Зб. наук. праць ДонНТУ. Серія: інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2009. – Вип.10(153). – С.224–229.
7. Дивак, М.П. Кількісні характеристики оцінки якості структури моделі у вигляді інтервального різницевого оператора [Текст] / М.П. Дивак, Т.М. Дивак, І.Ф. Войтюк // Відбір і обробка інформації. Міжвідомчий збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 34 (110).
8. Стахів, П.Г. Синтез радіоелектронних кіл при заданих обмеженнях на вихідні характеристики та за умов заданих допусків на параметри елементів [Текст] / П.Г. Стахів, М.П. Дивак, С.Я. Крепич // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Міжнародний науково-технічний журнал. – 2014. – Вип.№3(48). –С.39–47.
9. Растрингин, Л.А. Адаптация сложных систем [Текст] / Л.А. Растрингин. – Рига: Зинатне, –1981. – 359 с.
10. Алексеева, Е.В. Численные методы оптимизации: учебное пособие [Текст] / Е.В. Алексеева, О.А. Кутненко, А.В. Плясунов. – Новосибирск, –2008. – 126 с.
11. Дивак, Т.М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння [Текст] / Т.М. Дивак //

Міжнародний науково-технічний журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». – 2012. – Вип.3. – С.79–85.

Отримано 12.01.2015