

У роботі для несиметричних ІРС зі старіючими вихідними елементами, розгалуженими до 3-го рівня, побудовано моделі ймовірності відмови, частоти відмов та інтенсивності відмов, що дає можливість оцінювати такі характеристики. Під час проектування ієрархічних систем на основі цих результатів приймають рішення про структуру системи та планування виділення коштів для підтримання системи у працездатному стані. Розрахунок інтенсивності відмов комплексу технічних засобів системи дозволяє передбачити вихід з ладу обладнання, що важливо для вчасного проведення планових і профілактичних ремонтів.

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Введ. 28.12.94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с. 2. ДСТУ 2862-94. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – Введ. 8.12.94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 40 с. 3. Марунчак Д., Сидор А. Надійність несиметричних розгалужених систем зі старіючими вихідними елементами// Матер. 5-ї Міжнар. наук.-техн. конф. “Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці”. – Львів: 1999. – С. 26–28.

УДК 658.562

Л.А. Недоступ, Ю.Я. Бобало, М.Д. Кіселичник, О.В. Лазько, Г.М. Васьків  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ТРР

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

© Недоступ Л.А., Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Лазько О.В., Васьків Г.М., 2004

Описується програмний комплекс “ДРЕЙФ”, призначений для вирішення завдань комплексної оптимізації технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв за критерієм мінімуму сумарних витрат на забезпечення їх якості та надійності.

The “DREYF” software designed for the complex optimization of electronic devices production process problem solution by criterion of total costs minimum is described.

**Постановка задачі.** Виробництво сучасних радіоелектронних пристроїв і систем супроводжується значними економічними витратами на проведення технологічних процесів, процедур контролю якості та гарантійного обслуговування впродовж певного періоду їх експлуатації. Для забезпечення ефективності їх виробництва загалом ці витрати повинні бути виправданими і оптимізованими їх наскрізним моделюванням і оптимізацією.

Системи забезпечення якості виробів мають структури, адекватні до технологічних процесів, але на відміну від них зображаються послідовностями формалізованих процедур формування та контролю якості на всіх стадіях виробництва, ефективність яких оцінюється загальним показником їх функціональної ефективності – імовірністю появи виробничих дефектів і загальним показником економічної ефективності – сумарними витратами на забезпечення якості. Не розглядаючи теоретичні аспекти моделювання таких систем (цим питанням присвячені праці [1, 2, 3, 4]), відмітимо, що опис багатокрокових процесів зручно провадити у матричному вигляді із використанням правила їх скалярного добутку [2]. В цьому випадку сумарні виробничі витрати  $C_{\Sigma}$  на забезпечення якості виробів зображаються адитивною функцією вигляду:

$$C_{\Sigma}=(C_{\text{в}}, K_{\text{в}})+(B, \chi, C_{\text{кон}})+(C_{\text{к}}, P_{\text{вя}})+(C_{\text{е}}, P_{\text{вя.е}}), \quad (1)$$

в якій  $(C_{\text{в}}, K_{\text{в}}), \dots, (C_{\text{е}}, P_{\text{вя.е}})$ , – скалярні добутки матриць:

$C_v = \text{diag} \| C_{v11}, C_{v22}, \dots, C_{v_{n,n}} \|$  – матриця витрат на формування параметрів виробів;

$K_v = \text{diag} \| K_{11}, K_{22}, \dots, K_{nn} \|$  – матриця коефіцієнтів варіації витрат;

$V = \text{diag} \| V_{11}, V_{22}, \dots, V_{nn} \|$  – булева матриця,

$\chi = \text{diag} \| \chi_{11}, \chi_{22}, \dots, \chi_{nn} \|$  – матриця показників глибини контролю;

$C_{\text{кон}} = \text{diag} \| C_{\text{кон}11}, C_{\text{кон}22}, \dots, C_{\text{кон}nn} \|$  – матриця витрат на проведення контролю з формування якості;

$C_k$  і  $P_{\text{вя}}$  – верхньотрикутні матриці витрат, пов'язані з забракуванням виробів під час їх виготовлення і матриці імовірностей виявлення дефектів під час їх виготовлення;

$C_e, P_{\text{вя.e}}$  – стовпцеві матриці витрат під час експлуатації, які пов'язані з дефектами виробництва і матриці імовірностей виявлення дефектів в процесі експлуатації, які спричиняють відмову виробу.

$$C_k = \begin{pmatrix} C_{k,1,1} & C_{k,2,1} & \dots & C_{k,n,1} \\ \cdot & C_{k,2,2} & \dots & C_{k,n,2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & C_{k,n,n} \end{pmatrix}; \quad P_{\text{вя}} = \begin{pmatrix} P_{\text{вя},1,1} & P_{\text{вя},2,1} & \dots & P_{\text{вя},n,1} \\ 0 & P_{\text{вя},2,2} & \dots & P_{\text{вя},n,2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{\text{вя},n,n} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$C_e = \|C_{e1}, C_{e2}, \dots, C_{en}\|^T, \quad P_{\text{вя.e}} = \|P_{\text{вя.e1}} \ P_{\text{вя.e2}} \ \dots \ P_{\text{вя.en}}\|^T.$$

Значимо, що елементи матриці  $P_{\text{вя}}$  визначаються рекурентними залежностями вигляду:

$$P_{\text{вя},k,i} = [P_{\text{пр},k-1,i} + (1 - P_{\text{пр},k-1,i})P_{\text{в},k,i}]P_{k,i},$$

в яких  $P_{\text{пр},k-1,i}$  – імовірність пропуску дефектів з  $k-1$ -го кроку технологічного процесу;  $P_{\text{в},k,i}$  – імовірність вводу дефектів по  $i$ -му параметру на  $k$ -му кроці;  $P_{k,i}$  – імовірність правильного контролю якості.

Суть цих параметрів системи забезпечення якості виробів розкрита в [1].

Задача оптимізації забезпечення якості виробів формується так:

$$C_{\Sigma} = \{K_v, P_{\text{вя}}(\chi), P_{\text{вя.e}}, C_{\text{кон}}, C_k, C_e\} \rightarrow C_{\Sigma \text{min}} \\ P_{\text{вя.e}} \leq P_{\text{вя.e доп}} \\ C_{\text{кон}} = \text{const} \\ C_k = \text{const} \\ C_e = \text{const} \quad (3)$$

тут  $P_{\text{вя.e доп}}$  – допустиме значення імовірності виявлення дефектів на стадії експлуатації.

Під час розв'язання такої задачі параметрами оптимізації можуть бути коефіцієнти варіації витрат на організацію і проведення технологічного процесу  $K_v$  або показники глибини контролю  $\chi$  на всіх його стадіях, при яких забезпечується заданий рівень якості виробів при мінімальних сумарних виробничих витратах  $C_{\Sigma \text{min}}$ . Запропонована програма призначена для розв'язання саме такої задачі.

**Побудова програмного забезпечення.** Враховуючи модель (1), можемо сформувати групу вхідних параметрів, що необхідні для розв'язання задачі оптимізації.

1. Необхідне значення імовірності виконання задачі під час виготовлення приладів, яке можна зобразити величиною  $P_{\text{зд}}$ , або середнім рівнем вихідної якості, ризиком користувача та іншими показниками.

2. Характеристики вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих виробів у вигляді середніх рівнів вхідної та вихідної якості продукції.

3. Характеристики якості проведення технологічних операцій на кожному кроці технологічного процесу у вигляді імовірності введення дефектів.

4. Математичний опис залежностей ймовірності правильного контролю від параметра глибини контролю на кожному кроці технологічного процесу.

5. Парціальні витрати, пов'язані з проведенням вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих виробів.

6. Парціальні витрати, пов'язані з відбракуванням матеріалів напівфабрикатів та комплектуючих виробів при вхідному контролі.

7. Парціальні витрати на проведення контролю  $i$ -го параметра на  $k$ -му кроці технологічного процесу.

8. Парціальні витрати на усунення дефектів виготовлення, виявлених при контролі на  $k$ -му кроці технологічного процесу.

9. Парціальні витрати на усунення дефектів виробництва під час експлуатації пристрою.

Алгоритм визначення оптимальних параметрів процесу контролю властивостей виробу при серійному виготовленні, що реалізує розв'язання прямої задачі, показаний на рис. 1.

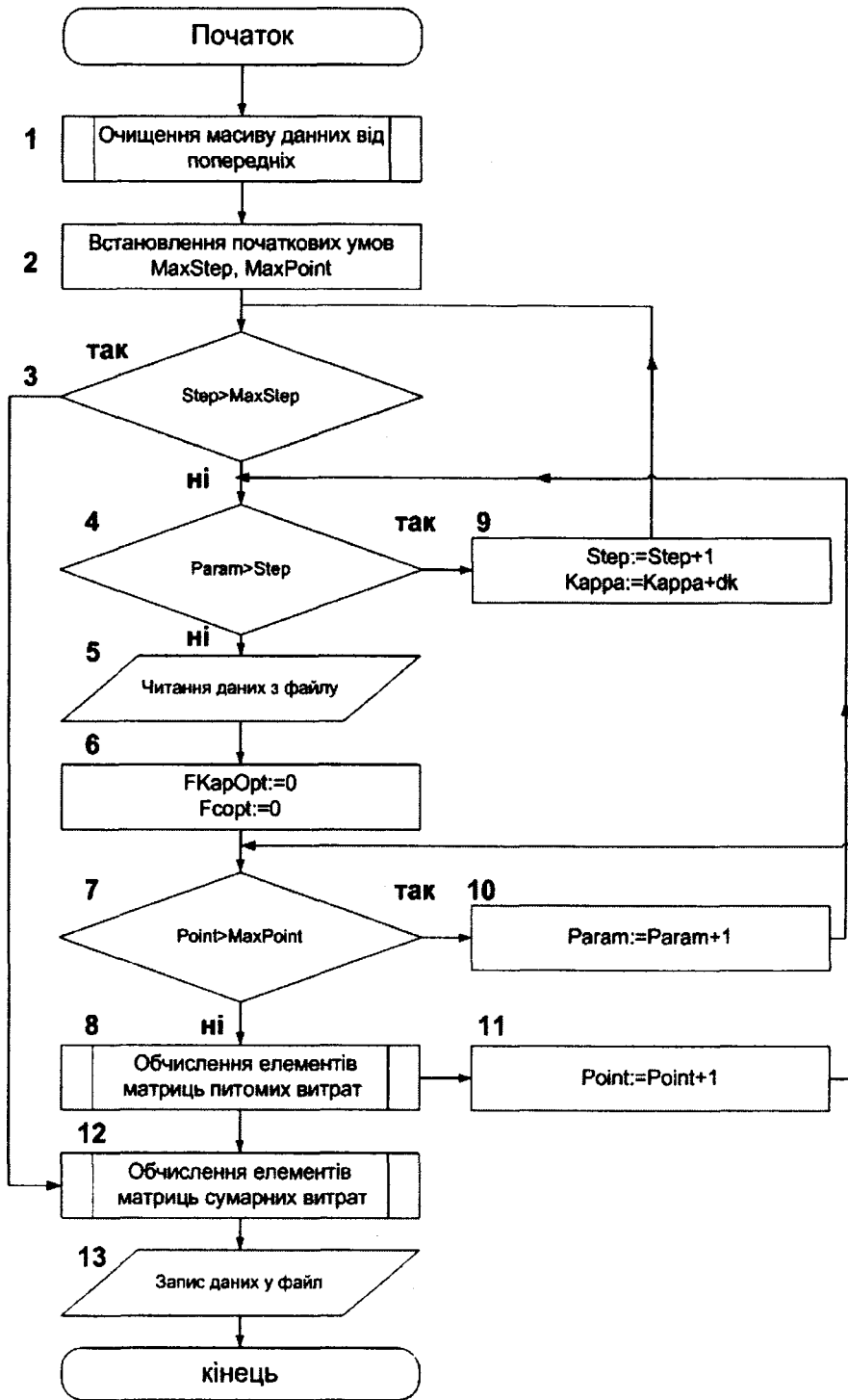


Рис. 1. Блок-схема алгоритму роботи програми визначення сумарних витрат кроку технологічного процесу

У блоці 1 виконується ввід та контроль вхідних даних. Вхідні дані мають такий вигляд:

– двовимірний масив квадратних чи прямокутних матриць імовірностей вводу дефектів під час виконання технологічних операцій, що позначаються символами  $R_v$ , імовірність пропуску дефектів при вхідному контролі матеріалів напівфабрикатів та комплектуючих виробів  $R_{пр}$ , імовірностей правильного контролю  $R_{пр.к.}$ , показників глибини контролю  $\chi$ , середнього значення витрат на проведення контролю  $S_{кон}$ ;

– одновимірних масивів у вигляді матриць-стовпців витрат на усунення дефектів виробів на стадії експлуатації  $S_e$ , середнього рівня вихідної якості  $R_{вих}$ ;

– кількість кроків технологічного процесу  $N$ , максимальне можливе значення  $\chi - \chi_{\max}$ , дискретності зміни величини  $\chi$ , імовірності виконання задачі (заданого значення)  $P_{\max}$ .

Розмірність квадратних чи трикутних матриць, визначається кількістю кроків технологічного процесу не обмежується. Це дозволяє аналізувати процеси практично будь-якої складності. Обмеження можуть бути зумовлені лише можливостями електронно-обчислювальної машини, на якій виконується програма оптимізації.

У блоці 2 фіксуються значення елементів стовпців матриці  $\chi$ , з якого розпочинається пошук оптимального варіанта контролю властивостей виготовлених виробів. Початковому значенню сумарних виробничих витрат  $Sum\_max$  присвоюється значення, що значно перевищує реально можливі значення. Це значення слугує вихідною точкою оптимізації.

У блоці 3 всім елементам  $i$ -го стовпця матриці  $\chi$  присвоюється максимальне значення  $\chi_{\max}$ , яке визначає верхню межу області оптимізації по  $\chi$ . Блок 4 призначений для отримання модифікованої матриці  $R_{пр.к1}$  з елементами, що відповідають матриці  $\chi$ , отриманій в блоці 3. У блоці 5 по рекурентних співвідношенням визначаються елементи матриць ймовірності наявності дефектів після проведення технологічних операцій та імовірності пропуску дефектів внаслідок недосконалості проведеного контролю.

У блоці 6 обчислюються сумарні виробничі витрати  $Sum$  та їх складові за формулами.

У блоці 7 значення сумарних витрат порівнюється з витратами, обчисленими на попередньому кроці. Причому на першому кроці їх порівнюють з опорними витратами,  $Sum\_max$  (вихідною точкою оптимізації), а на наступних кроках проводиться вже власне процес оптимізації технологічного процесу на основі синтезу його кращих значень. При цьому, якщо обчислене значення більше або дорівнює попереднім, то проводиться перехід до блока 10 для розрахунку, якщо менше – проводиться фіксація елементів матриць у блоці 9. Програма передбачає можливість виводу цих проміжних значень і таким чином реалізує принципи квазідіалогової системи.

У блоці 8 проводиться збереження кращого значення сумарних витрат, а в блоці 9 – значень елементів матриць  $\chi$ .

Блок 10 призначений для зміни значень  $i$ -го стовпця матриці  $\chi$  на величину дискретизації області пошуку оптимального значення по  $\chi$ .

У блок 11 проводиться перевірка значень елементів  $i$ -го стовпця матриці  $\chi$ . Якщо це значення більше або дорівнює нулю, то здійснюється перехід до блока 4, якщо менше, то варіація  $\chi$  по  $i$ -му стовпцю завершена.

У блоці 12 здійснюється вивід на друк проміжних результатів розрахунку сумарних виробничих витрат, що відкриває можливість оцінки значимості кожного кроку технологічного процесу в забезпеченні його оптимальності.

У блоці 13 номер стовпця матриці  $\chi$  збільшується на одиницю, тобто оптимізація проводиться за наступним стовпцем матриці.

У блоці 14 перевіряється присвоєний номер стовпця матриці  $\chi$ , і залежно від отриманого результату перехід до блока 3 або 15.

Блок 15 проводить вивід значень елементів матриць  $\chi$ , що відповідають оптимальному варіанту процесу, а також вивід результатів обчислень, що утворюють при цьому сумарні виробничі витрати.

У блоці 14 проводиться перевірка присвоєного номера стовпця матриці  $\chi$ , і залежно від отриманого результату перехід до блока 3 або 1.

Пакет програм оптимізації технологічного процесу складається з шести основних частин: блока управління та обчислень UCalc, блока вводу вхідних даних UInDat, блока виводу результатів обчислень у табличній формі UTab, блока виводу результатів обчислень у графічній формі UGraf, блока виводу результатів оптимізації за допомогою гістограм UHist та файла даних.

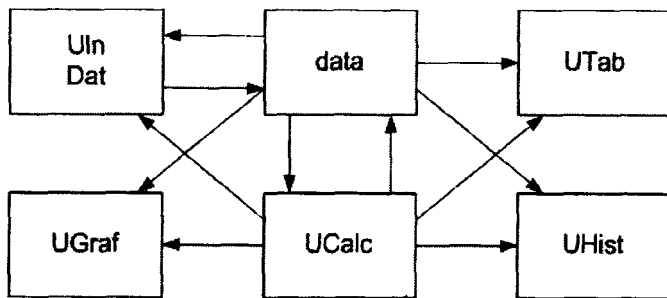


Рис.2. Граф програмного пакета

Основним блоком програми є блок Ucalc. За допомогою блока проводиться управління іншими компонентами програмного пакета та основні обчислення.

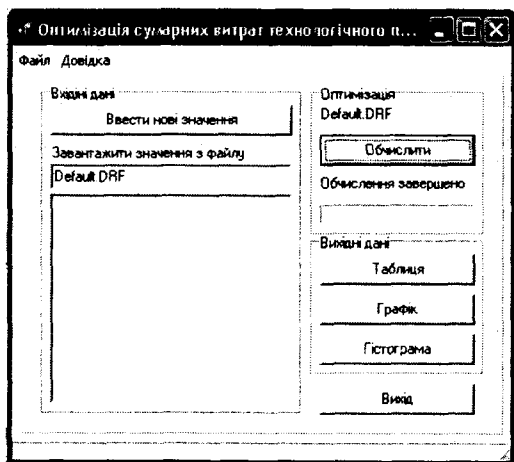


Рис. 3. Вікно вводу вхідних даних

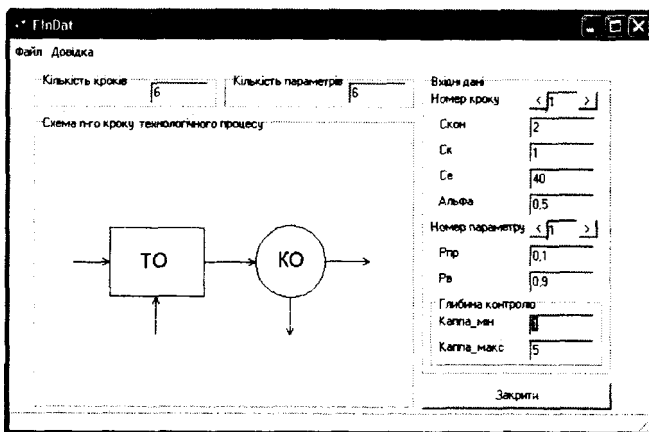


Рис. 4. Блок-схема технологічного процесу

Блок вводу вхідних даних дозволяє формувати файл з даними, що використовуються для проведення оптимізації. Блок подання даних у табличній формі дозволяє формувати таблиці, що містять результати оптимізації, а також проміжні дані обчислень. Головне вікно програми блока подання даних у табличній формі зображено на рис.5

Крок	FC0Sum	FC1Sum	FC2Sum	FC3Sum	
1	222	16.990	22.077	244.688	
2	1.133	25.16	0.893	20.652	272.947
3	1.266	261.2	0.804	19.321	301.226
4	1.4	310.8	0.822	16.075	329.798
5	1.533	340.4	1.048	16.909	359.358
6	1.666	370	1.183	15.819	387.003
7	1.8	396.6	1.326	14.798	415.727
8	1.933	429.2	1.482	13.644	444.517
9	2.066	458.2	1.647	12.951	473.299
10	2.2	489.4	1.823	12.116	502.140
11	2.333	518	2.012	11.325	531.247
12	2.466	547.5	2.213	10.604	560.417
13	2.6	577.2	2.429	9.920	589.549
14	2.733	606.8	2.658	9.280	618.739
15	2.866	636.4	2.905	8.687	647.987
16	3	666	3.168	8.121	677.296

Рис. 5. Вікно подання даних

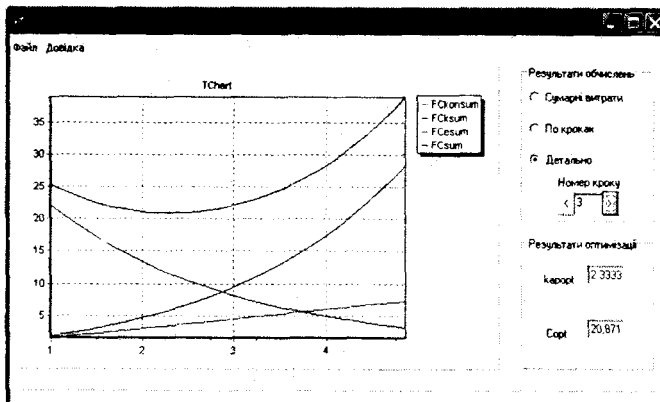


Рис. 6. Вікно результатів оптимізації

Блок виведення результатів оптимізації у графічній формі показано на рис.6. Блок призначений для виводу в графічній формі результатів оптимізації в трьох формах: сумарні витрати, вклад в сумарні витрати кожного кроку технологічного процесу та вклад в сумарні витрати складових кожного кроку технологічного процесу.

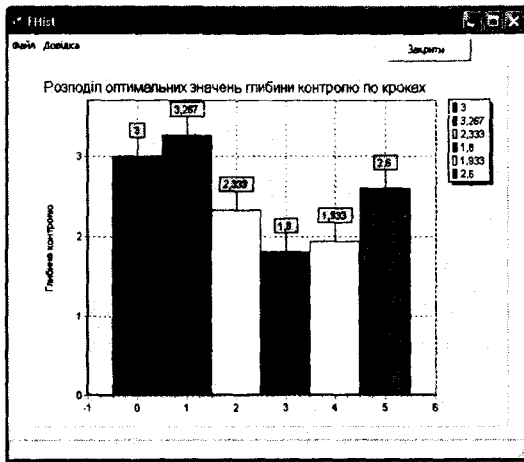


Рис. 7. Вікно виводу результатів Експерименту за допомогою гістограм

Блок виведення результатів експерименту за допомогою гістограми призначений для виводу оптимальних значень операцій контролю за кроками технологічних операцій.

Головне вікно подання результатів оптимізації за допомогою гістограми показано на рис. 6.

Для розробки програми використано сучасну об'єктно-орієнтовану мову програмування. Структура програми максимально наближена до формалізованого зображення технологічного процесу. Це дозволило проводити аналогію між частинами програми та елементами формалізованої структури технологічного процесу. У зв'язку з цим вихідні тексти програми є наочними та достатньо зручними для коригування при зміні елементів математичної моделі, що описує технологічний процес.

**Висновки.** Побудова програми комплексної оптимізації виробничих систем за критеріями мінімуму дефективності і сумарних витрат є складною інженерно-технічною задачею, яка для свого розв'язання вимагає системного підходу. До основних питань що потребують вирішення, належать:

- вибір параметрів, що характеризують технологічний процес;
- спосіб формалізації реального технологічного процесу;
- вибір математичної моделі, що адекватно описує технологічний процес і є достатньо зручною для проведення обчислень;
- визначення параметрів математичної моделі;
- розробка алгоритму роботи програми оптимізації.

1. Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури. – Львів, 1996. – 167 с. 2. Кіселичник М.Д. Моделювання та оптимізація процесів забезпечення якості. – Львів: 2001. – 168 с. 3. Lee, Sherry F., Eric D. Boskin, Hao Cheng Liu, Eddie H. Wen, and Costas J. Spanos. "RTSPC: A Software Utility for Real-Time SPC and Tool Data Analysis." *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 8, no. 1, – p. 17–25. 4. Rao, Suraj, Andrej J. Strojwas, John P. Lehoczy, and Mark J. Schervish. "Monitoring Multistage Integrated Circuit Fabrication Processes." *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 9, no. 4, – p. 495–505. 5. Spanos, Costas J. and Raymond L. Chen. "Using Qualitative Observations for Process Tuning and Control." *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 10, № 2, – p. 307–316. 6. Spanos, Costa J., Hai-Fang Guo, Alan Miller, and Joanne Levine-Parrill. "Real Time Statistical Process Control Using Tool Data." *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 5, № 4, – p. 308–318. 7. Mozumder, Purnendu K. and Andrzej J. Strojwas. "Statistical Control of VLSI Fabrication Processes." *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 17, № 3, – p. 467–475.