

УДК 519.876.5

С. Я. КРЕПИЧ, М. П. ДИВАК

Тернопільський національний економічний університет

ПОРІВНЯННЯ ЧАСОВОЇ СКЛАДНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУР ВИПАДКОВОГО ПОШУКУ В ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ ФІЛЬТРА ТА ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

Анотація. В статті розглянуто приклад задачі синтезу аналогового фільтра при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик. Обґрунтовано метод побудови цільової функції задачі та наведено приклад перетворення задачі синтезу до оптимізаційної задачі для пошуку хоча б одного розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Однак суттєвою різницею застосування зазначеного методу в праці є використання при обчисленні інтервалів значень вихідних характеристик не просто оцінки вектора номінальних значень параметрів (як це в класичних схемах), а певні обчислені інтервальні оцінки цього вектора, які обумовлені допусками на параметри елементів.

Ключові слова: методи випадкового пошуку, вихідна характеристика, допуски на параметри

Аннотация. В статье рассмотрен пример задачи синтеза аналогового фильтра при заданных допустимых значениях исходных характеристик. Обоснован метод построения целевой функции задачи и приведен пример преобразования задачи синтеза к оптимизационной задаче для поиска хотя бы одного решения интервальной системы нелинейных алгебраических уравнений. Однако существенной разницей применения данного метода в работе является использование при исчислении интервалов значений исходных характеристик не просто оценки вектора номинальных значений параметров (как это в классических схемах), а определенные вычисленные интервальные оценки этого вектора, которые обусловлены допусками на параметры элементов.

Ключевые слова: методы случайного поиска, исходная характеристика, допуски на параметры

Abstract. At the article considers the sample of the task of analysis analog filter for specified admissible values of output characteristics and tolerances on the parameters of its elements. Was grounded method for constructing of the objective function of task of the analog filter synthesis and presented example of converting synthesis problem to an optimization problem to find at least one solution ISNAE. However, a essential difference in the use of this method in work is the use for the calculation of interval values of output characteristics not only evaluation vector of nominal parameter values (as in the classical schemes), but some calculated interval valuations of this vector, which are caused by the specified tolerances for the parameters of element.

Keywords: procedures of random search, output characteristics, tolerance of the parameters.

Вступ

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 з врахуванням їх відхилень, які задаються допусками, забезпечити функціональну придатність радіоелектронного пристрою. Зазначені задачі мають велику практичну значущість [2].

На сьогоднішній день існуючі методи розв'язку задач синтезу радіоелектронних пристроїв досить часто використовують процедури випадкового пошуку. Серед найбільш відомих методів синтезу радіоелектронних пристроїв при одночасному заданні допустимих значень вихідних характеристик відомими є такі процедури випадкового пошуку: з лінійною тактикою; по найкращій спробі; із використанням направляючого конуса; із адаптацією розподілу випадкового кроку [3]. Разом з тим часову складність реалізації цих процедур саме для задач синтезу радіоелектронних пристроїв за умови заданих допустимих значень вихідних характеристик є малодослідженою.

Методи синтезу радіоелектронних пристроїв описані в працях [4, 6, 7]. Методи синтезу радіоелектронних пристроїв при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик в яких використовуються також процедури випадкового пошуку наведені у працях [8, 9]. Проте, на сьогодні, 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.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу часової складності методів синтезу радіоелектронних пристроїв при одночасному заданні допустимих значень вихідних характеристик та допусків на параметри його елементів з застосування різних процедур випадкового пошуку і на цій основі обґрунтування вибору методу з мінімальною часовою складністю. Для реалізації мети пропонується використати приклад синтезу аналогового фільтра.

Постановка задачі

Розглянемо приклад синтезу аналогового фільтра представленого схемою на рис. 1 при заданих допустимих значеннях його модуля коефіцієнта передачі на різних частотах.

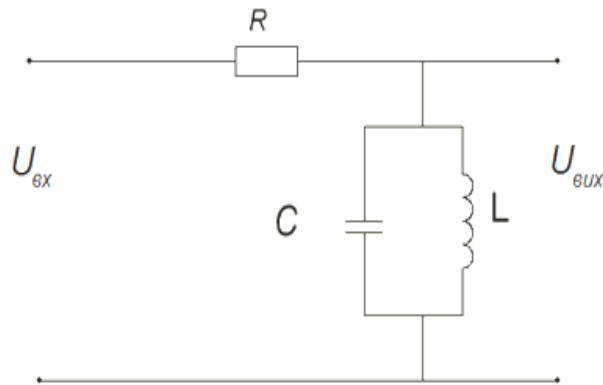


Рисунок 1 – Схема аналогового фільтра

Вираз для обчислення модуля коефіцієнта передачі фільтра, зображеного на рисунку 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 приймемо модуль коефіцієнта передачі на різних частотах [5]. 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

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

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

Позначимо 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, також невідомими є їх допуски $\delta R, \delta C, \delta L$. Задамо обмеження на модуль коефіцієнта передачі для різних частот у вигляді:

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

Тепер підставимо в систему (5) інтервали $[R_0^-; R_0^+]$, $[C_0^-; C_0^+]$, $[L_0^-; L_0^+]$, які представляють допуски на параметри елементів разом з номінальними значеннями параметрів R_0, C_0, L_0 у формулі (1). Тоді отримуємо інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР):

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

Розв’язок цієї системи є не опуклою областю в просторі параметрів елементів радіоелектронних кіл. Тому будемо шукати деяку апроксимацію цієї області у вигляді вписаного прямокутного паралелепіпеда. Такий підхід забезпечує одночасне знаходження параметрів РЕК і їх допусків. Для знаходження зазначеного розв’язку використовуємо методи інтервальної арифметики. При цьому, враховуючи множинність розв’язків інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь(6), для знаходження хоча б одного розв’язку із множини скористаємось, за аналогією, результатами праці [6], перетворивши зазначену задачу до дискретної оптимізаційної задачі:

$$F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]) \xrightarrow{\vec{b}_k, \vec{\delta b}_k} \min, \vec{b}_j > 0, \delta b_j > \delta b_j^z, j = 1..m \quad (7)$$

де δb_j^z - задані мінімально допустимі для даної схеми допуски на параметри елементів, $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+])$ - 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 $F([\vec{b}_1]) > \dots > F([\vec{b}_k]) > \dots > F([\vec{b}_{k=K}] = [\vec{b}_0]) \in \Omega$ за скінчену та якомога меншу кількість ітерацій $k = K$.

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.

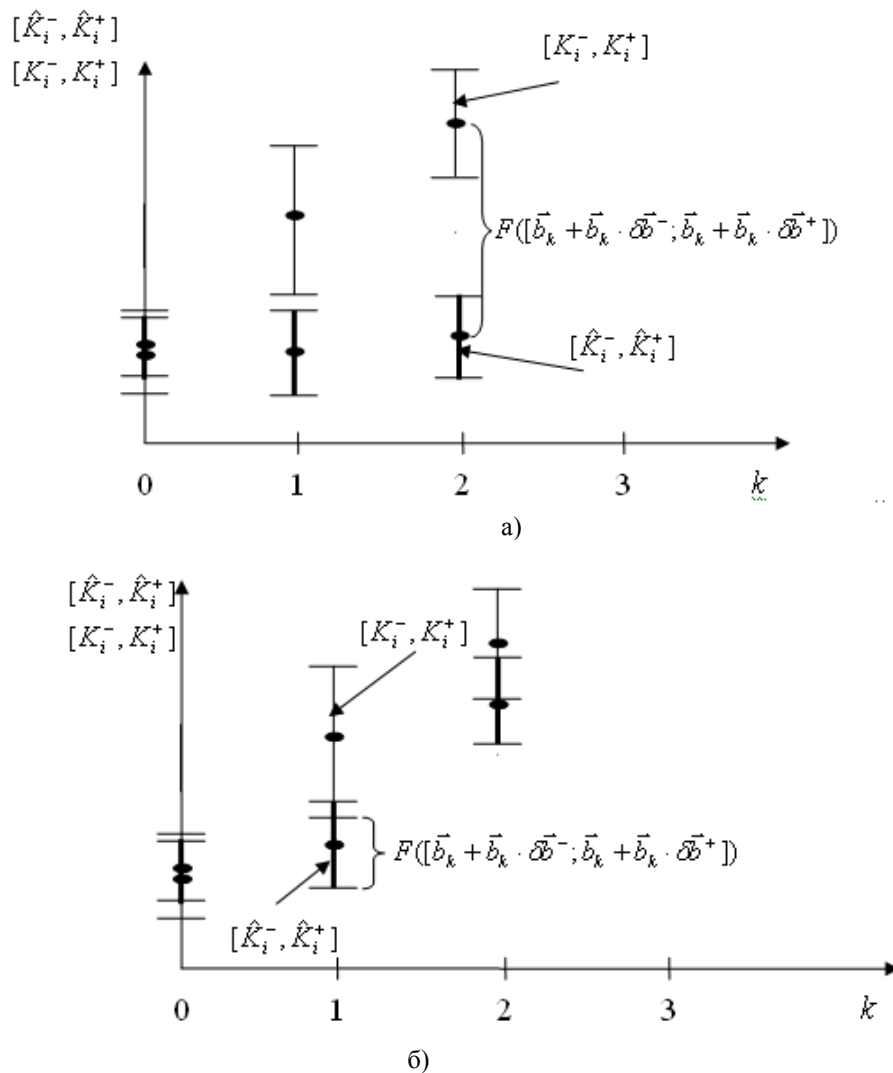


Рисунок 2 – Ілюстрація для визначення функції мети в задачі синтезу: а) випадок $[\hat{K}_i^-, \hat{K}_i^+] \cap [K_i^-, K_i^+] = \emptyset$, б) випадок $[\hat{K}_i^-, \hat{K}_i^+] \cap [K_i^-, K_i^+] \neq \emptyset$

На рисунку 2 наведені 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 витікає 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 $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-, \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+])$ визначаємо, як різницю центрів найбільш віддалених між собою інтервалів $[\hat{K}_i^-, \hat{K}_i^+], i = 1, \dots, N$, отриманих для поточного наближення вектора оцінок параметрів $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-, \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+]$, та відповідних заданих інтервалів $[K_{0i}^-, K_{0i}^+]$ - у випадку, коли найбільш віддалені між собою інтервали

для i -ї вихідної характеристики не перетинаються. Формально зазначену умову запишемо у такому вигляді:

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

якщо $[\hat{K}_i^-; \hat{K}_i^+] \cap [K_{0i}^-; K_{0i}^+] = \emptyset \quad \exists i = 1, \dots, N$, 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 $F([\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+])$ в задачі (7) визначатимемо у такому вигляді:

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

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 рисунку 2 а) та б).

Перейдемо до розгляду методів розв’язування задачі (7). Одним з методів пошуку невідомого вектора параметрів аналогового фільтра є метод випадкового пошуку. Метод випадкового пошуку застосовано для подібних задач розглядався в багатьох працях, зокрема в [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 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 фільтра.

Виходячи з вище викладеного, для розв’язування задачі синтезу аналогового фільтра у вигляді задачі оптимізації (4), пропонується розглянути та дослідити процедури випадкового пошуку, які описано у [9]:

- випадковий пошук із лінійною тактикою;
- випадковий пошук по найкращій спробі;
- випадковий пошук із використанням направляючого конуса;
- випадковий пошук із адаптацією розподілу випадкового кроку.

В основі обчислювальних схем розглянутих у [9] є правила урахування історії пошуку у послідовності $[\bar{b}_1] \rightarrow [\bar{b}_2] \rightarrow \dots \rightarrow [\bar{b}_i] \rightarrow \dots \rightarrow [\bar{b}_k]$. Зокрема, основним правилом, на яких ґрунтуються процедури випадкового пошуку та обчислювальні схеми оптимізації, є правило, що імовірність вдалого кроку у напрямку який був успішним на попередніх ітераціях, тобто коли функція мети зменшувалась, 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 та їх допусків $\bar{B} = (\bar{b}_k, \delta\bar{b}_k)$, або повторення кроку за аналогією з попередньою ітерацією. Дія кожного із них може привести до одного з двох результатів: значення функції $F([\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^-; \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta\bar{b}^+])$ або зменшиться, або залишиться без змін. Процедура випадкового пошуку з лінійною тактикою спирається на наступне очевидне припущення відносно об’єкта оптимізації: ймовірність вдалого кроку у напрямку який був успішним на попередній ітерації, тобто коли функція мети зменшувалась, 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 вигляді:

$$\bar{B}_k = \bar{B}_{k-1} + \Delta\bar{B}_k \quad (11)$$

де

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

r – поточний радіус; $\vec{\xi}$ – одиничний випадковий вектор, рівномірно розподілений за усіма напрямками простору параметрів, що оптимізуються, та їх допусків; $\Delta \vec{B}_k, \Delta \vec{B}_{k-1}$ – величина кроку на k -тій та на $k-1$ ітераціях.

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

Розглянемо специфіку і можливості описаної обчислювальної схеми. Нехай p – ймовірність того, що величина випадкового кроку $\Delta \vec{B}_k = r \cdot \vec{\xi}$ 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 $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^+])$, 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 по найкращій спробі (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:

$$\vec{B}_l = \vec{B}_{k-1} + r \cdot \vec{\xi}_l, l = 1, \dots, L \quad (13)$$

де \vec{B}_l – одна інтервальна точка із набору, що претендують на «покрашену» оцінку вектора \vec{B}_k 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 наступним чином:

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

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). В той же час 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 . В околі цього наближення на поверхні уявної гіперсфери, радіусом r , тобто на відстані r від точки \vec{B}_0 в просторі параметрів на основі рівномірного закону розподілу генеруємо n випадкових точок:

$$\vec{B}_n = \vec{B}_0 + r \cdot \vec{\xi}_n, n = 1, \dots, N \quad (15)$$

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

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

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

$$\vec{w} = (\vec{B}_1 - \vec{B}_0) / r. \quad (17)$$

На наступних ітераціях в просторі параметрів будуємо уявний гіперконус із вершинами в точках $\vec{B} = (\vec{b}_k, \vec{\delta}_k)$, яка є поточною оцінкою вектора параметрів, з кутом розкриття ψ і віссю \vec{w}_k . Цей гіперконус «відсікає» від гіперсфери з центрами в точках $\vec{B} = (\vec{b}_k, \vec{\delta}_k)$ і радіусом r деякі поверхні. На отриманих поверхнях в просторі параметрів та їх допусків 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 конусів. Серед згенерованих точок вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети:

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

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

$$\vec{w}_{k+1} = \alpha \cdot \vec{w}_k + \beta \cdot \frac{\vec{B}_{k+1} - \vec{B}_k}{r}, \quad (19)$$

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 не можливо 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 такий 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 в сторону, де функція мети набуває нульового значення. У цьому випадку вектор пам'яті відображає історію пошуку і корегує перспективний напрям руху до мети. При цьому напрямок \vec{w}_{k+1} на кожній ітерації корегується.

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».

II. Дослідження обчислювальної складності методу синтезу фільтра та допусків на параметри його елементів при заданих допустимих значеннях модуля коефіцієнта передачі

Розглянемо обчислювальну складність вище описаних методів випадкового пошуку на прикладі аналогового фільтра представленого на рисунку 1. 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 $\delta K_i = 0,2$. (табл.1.)

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

Таблиця 1 – Обмеження на вихідні характеристики РЕК на різних частотах

i	$f_i, \Gamma\text{ц}$	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

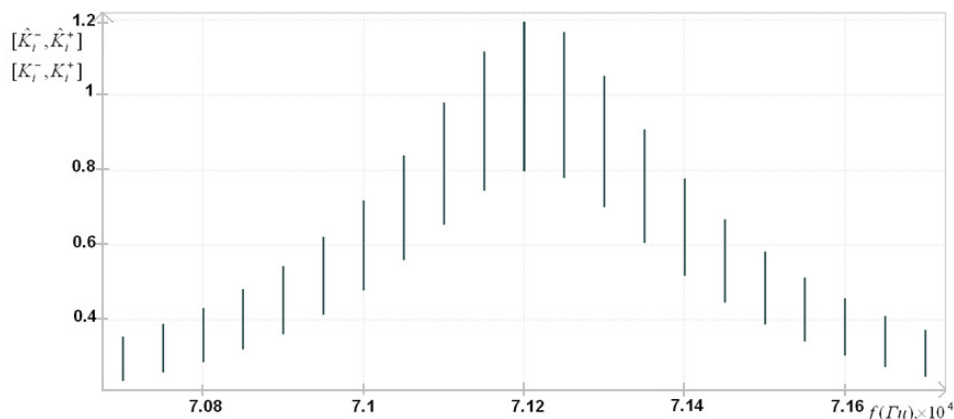


Рисунок 3 – Допустимі (інтервальні) значення для модуля коефіцієнта передачі аналогового фільтра

Програмна реалізація проводилась на ПК з 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 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.

Початкові дані:

Радіус:

Кількість випадково згенер. чисел:

Кількість ітерацій:

Рисунок 4 – Форма введення початкових даних для методів випадкового пошуку

Рис. 5 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку із лінійною тактикою. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [945,25; 1044,75] \text{ Ом}$ $[C^-; C^+] = [0,46; 0,5] \text{ мкФ}$ $[L^-; L^+] = [8,5; 9,5] \text{ мкГн}$.

Рис. 6 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку по найкращій спробі. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [940,5; 1039,5] \text{ Ом}$ $[C^-; C^+] = [0,48; 0,53] \text{ мкФ}$ $[L^-; L^+] = [8,7; 9,7] \text{ мкГн}$.

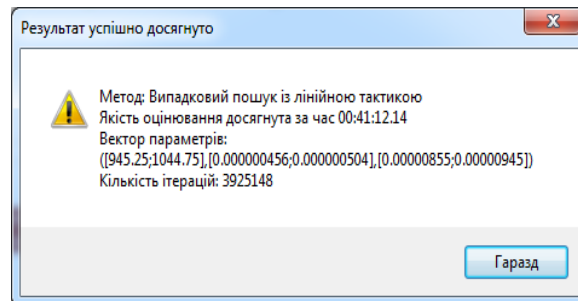


Рисунок 5 – Результат виконання методу випадкового пошуку із лінійною тактикою

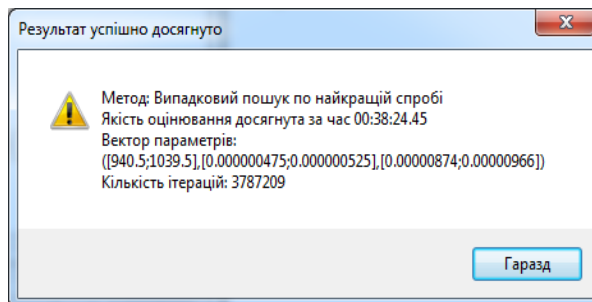


Рисунок 6 – Результат виконання методу випадкового пошуку по найкращій спробі

Рис. 7 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра методом випадкового пошуку із використанням направляючого конуса. Інтервали значень для отриманих параметрів: $[R^-; R^+] = [948,1; 1047,9] \text{ Ом}$ $[C^-; C^+] = [0,48; 0,53] \text{ мкФ}$ $[L^-; L^+] = [9,5; 10,5] \text{ мкГн}$.

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

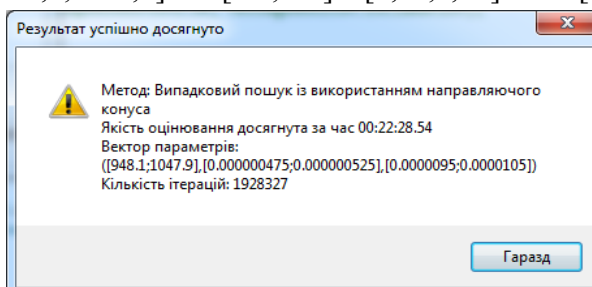


Рисунок 7 – Результат виконання методу випадкового пошуку з використанням направляючого конуса

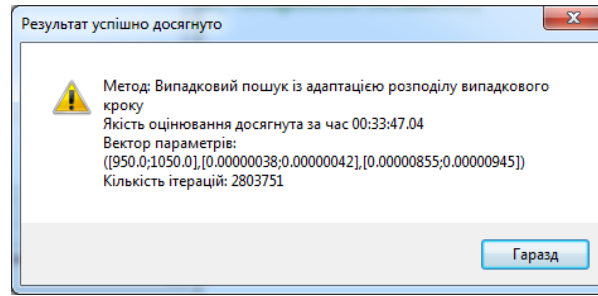


Рисунок 8 – Результат виконання методу випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку

На рис. 9 наведено характеристику модуля коефіцієнта передачі аналогового фільтра з урахуванням заданих допусків на параметри фільтра для кожного з вище представлених методів. Пунктирною лінією наведена характеристика модуля коефіцієнта передачі розрахована методом випадкового пошуку із лінійною тактикою, одинарною лінією – характеристика розрахована методом випадкового пошуку по найкращій спробі, 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.

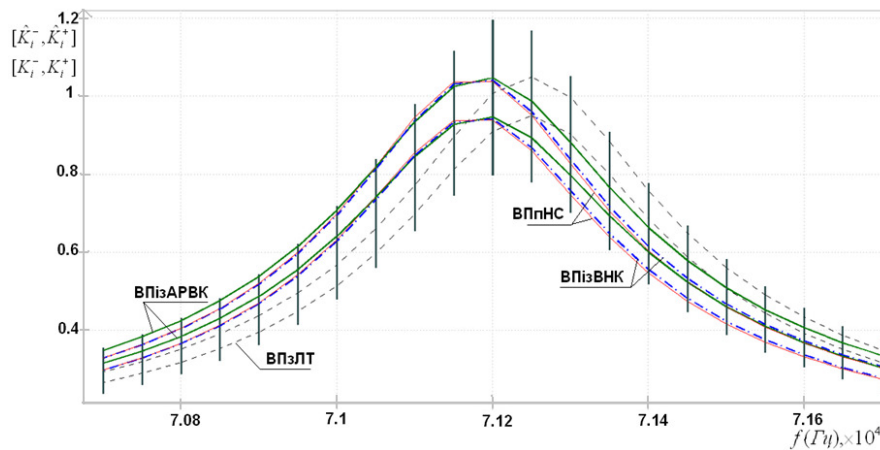


Рисунок 9 – Інтервальні оцінки модуля коефіцієнта передачі аналогового фільтра при застосуванні різних процедур випадкового пошуку

На рис. 10 у вигляді гістограми представлено порівняння часової складності застосування для задачі синтезу аналогового фільтра методів випадкового пошуку. З порівняльної діаграми видно, що найкращим по часовій складності до вказаної задачі є метод випадкового пошуку із використанням направляючого конуса.

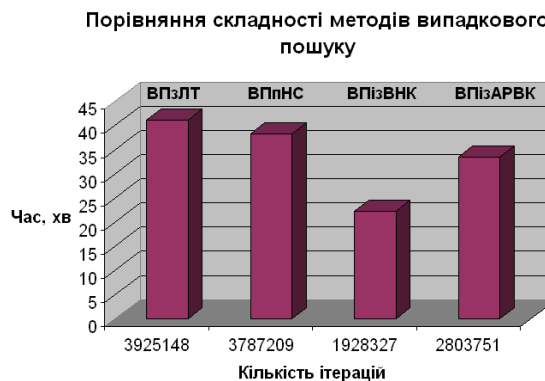


Рисунок 10 – Порівняння часової складності методів випадкового пошуку

III. 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 по найкращій спробі; метод випадкового пошуку із використанням направляючого конуса; метод випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку.

Встановлено, що найбільш ефективний 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 по найкращій спробі та на 47% - методу випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку.

Список використаних джерел

1. Крепич С.Я. Метод синтезу смугового фільтра для заданих обмежень на його модуль коефіцієнта передачі/ С.Я.Крепич/ Сучасні комп’ютерні інформаційні технології: Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ’2014. – Тернопіль: Економічна думка, 2014. – С.26-29
2. 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
3. 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.
4. 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
- 5.Кривошейкин А.В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей/ А.В. Кривошейкин. – М.:Радио и связь, 1983. -136с.
6. 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// 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 / М.П. Дивак, Т.М. Дивак, І. Ф. Войтюк // Відбір і обробка інформації. Міжвідомчий збірник наукових праць. – Вип. 34 (110). – 2011
8. Стахів П.Г. Синтез радіо-електронних кіл при заданих обмеженнях на вихідні характеристики та за умова заданих допусків на параметри елементів /П.Г.Стахів, М.П.Дивак, С.Я.Крепич// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Міжнародний науково-технічний журнал, Хмельницьк. – Вип.№3(48), 2014. – С.39-47.
9. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растринин - Рига: Зинатне, 1981,- 359 с.
10. Алексеева Е.В. Численные методы оптимизации/Е.В.Алексеева, О.А.Кутненко, А.В.Плясунов//Учебное пособие, Новосибирск, 2008. – 126с.
11. Дивак Т.М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння / Т.М. Дивак // Міжнародний науково-технічний журнал “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія”. Вип 3. - 2012.- С.79-85.

Відомості про авторів

Крепич Світлана Ярославівна – аспірант кафедри комп’ютерних наук факультету комп’ютерних інформаційних технологій ТНЕУ.

Дивак Микола Петрович - д.т.н., професор кафедри комп’ютерних наук, декан факультету комп’ютерних інформаційних технологій ТНЕУ.