

О.В. Надобко, Л.А. Недоступ, Л.В. Чирун*, Т.В. Шестакевич*

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теоретичної радіотехніки і радіовимірювань,

*кафедра інформаційних систем та мереж

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕА НА СТАДІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ

© Надобко О.В., Недоступ Л.А., Чирун Л.В., Шестакевич Т.В., 2011

Наведено результати дослідження трьох методів оптимізації процесів забезпечення якості РЕА на стадії виготовлення – методу покрокової оптимізації, методів “золотого січення” та Хука-Дживса. За результатами досліджень та апробації цих методів сформульовані висновки та рекомендації щодо їх практичного застосування.

Ключові слова: технологічні процеси виготовлення РЕА, оптимізація технологічних процесів, методи оптимізації процесів забезпечення якості РЕА.

The results of three optimization methods of quality assurance processes of radio electronic equipment at the stage of production were researched – incremental optimization method, golden section search, and the Hook-Jeeves method. The research and testing of these methods have formulated conclusions and recommendations for their practical application.

Key words: technological processes of radio electronic equipment production, technological processes optimization, optimization methods of quality assurance processes of radio electronic equipment.

Вступ та постановка задачі

Якісні показники радіоелектронної апаратури (РЕА) значною мірою формуються та забезпечуються на стадії виготовлення. Тому важливою практичною задачею є вибір оптимальних (раціональних) варіантів організації виробничо-технологічних процесів виготовлення РЕА, об'єднуючи весь спектр проблем, пов'язаних з раціональним вибором технологічного та контрольного обладнання, організацією системи контролю, вибором переліку контрольованих параметрів і об'ємів контролю тощо. Розв'язанню цих задач присвячено багато наукових робіт, зокрема [1–6]. Можна стверджувати, що в цих та інших роботах розроблені теоретичні основи та методологія комплексного моделювання, дослідження та оптимізації процесів забезпечення якості РЕА, орієнтованих, передусім, на технологічні процеси (ТП) виготовлення РЕА.

Відповідно до запропонованої методології процедура дослідження ТП має декілька основних етапів – формалізоване подання реальних ТП, їх математичний опис, аналіз базових (наявних) варіантів ТП і власне їх оптимізація. Зрозуміло, що в наведеному переліку основною задачею є саме задача оптимізації ТП. Якщо в теоретичному плані основні принципи та підходи до оптимізації ТП є відомими, розроблені також критерії оптимальності, то для їх практичної реалізації потрібно дати відповіді на такі запитання: які конкретні методи придатні для розв'язання задач оптимізації ТП, чи можна використати відомі методи оптимізації і які, як їх адаптувати до розв'язання саме задач оптимізації ТП, як залежить вибір методу від виду, класу та складності ТП, чи дозволяє вибраний метод розв'язувати задачу оптимального керування процесами забезпечення якості РЕА тощо.

У запропонованій роботі наводяться результати комплексного дослідження трьох методів оптимізації ТП – методу покрокової оптимізації, методів “золотого січення” та Хука-Дживса. Для їх практичної реалізації розроблено відповідне програмне забезпечення, що дозволило не лише провести весь комплекс досліджень, а і адаптувати ці методи до розв'язання задач оптимізації ТП, провести порівняльний аналіз їх ефективності, виявити переваги та недоліки, дати практичні рекомендації щодо їх використання.

Основна частина

Задачі оптимізації ТП виготовлення РЕА належать до класу складних багатопараметричних та багатокритеріальних задач, що значною мірою визначає як вибір стратегії, критеріїв, так і методів оптимізації. Як критерії оптимальності, як правило, використовуються комплексні критерії, прикладом яких є техніко-економічні критерії. Одним із таких критеріїв є критерій мінімуму сумарних виробничих та експлуатаційних витрат. Оптимізація ТП за цим критерієм передбачає знаходження таких параметрів ТП (а в ідеалі також і структури ТП), під час практичної реалізації яких забезпечувались би задані властивості (параметри) РЕА за мінімальної суми виробничих та експлуатаційних витрат. У цьому разі функція сумарних витрат C_{Σ} в загальному задається так:

$$C_{\Sigma} = C(\{P_{np,0,i}\}, \{P_{e,k,i}\}, \{P_{k,i}\}, \{\kappa_{k,i}\}, \{C_{кон,k,i}\}, \{C_{k,i}\}, \{C_{експ,i}\}, N), \quad (1)$$

тут $\{P_{np,0,i}\}$ – імовірності пропуску дефектів з вхідного контролю; $\{P_{e,k,i}\}$ – імовірності введення дефектів при формуванні i -го параметра виробів на k -му кроці ТП; $\{P_{k,i}\}$ – імовірності правильного контролю i -го параметра на k -му кроці ТП; $\{\kappa_{k,i}\}$ – параметри глибини поопераційного контролю; $\{C_{кон,k,i}\}$ – витрати, пов'язані з проведенням контролю i -го параметра на k -му кроці ТП; $\{C_{k,i}\}$ – витрати на усунення дефектів, виявлених під час контролю; $\{C_{експ,i}\}$ – витрати на усунення дефектів виробництва виявлені на стадії гарантійної експлуатації; N – кількість виробів.

Множини параметрів, які входять в (1), подають у вигляді відповідних матриць, принципи формування та структури яких описані у вказаних вище роботах.

Один із варіантів конкретного задання функції (1) має такий вигляд:

$$C_{\Sigma} = (\kappa \cdot C_{кон}) + (C_k \cdot P_{одеф} \cdot P) + (C_{експ} \cdot P_{np}), \quad (2)$$

тут в дужках умовно показані скалярні добутки відповідних матриць.

Теоретично всі параметри функції (2) можуть виступати параметрами оптимізації. Однак на практиці серед них вибирають, насамперед, такі, які мають більший вплив на функцію (2), функціонально пов'язані з іншими параметрами, легко змінюються в умовах реального виробництва. Цим вимогам найбільше відповідають параметри глибини контролю, які формально задаються множиною $\{\kappa_{i,i}\}$. Отже, вибравши в якості параметрів оптимізації (i , відповідно, й параметрів керування ТП) параметри глибини контролю, задачу оптимізації ТП розв'язують шляхом оптимізації системи та процедур контролю ТП. Тому задача оптимізації ТП формулюється так:

$$\begin{aligned} \{\kappa_{i,i}\} &\rightarrow \{\kappa_{i,i}\}_{opt}, \\ C_{\Sigma} &= C_{\Sigma min} \end{aligned} \quad (3)$$

Розглянемо детальніше можливість використання для розв'язання задачі (3) вибраних трьох методів оптимізації – методу покрокової оптимізації, методів “золотого січення” та Хука-Дживса.

Суть методу покрокової оптимізації полягає в почерговому (окремо для кожного кроку ТП) пошуку такого значення параметра оптимізації, якому відповідає мінімальне значення сумарних витрат. Процедура пошуку, наприклад, для першого кроку ТП передбачає повний перебір значень $\kappa_{1,1}$, починаючи з κ_{min} (наприклад, 0,1) до κ_{max} (наприклад, $\kappa_{max} = 2 + 3$) із заданим кроком зміни. Початкові значення всіх параметрів $\kappa_{i,i}$ приймають рівними 1 (задають одиничною діагональною матрицею). Одиничні значення параметрів оптимізації відповідають базовій схемі організації контролю ТП. Після пошуку оптимального значення параметра оптимізації на першому кроці ТП знайдене значення $\kappa_{1,1}^{opt}$ фіксується і заноситься в матрицю оптимальних значень κ . Далі переходимо до другого кроку, здійснюючи незалежний пошук оптимального значення $\kappa_{2,2}^{opt}$, зберігаючи всі інші значення κ фіксованими. Завершенням процедури оптимізації є матриця оптимальних значень параметрів $\kappa_{i,i}$ для кожного кроку ТП.

Особливістю описаного методу оптимізації є можливість проведення процедури оптимізації в ітераційному режимі. Тобто знайдена матриця оптимальних значень κ^{opt} вважається початковою для другої ітерації, і процедура покрокової оптимізації починається уже зі значень κ^{opt} . Очікувалось, що така ітераційність процедури дасть змогу одержувати уточнені значення параметрів κ . Однак досвід показав, що вже після першої ітерації знаходяться оптимальні значення κ^{opt} . Тому можна передбачити, що на другій, третій ітераціях буде отримано лише незначні коректування κ^{opt} . Часто значення цих параметрів після другої та наступних ітерацій залишаються незмінними. З цього погляду рекомендується або обмежуватись однією ітерацією, або вибирати кількість ітерацій не більше ніж 2–3, що істотно зменшить час оптимізації, загалом, особливо за великої кількості кроків ТП і порівняно малому значенні дискретності зміни κ .

Аналіз функцій сумарних витрат для багатьох ТП, виявлені їх особливості – монотонність, унімодальність (наявність одного чітко вираженого мінімуму) тощо дають змогу передбачити, що для пошуку оптимальних (мінімальних) значень сумарних витрат можна використати відомий метод “золотого січення” [8]. У цьому разі, задаючи границі можливих значень глибини контролю на кожному кроці ТП, здійснюється процедура пошуку мінімального значення функції сумарних витрат з допустимою (заданою) точністю методом “золотого січення”. Після чого для знайденого значення витрат фіксується оптимальне значення параметра глибини контролю.

Подібно до методу покрокової оптимізації, метод “золотого січення” також реалізує принцип незалежного пошуку мінімумів сумарних витрат на кожному кроці ТП окремо. Тому як перший метод, так і другий не зовсім відповідають вимогам комплексної багатопараметричної оптимізації.

Метод Хука-Дживса [8], на відміну від двох попередніх, дає можливість реалізувати принцип багатопараметричної оптимізації, а значить отримати глобальний мінімум. Для цього в n -вимірному просторі значень κ формується базова точка (такою точкою, як варіант, може виступати точка, яка відповідає одиничним значенням параметрів глибини контролю), починаючи з якої за спеціальним алгоритмом відбувається переміщення в точку з найменшим значенням сумарних витрат. Особливістю реалізації методу Хука-Дживса для розв’язання задач оптимізації ТП є обмеження області пошуку оптимальних значень κ^{opt} лише областю додатних значень.

Результати та порівняльний аналіз експериментальних досліджень

Для тестування методів оптимізації взято типовий ТП виготовлення друкованих плат хімічним методом. Цей технологічний процес вибрано із таких міркувань. По-перше, для нього сформовано достатньо повний та достовірний обсяг вхідних даних, а по-друге, уже відомі результати його комплексного дослідження, зокрема також і оптимізацію, які були отримані раніше і опубліковані, наприклад, в [1].

Відповідно до методології моделювання досліджуваний ТП виготовлення друкованих плат подано у вигляді 6-крокового процесу, основними етапами (кроками) якого є: виготовлення заготовок та виконання базових отворів, підготовка поверхні та нанесення рисунку друкованої плати, свердлування монтажних отворів, хімічне міднення та гальванічне наросування провідників, травлення фольги, оброблення друкованих плат по контуру та нанесення захисного покриття.

Результати оптимізації ТП з використанням методу покрокової оптимізації наведені на рис.1, де показані залежності сумарних витрат для кожного кроку ТП, а також варіант порівняльної діаграми оптимальних значень параметрів глибини контролю. Вектор оптимальних значень параметрів κ^{opt} (для дискретності зміни 0,1) дорівнює

$$\kappa^{opt} = (1.4, 0.7, 0.7, 0.5, 0.9, 0.6). \quad (4)$$

У разі зменшення дискретності зміни кроку до 0.001 отримано такі результати:

$$\kappa^{opt} = (1.365, 0.719, 0.674, 0.527, 0.869, 0.651). \quad (5)$$

Відмітимо також, що мінімізовані сумарні витрати для вектора (4) становили 4.424638 од. (всі витрати подані у відносних одиницях до базових витрат), а для вектора (5) – 4.423023 од.

У [1] отримано такі результати оптимізації даного ТП:

$$\kappa^{opt} = (1.363, 0.719, 0.674, 0.527, 0.868, 0.650) \quad (6)$$

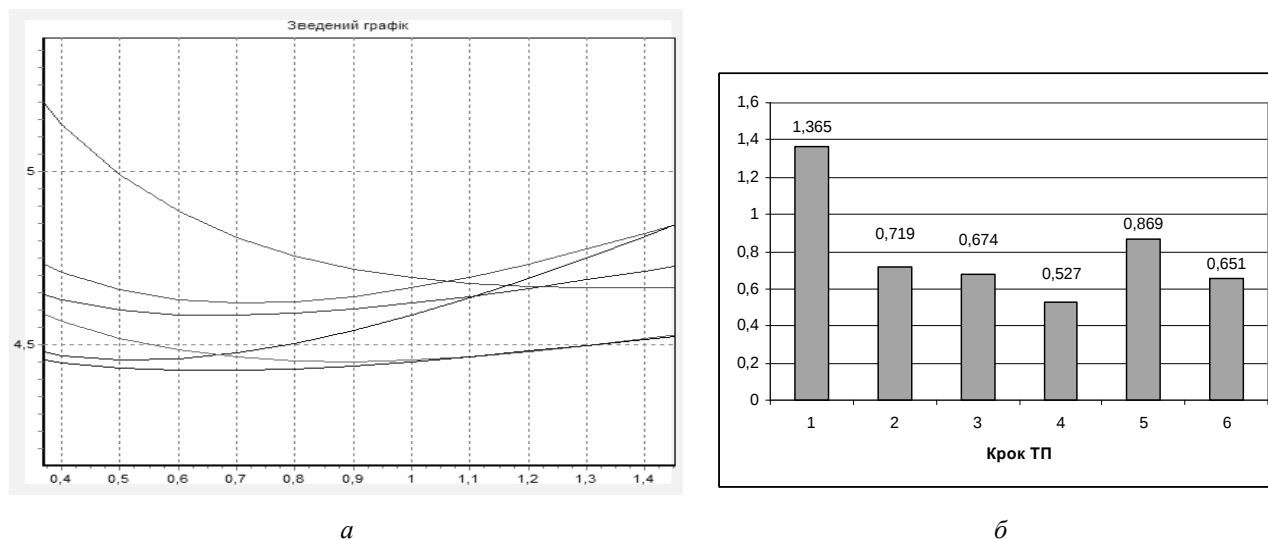


Рис. 1. Залежності сумарних витрат від глибини контролю (а) та порівняльна діаграма оптимальних значень параметрів α для кожного кроку ТП (б)

Порівнюючи вектори (5) та (6), бачимо, що результати оптимізації, отримані методом покрокової оптимізації, з точністю до другого знака після коми збігаються з відомими результатами. Також підтверджується висновок, що зменшення дискретності зміни κ дає деякі уточнення сумарних оптимізованих витрат. Однак, варто зауважити, що для розглянутого ТП такі уточнення не є визначальними. Такий факт дає змогу зробити висновок стосовно кроку зміни параметрів глибини контролю – величину кроку потрібно вибирати на рівні 0.1–0.01.

Результати оптимізації 6-крокового ТП виготовлення друкованих плат методом “золотого січення” для тих самих вхідних даних наведено у табл. 1. Також у таблиці показано залежність отримуваних оптимальних значень вектора параметрів глибини контролю від заданої точності оцінки сумарних витрат.

Із наведених результатів видно, що збільшення точності оцінки сумарних витрат приводить до уточнення значень параметрів κ . Помітніші ці зміни за відносно меншої точності – на рівні 0.1–0.01. У цьому разі фіксується уточнення значень κ лише у другому-третьому знаку після коми, що загалом є незначними. Починаючи з точності 0.001, зміна значень параметрів κ ще менша, а сумарні витрати 4.421426 залишаються незмінними аж до точності 0.000001. Це свідчить про невисоку чутливість значень параметрів κ до точності оцінки сумарних витрат, що своєю чергою дозволяє дати рекомендацію стосовно вибору максимальних значень точності. Враховуючи це, точність оцінки сумарних витрат можна обмежити на рівні 0.01–0.001, що для практичних цілей є достатнім.

Таблиця 1

Результати оптимізації 6-крокового ТП методом “золотого січення”

κ^{opt}	Точність					
	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001
κ_1^{opt}	1.380148	1.374247	1.373715	1.373686	1.373690	1.373690
κ_2^{opt}	0.744848	0.741201	0.741201	0.741231	0.741228	0.741225
κ_3^{opt}	0.694856	0.691210	0.690145	0.690020	0.690016	0.690013
κ_4^{opt}	0.548529	0.535335	0.536728	0.536776	0.536810	0.536807
κ_5^{opt}	0.891175	0.887528	0.886135	0.886039	0.886060	0.886061
κ_6^{opt}	0.654413	0.648512	0.649373	0.649277	0.649275	0.649276
C_Σ	4.421591	4.421427	4.421426	4.421426	4.421426	4.421426

Результати оптимізації досліджуваного 6-крокового ТП методом Хука-Дживса наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати оптимізації ТП виготовлення друкованих плат методом Хука-Дживса

K^{opt}	Дискретність зміни кроку					
	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001
K_1^{opt}	1.4	1.37	1.374	1.3737	1.37369	1.37369
K_2^{opt}	0.7	0.74	0.741	0.7412	0.74122	0.741225
K_3^{opt}	0.7	0.69	0.69	0.69	0.69001	0.690013
K_4^{opt}	0.5	0.54	0.537	0.5368	0.53681	0.536807
K_5^{opt}	0.9	0.89	0.886	0.8861	0.88606	0.886061
K_6^{opt}	0.6	0.65	0.649	0.6493	0.64928	0.649276
C_{Σ}	4.42464	4.42144	4.421426	4.421426	4.421426	4.421426

Порівняння відповідних значень у табл. 1 та 2 підтверджує збіг результатів застосування двох останніх методів. Причому збіг спостерігається як за оцінками сумарних витрат, так і за параметрами глибини контролю. Істотний ефект від застосування методу Хука-Дживса до запропонованих оптимізаційних задач варто очікувати у разі збільшення кількості кроків технологічного процесу. Однак потрібно пам'ятати, що збільшення кількості кроків ТП приводить одночасно і до збільшення часових затрат на реалізацію методу.

Як приклад на рис. 2 показано вікна формування завдань оптимізації досліджуваного ТП виготовлення друкованих плат у розробленому програмному забезпеченні.

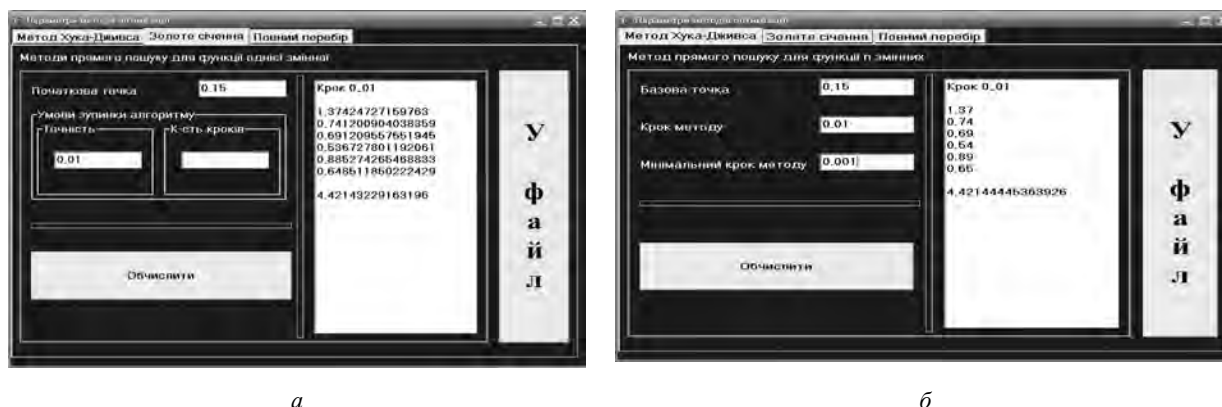


Рис. 2. Приклади формування завдань та виведення результатів оптимізації ТП для методів “золотого січення” (а) та Хука-Дживса (б)

Висновки та рекомендації

1. Результати досліджень підтверджують, що описані методи оптимізації придатні для розв'язання задач оптимізації ТП. Вибір конкретного методу залежить від мети досліджень, складності моделі ТП, потрібної точності оцінки складових та сумарних витрат тощо.

2. Метод покрокової оптимізації не потребує великих часових затрат, дає змогу отримувати табличні та графічні залежності як складових, так і сумарних витрат від параметрів глибини контролю. Наявність таких залежностей відкриває можливість додаткового контролю якості отримуваних результатів, а також оцінювати значення витрат не лише для оптимальних значень K^{opt} , а і для значень, близьких до оптимальних. Таку ситуацію з вибором варіанта контролю ТП можна використати тоді, коли з тих чи інших причин не вдається на практиці реалізувати оптимальний варіант організації контролю ТП. Загалом цей метод є доволі ефективним і здебільшого забезпечує потрібну якість отримуваних рішень.

3. Метод “золотого січення” можна рекомендувати для використання тоді, коли ставиться задача оптимізації ТП з досягненням потрібної (заданої) точності оцінки витрат. Метод Хука-Дживса здійснює пошук глобальних мінімумів, забезпечуючи при цьому високу точність оцінок витрат, і з цього погляду є найуніверсальнішим та найдосконалішим.

4. Досвід показує, що покращити результати можна сумісним (паралельним) використанням двох методів – наприклад, спочатку використовують метод покрокової оптимізації (як простіший метод для пошуку наближених значень), а потім метод “золотого січення” або метод Хука-Дживса. Здебільшого, як показує практика, навіть використання методу покрокової оптимізації уже забезпечує прийнятні результати. Тому використання додатково інших методів оптимізації підвищує довіру до отриманих результатів, гарантує їх достовірність загалом.

5. Щодо часових затрат на розв’язання оптимізаційних задач. Досвід підтверджує висновок, що цей показник здебільшого не є визначальним. Крім того, використання сучасної комп’ютерної техніки, вибір раціональних значень дискретності зміни параметрів оптимізації та точності оцінок витрат (хоча би в межах рекомендованих значень) практично нівелюють вплив часових затрат на вибір методу оптимізації. Однак для методу Хука-Дживса часовий фактор повинен обов’язково враховуватись, особливо за істотного збільшення кількості кроків ТП.

1. Недоступ Л.А. Оптимизация контроля, регулировки и технологической приработки приборов / Л.А. Недоступ. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов.ун-те, 1987. – 152 с. 2. Недоступ Л.А. Забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристроїв шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва / Л.А. Недоступ, Ю.Я. Бобало, М.Д. Кіселичник, О.В. Лазько // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – № 534: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 45–51. 3. Бобало Ю.Я. Імовірнісна формалізація процесів утворення, виявлення і пропуску дефектів на стадіях життєвого циклу РЕА / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник, О.В. Лазько // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 595: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 57–61. 4. Бобало Ю.Я. Керування процесами формування та контролю заданих властивостей у виробництві електронних пристроїв / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2009. – № 637: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 7–11. 5. Бобало Ю.Я. Моделювання та керування процесами формування та контролю якості радіоелектронної апаратури / Ю.Я. Бобало // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/3 (38). – С. 11–13. 6. Бобало Ю.Я. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури / Ю.Я. Бобало, М.Д. Кіселичник, Л.А. Недоступ // За ред. Л.А. Недоступа. – Львів: Держ. ун-т “Львівська політехніка”, 1996. – 168 с. 8. Катренко А.В. Дослідження операцій: Підручник з грифом МОН / А.В. Катренко. – Львів: “Магнолія 2006”, 2009. – 350 с.