

ВИРОБНИЦТВО І ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.3.019.3(075)

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, МОДЕЛЮВАННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Л. Недоступ, М. Кіселичник, Ю. Бобало, О. Лазько

*Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна*

Розглянуто концептуальні питання моделювання та оптимізації процесів забезпечення якості. Взято до уваги технічні та економічні аспекти процесу моделювання. Технологічний процес представлено як складну систему, характеризувану множиною потоків дефектів. Наведено приклад формалізації кроку технологічного процесу. Проаналізовано принципи формування адитивної та мультиплікативних складових дефективності.

Ключові слова: технологічний процес, потік дефектів, контроль якості.

За умов постійного ускладнення радіоелектронних пристроїв, складності і вартості технологічних процесів їхнього виготовлення й експлуатації актуальною є проблема моделювання цих процесів та їхньої комплексної оптимізації. Технологічний процес – це частина виробничого процесу, призначеного для якісної зміни предмета виробництва. З огляду на порівняну самостійність технологічний процес можна розглядати як систему, що складається з множини взаємопов'язаних елементів (підсистем, кроків), узгоджене функціонування яких спрямоване на досягнення мети – отримання виробу з заданими характеристиками якості. Отже, технологічні процеси, по суті, є процесами формування якості продукції. Тому серед багатьох показників ефективності показник, який характеризує їхню спроможність забезпечувати властивості виробів на необхідному рівні з допустимими витратами ресурсів, за значущістю переважає [3]. Зазначимо, що практика комплексного техніко-економічного моделювання процесів забезпечення якості продукції та їхньої оптимізації засобами систем автоматизованого проектування (САПР) ще не має достатнього теоретичного підґрунтя, хоча методи моделювання окремих технологічних процесів досить добре розроблені і висвітлені в літературі [4].

Розглянемо технічні та економічні аспекти такого моделювання.

Технологічні процеси виробництва радіоелектронних пристроїв характеризовані множинами потоків виробничих дефектів різної інтенсивності, які можуть утворюватись на будь-якій стадії виробництва, мати специфічну природу, джерела виникнення і спрямованість. Кожен з таких процесів можна розглядати як систему,

в якій відбувається постійне перетворення цих потоків, зокрема їхнє ущільнення під час виконання технологічних процедур і розрідження під час процедур контролю [2].

У випадку вирішення практичних завдань, пов'язаних з проектуванням нових і поліпшенням наявних технологічних процесів із урахуванням основного критерію – якості продукції, перспективними є адаптивні імовірнісні моделі, які, незважаючи на обмаль апріорної інформації дають змогу з часом забезпечити їхню достатню адекватність завдяки накопиченій статистиці про параметри процесів за умов їхнього нормального функціонування.

Формалізація технологічного процесу зводиться до його відображення структурою, що складається з множин технологічних і контрольних процедур, з'єднаних за певною схемою [1]. На рис.1, А показано, що k -й крок процесу є підсистемою $S_{k,k}$, яка складається з технологічної операції $TO_{k,k}$, під час якої формується якість виробу стосовно k -го параметра, і контрольної операції $KO_{k,k}$, під час якої оцінюють якість.

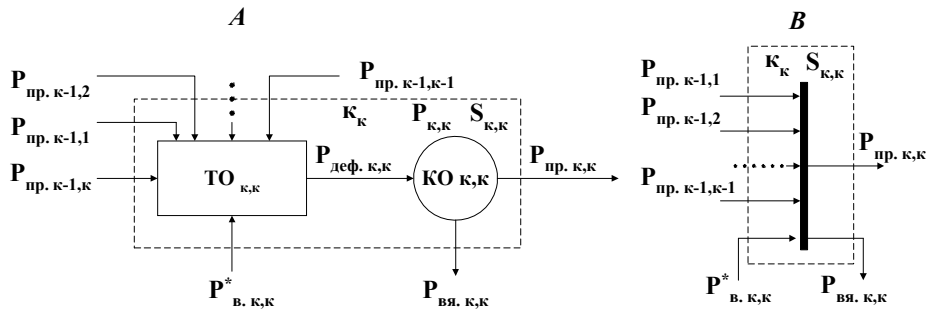


Рис. 1. Схема k -го кроку технологічного процесу (А) та його формалізоване зображення (В)

Вхідними некерованими параметрами підсистеми $S_{k,k}$ є потоки дефектів, пропущених з попередніх кроків технологічного процесу, які оцінюють імовірностями пропуску дефектів $P_{пр. k-1, 1}$; $P_{пр. k-1, 2}$; ...; $P_{пр. k-1, k-1}$. Вхідний керований параметр підсистеми – потік дефектів, що вводяться у виріб під час k -ї технологічної процедури з імовірністю $P_{в. k, k}^*$. Вихідними параметрами підсистеми є потік пропущених дефектів з імовірністю $P_{пр. k, k}$ і потік виявлених дефектів з імовірністю $P_{вя. k, k}$.

Параметром керування контрольною процедурою підсистеми S_k є показник глибини контролю χ , який визначає безпомилковість оцінки якості виробів і виявлення дефектів з імовірністю $P_{к, k}$.

Проміжний параметр підсистеми – потік дефектів після проведення технологічної процедури $TO_{k,k}$. Його оцінюють імовірністю наявності дефектів $P_{деф. k, k}$.

Загалом ці параметри підсистеми $S_{k,k}$ описують такі залежності:

$$P_{пр. k-1, \Sigma} = \Phi(P_{пр. k-1, 1}; P_{пр. k-1, 2}; \dots; P_{пр. k-1, k-1});$$

$$P_{в. k, k} = \Psi(P_{пр. k-1, \Sigma}, P_{в. k, k}^*);$$

$$P_{\text{деф.к,к}} = \Omega(P_{\text{пр.к-1,}\Sigma}, P_{\text{в.к,к}}^*); \quad (1)$$

$$P_{\text{к,к}} = K(\chi);$$

$$P_{\text{пр.к,к}} = H(P_{\text{деф.к,к}}, P_{\text{к,к}});$$

$$P_{\text{в.к,к}} = \Theta(P_{\text{деф.к,к}}, P_{\text{к,к}}).$$

Розглянемо особливості формування дефектності на k -му кроці технологічного процесу.

Скористаємось узагальненим показником якості технологічного процесу на рівні k -го кроку у вигляді деякого функціонала $Q(P_v)$ від імовірності введення дефектів $P_{\text{в.к,к}}$ як функції парціальних імовірностей $P_{\text{пр.к-1,1}}, P_{\text{пр.к-1,2}}, \dots, P_{\text{пр.к-1,k-1}}$ та імовірності $P_{\text{в.к,1}}^*$. Зазначений показник можна записати у двох варіантах – $Q_{\text{а}}(P_{\text{в.к,к}})$ і $Q_{\text{м}}(P_{\text{в.к,к}})$, які ґрунтуються на відповідних визначеннях адитивної та мультиплікативної дефектності:

$$Q_{\text{а}}(P_{\text{в.к,к}}) = \Phi(P_{\text{пр.к-1,}\Sigma}) + \varphi(P_{\text{в.к,к}}^*), \quad (2)$$

$$Q_{\text{м}}(P_{\text{в.к,к}}) = \Psi(P_{\text{пр.к-1,}\Sigma}) \psi(P_{\text{в.к,к}}^*). \quad (3)$$

Отже, дефектність $P_{\text{(а+м)деф.к,к}}$, яка утворюється на k -му кроці технологічного процесу, можна розглядати як деяку суму двох складових – дефектності адитивної та дефектності мультиплікативної.

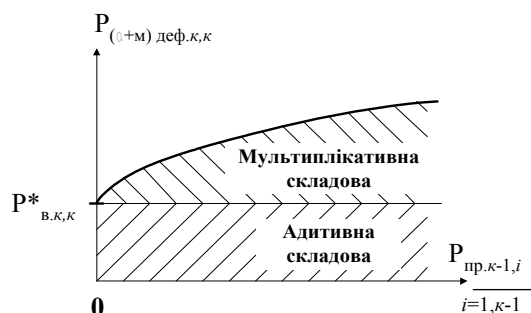


Рис. 2. Формування дефектності виробництва

Раніше пропущені дефекти, які досягли k -ї технологічної операції і не викликають зростання дефектності під час її проведення, підсумовуються і формують у сукупності адитивну дефектність виробів з імовірністю $P_{\text{(а)деф.к,к}}$.

З урахуванням сумісності подій виникнення дефектів на різних кроках технологічного процесу отримаємо $P_{\text{(а)деф.к,к}} = P_{\text{пр.к-1,}\Sigma} + (1 - P_{\text{пр.к-1,}\Sigma}) P_{\text{в.к,к}}^*$.

Якщо пропущені дефекти негативно впливають на проведення k -ї технологічної операції, а отже, ведуть до виникнення мультиплікативної дефектності, то загальну дефектність продукції буде характеризувати імовірність

$$P_{\text{(а+м)деф.к,к}} = P_{\text{пр.к-1,}\Sigma} + (1 - P_{\text{пр.к-1,}\Sigma}) K_{\text{к}} P_{\text{пр.к-1,}\Sigma} P_{\text{в.к,к}}^*, \quad (5)$$

де $K_{\text{к}}$ – узагальнений коефіцієнт впливу пропущених дефектів на k -ту технологічну операцію.

Графічна модель утворення адитивної і мультиплікативної дефектності на k -ому кроці технологічного процесу показана на рис. 3.

Експериментально отримані залежності імовірності введення дефектів $P_{в.к}$ від дії дестабілізуювальних факторів показані на рис. 4.

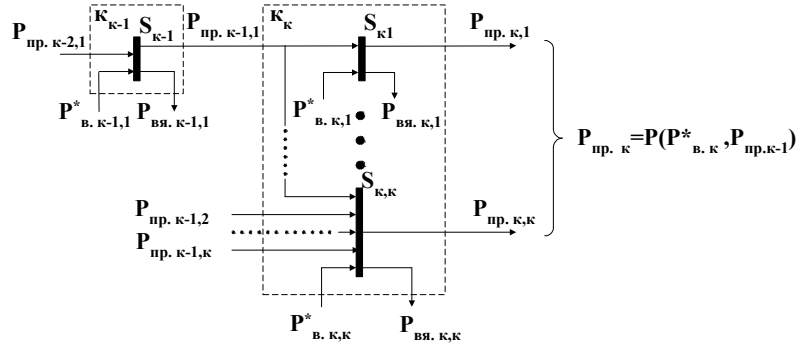


Рис. 3. Модель утворення адитивної та мультиплікативної дефектності

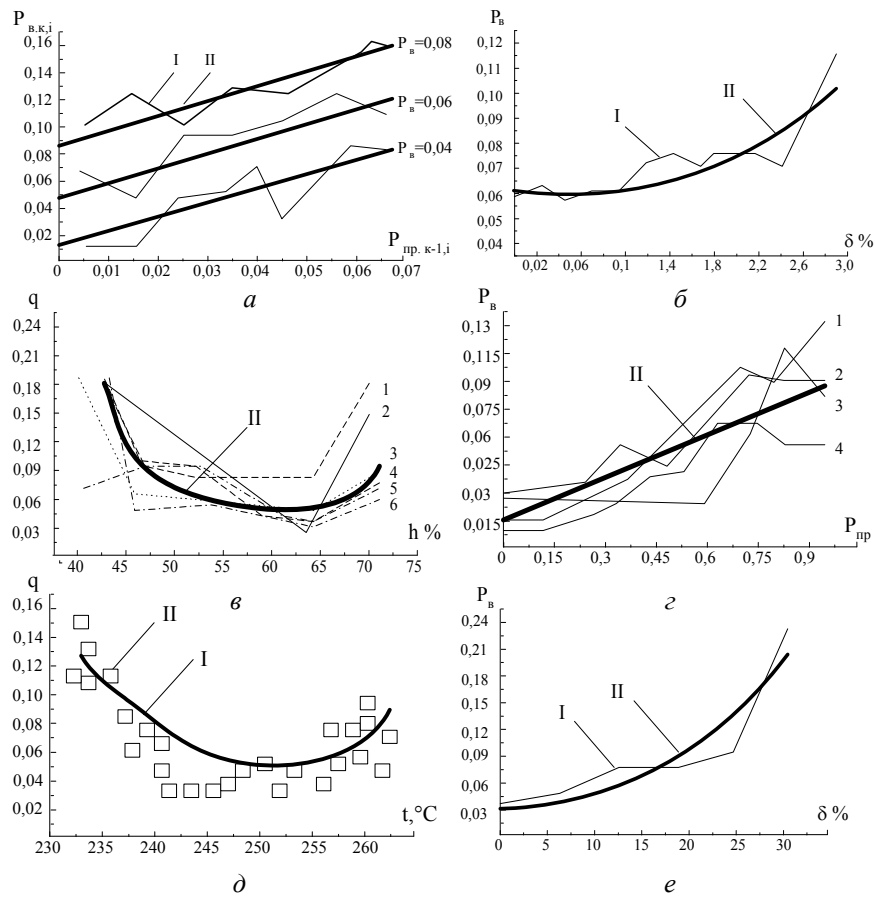


Рис. 4. Залежності дефектності виробів від дестабілізуючих факторів

На рис. 4 такі позначення: *a* – залежність дефектності покриття цинком від дефектності хімічного очищення поверхні; *b* – залежність дефектності гальванічного нарощування міді від дефектності хімічного міднення; *v*, *z* – залежність дефектності друкованих плат шести типів осцилографів (позначених цифрами від 1 до 6) під час паяння хвилиною від вмісту олова у припої ПОС-61; *d*, *e* – залежність дефектності паяних з'єднань друкованих плат від температури паяння; *I* – експериментальні дані; *II* – результат математичного моделювання.

Структури процесів часто будують за схемами послідовного та паралельного з'єднання підсистем технологічних та контрольних процедур (рис. 5, 6).

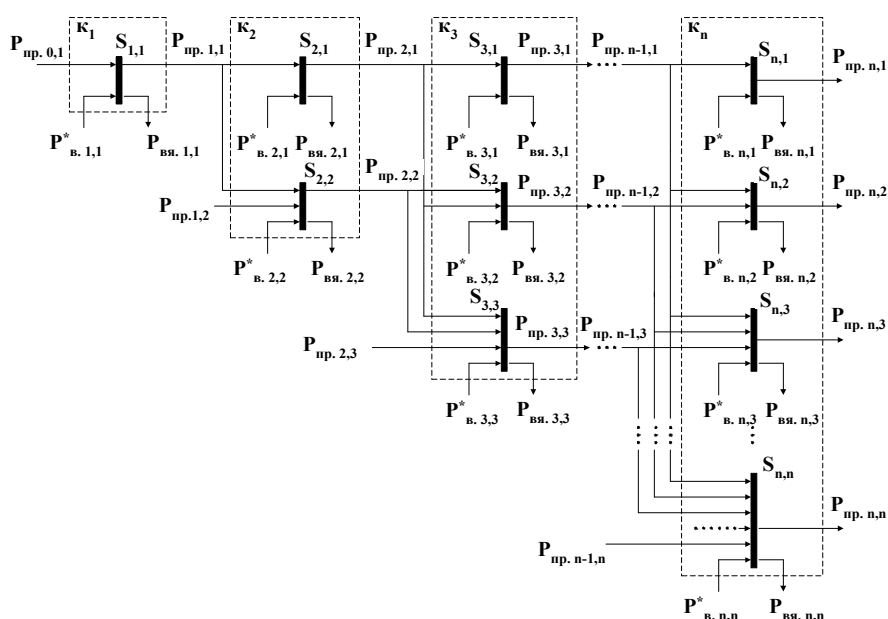


Рис. 5. Послідовний технологічний процес.

Залежно від кількості показників якості виробів кожний крок об'єднує відповідну кількість підсистем їхнього формування та контролю. На *k*-му кроці підсистема $S_{k,k}$ формує і контролює *k*-й параметр. Одночасно з цим підсистемами $S_{k,k-1}$, $S_{k,k-2}$, ..., $S_{k,1}$ можуть ущільнювати та розріджувати потоки дефектів стосовно параметрів, сформованих на попередніх кроках.

Імовірність уведення дефектів на *k*-му кроці технологічного процесу треба розглядати як деяку суму парціальних уведень з імовірностями $P_{в.к,1}$, $P_{в.к,2}$, ..., $P_{в.к,k-1}$, які визначені залежностями

$$\begin{aligned} P_{в.к,1} &= \psi(P_{в.к,к}^*, P_{пр.к-1,1}); \\ P_{в.к,2} &= \psi(P_{в.к,к}^*, P_{пр.к-1,2}); \\ P_{в.к,к} &= \psi(P_{в.к,к}^*, P_{пр.к-1,к-1}). \end{aligned} \quad (6)$$

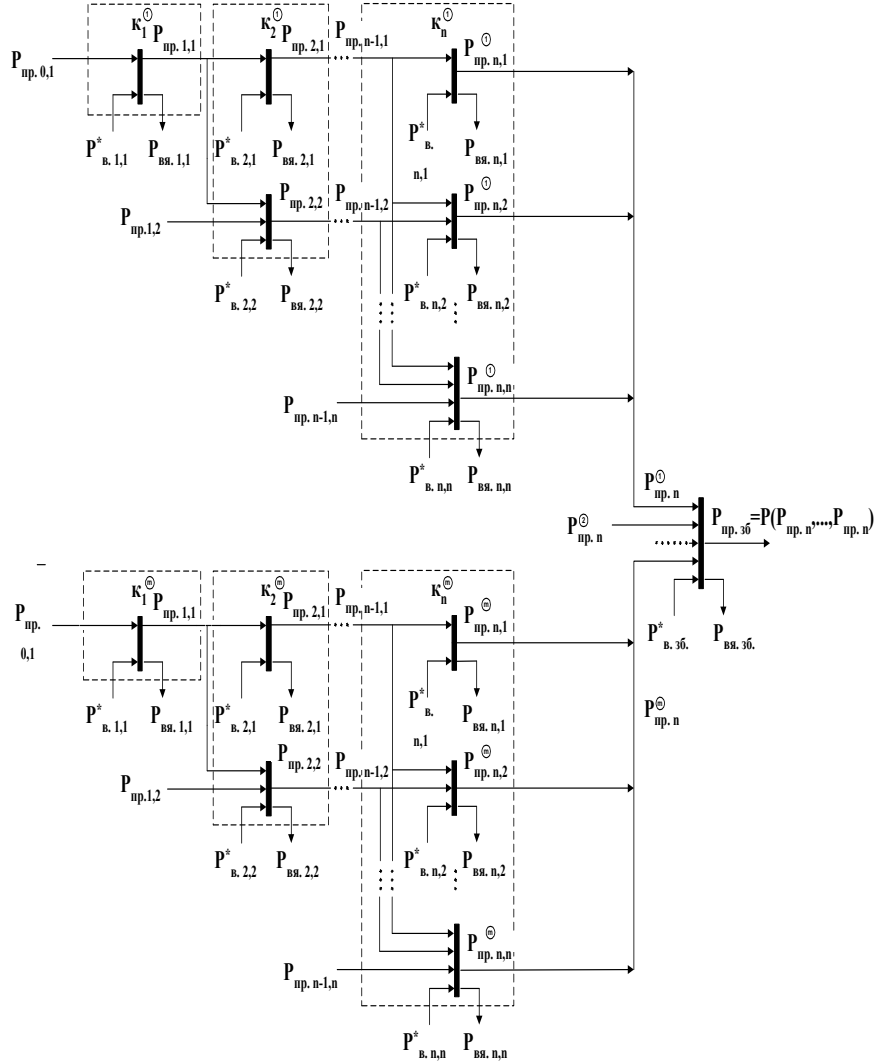


Рис. 6. Паралельні технологічні процеси з процедурою збирання

Як показано на рис. 7, границі поля значущості парціального введення дефектів на k -му кроці технологічного процесу в структурному полі формування k -го параметра виробу можуть залежати не лише від k -го параметра, а й від сукупності $k, k-1, k-2, \dots$ параметрів, тобто можуть охоплювати параметри, сформовані на попередніх кроках.

У цьому разі $P_{в.к,к} > P_{в.к,к-1} > \dots > P_{в.к,2} > P_{в.к,1}$.

Ці імовірності введення дефектів, окрім першої, є імовірностями умов, що визначені так:

$$P_{в.к,i} = P_{в.к,к} \cdot P_k(i), \quad i = \overline{1, k}. \tag{7}$$

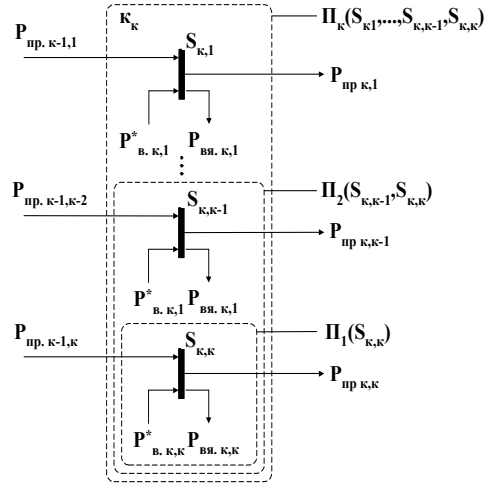


Рис. 7. Схема формування, виявлення та пропуску дефектів виробництва на k -му кроці технологічного процесу

Події впливу парціальної дефектності, що виникла під впливом дефектності, допущеної на попередніх кроках технологічного процесу, на дефектність, що формується на k -му кроці, є незалежними сумісними подіями. Складові імовірності $P_{в, k}$ у вигляді певної суми їхніх парціальних значень $P_{в, k, i}$, $i=1, k$ мають відповідні вагові коефіцієнти a_i .

Отже, на k -му кроці технологічного процесу імовірність уведення дефектів описана залежністю

$$P_{в, k} = \Psi(a_1 P_{в, k, 1}, a_2 P_{в, k, 2}, \dots, a_k P_{в, k, k}), \quad (8)$$

у якій

$$a_i = \frac{P_{в, k, i} \cdot dP_{в, k}}{P_{в, k, i} \cdot dP_{в, k, i}}; \quad \sum_{i=1}^k a_i = 1.$$

З урахуванням ваг складових залежностей (8) можна записати як імовірність суми сумісних незалежних подій:

$$P_{в, k} = \sum_{1 \leq i \leq k} a_i P_{в, k, i} - \sum_{1 \leq i < j \leq k} a_i a_j P_{в, k, i} P_{в, k, j} + \sum_{1 \leq i < j < l \leq k} a_i a_j a_l P_{в, k, i} P_{в, k, j} P_{в, k, l} - \dots \\ \dots + (-1)^{k-1} a_1 a_2 \dots a_k P_{в, k, 1} P_{в, k, 2} \dots P_{в, k, k}. \quad (9)$$

Імовірності $P_{в, k, \Sigma}$ реальних технологічних процесів є складними специфічними залежностями зі складним теоретичним визначенням. Емпіричні функції, що описують ці залежності, повинні забезпечувати такі умови:

$$P_{в, k, k} = P_{в, k, k}^* \text{ при } P_{пр} = 0;$$

$$P_{в, k, k} = 0 \text{ при } P_{в, k, k}^* = 0, \quad \forall P_{пр, k-1} = [0, 1];$$

$$\lim_{P_{в, k, k}^* \rightarrow 1} P_{в, k, k} = 1 \quad \forall P_{пр, k, \Sigma} = [0, 1]; \quad (10)$$

$$\lim_{P_{\text{пр}} \rightarrow 1} P_{\text{в.к.к}} = P_{\text{в}}^* \quad \forall P_{\text{в.к.к}} \in [0, 1].$$

Експериментально з'ясовано, що процеси виготовлення електронної виміральної апаратури задовільно описуються залежностями

$$P_{\text{в.к.к}} = P_{\text{в.к.к}} \cdot e^{-A_k(\kappa-i)}, \quad (11)$$

де

$$P_{\text{в.к.к}} = 1 - (1 - P_{\text{в.к.к}}^*) e^{-K_{\text{в.к.к}} P_{\text{в.к.к}}^* (1 - P_{\text{в.к.к}}^*) P_{\text{пр.к-1,у}}}, \quad (12)$$

A_k і $K_{\text{к,к}}$ – адаптаційні коефіцієнти, визначені статистичним експериментом. Коефіцієнт $K_{\text{к,к}}$ можна обчислити за формулою

$$K_{\text{к,к}} = \frac{\ln \left(\frac{1 - P_{\text{в.к.к}}^*}{1 - P_{\text{в.к.к}}} \right)}{P_{\text{в.к.к}}^* (1 - P_{\text{в.к.к}}^*) P_{\text{пр.к-1,у}}}. \quad (13)$$

Границі поля значущості контролю в структурному полі формування κ -го параметра виробу на κ -му кроці технологічного процесу можуть залежати або тільки від κ -го параметра, або від деякої сукупності κ -го і раніше сформованих параметрів на попередніх кроках (рис. 4.) У цьому разі

$$P_{\text{к,к}} > P_{\text{к,к-1}} > \dots > P_{\text{к,2}} > P_{\text{к,1}}. \quad (14)$$

Ці імовірності, крім першої, визначаються

$$P_{\text{к,і}} = P_{\text{к,к}} \cdot P_{\text{к}}(i), \quad i = \overline{1, \kappa}. \quad (15)$$

Для процесів виготовлення радіовиміральної техніки емпірично знайдені такі вирази:

$$P_{\text{к,к}} = 1 - e^{-B_k \chi_k}; \quad (16)$$

$$P_{\text{к}}(i) = 1 - e^{-C_k(\kappa-i)}, \quad (17)$$

де χ_k – коефіцієнт, що визначає обсяг контрольних операцій; B_k , C_k – коефіцієнти, які залежать від типу контролю, контрольованості виробу, метрологічного забезпечення та інших факторів.

Оскільки здебільшого у разі радіоелектронного виробництва уведення дефектів на κ -му кроці технологічного процесу і пропуску дефектів з попередніх кроків є подіями сумісними і незалежними, то імовірності пропуску дефектів з κ -го кроку і виявлення дефектів під час контролю на κ -му кроці є рекурентними залежностями:

$$P_{\text{пр.к,к}} = [P_{\text{пр.к-1,у}} + (1 - P_{\text{пр.к-1,у}}) P_{\text{в.к,к}}] (1 - P_{\text{к,к}}); \quad (18)$$

$$P_{\text{в.к,к}} = [P_{\text{пр.к-1,у}} + (1 - P_{\text{пр.к-1,у}}) P_{\text{в.к,к}}] 1 - P_{\text{к,к}}, \quad (19)$$

де імовірності $P_{пр.к,к}$, $P_{вя.к,к}$ характеризують ефективність $к$ -го кроку технологічного процесу в технічному і економічному аспектах. Перша імовірність стосується якості виробів після $к$ -го кроку, друга – втрат від виявлених дефектів.

Наскрізні математичні моделі дефектності n -крокового технологічного процесу визначені наступними системами рівнянь.

А – модель пропуску дефектів з останнього кроку технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{пр.н,1} &= \langle [P_{пр.н-2,1} + (1-P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}](1-P_{н-1,1}) + \{1 - [P_{пр.н-2,1} + (1-P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}] \cdot \\ &\cdot (1-P_{н-1,1})\} P_{в.н,1} \rangle (1-P_{н,1}); \\ P_{пр.н,2} &= \langle [P_{пр.н-2,2} + (1-P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}](1-P_{н-1,2}) + \{1 - [P_{пр.н-2,2} + (1-P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}] \cdot \\ &\cdot (1-P_{н-1,2})\} P_{в.н,2} \rangle (1-P_{н,2}); \\ &\dots\dots\dots \\ P_{пр.н,n} &= [P_{пр.н-1,n} + (1-P_{пр.н-1,n})P_{в.н,n}](1-P_{н,n}); \end{aligned} \quad (20)$$

Б – модель виявлення дефектів на останньому кроці технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{вя.н,1} &= \langle [P_{пр.н-2,1} + (1-P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}](1-P_{н-1,1}) + \{1 - [P_{пр.н-2,1} + (1-P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}] \cdot \\ &\cdot (1-P_{н-1,1})\} P_{в.н,1} \rangle P_{н,1}; \\ P_{вя.н,2} &= \langle [P_{пр.н-2,2} + (1-P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}](1-P_{н-1,2}) + \{1 - [P_{пр.н-2,2} + (1-P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}] \cdot \\ &\cdot (1-P_{н-1,2})\} P_{в.н,2} \rangle P_{н,2}; \\ &\dots\dots\dots \\ P_{вя.н,n} &= [P_{пр.н-1,n} + (1-P_{пр.н-1,n})P_{в.н,n}]P_{н,n}. \end{aligned} \quad (21)$$

Загальні імовірності пропуску та виявлення дефектів на n -му кроці технологічного процесу визначають підсумовуванням імовірностей сумісних подій [4]. Наведені математичні моделі дефектності є універсальними, придатними для процесів будь-якої складності.

Математичні моделі дефектності багатокрокових технологічних процесів з причин рекурентності є громіздкими аналітичними залежностями, що малопридатні для розв'язку оптимізаційних задач, оцінювання рівня якості продукції на різних стадіях виробництва, витрат, пов'язаних з браком тощо. Компактнішим є матричне зображення цих моделей:

$$\|P_{пр}\| = \left(\|P_{пр.к-1,i}\| + \|1 - P_{пр.к-1,i}\| \cdot \|P_{в.к,i}\| \right) \cdot \|1 - P_{к,i}\|; \quad (22)$$

$$\|P_{вя}\| = \left(\|P_{пр.к-1,i}\| + \|1 - P_{пр.к-1,i}\| \cdot \|P_{в.к,i}\| \right) \cdot \|1 - P_{к,i}\|, \quad i = \overline{1, n}, \quad \kappa = \overline{1, n}. \quad (23)$$

Матриці в (22), (23) мають верхньотрикутну форму. Якщо на $к$ -му кроці технологічного процесу контролю піддають лише параметри, сформовані $к$ -ю технологічною операцією, то матриці імовірностей стають діагональними.

Зазначимо, що в (22), (23) добуток двох матриць **A** і **B** обчислюють поелементно, тобто

$$C_{к,i} = A_{к,i} \cdot B_{к,i}. \quad (24)$$

Елементами керування дефектністю в моделях (22), (23) є матриці імовірностей уведення дефектів і матриці імовірностей правильного та неправильного контролю.

Сумарні витрати C_{Σ} забезпечення потрібної якості пристроїв є сумою витрат їхнього виготовлення $C_{в,\Sigma}$, проведення комплексу контрольних процедур на всіх стадіях виробництва $C_{кон,\Sigma}$, виявлення і усунення допущених дефектів $C_{к,\Sigma}$, а також відшкодування витрат споживача, зумовлених відмовами $C_{е,\Sigma}$:

$$C_{\Sigma} = C_{в,\Sigma}(C_{в,k,i}, K_{в,k,i}) + C_{кон,\Sigma}(C_{кон,k,i}, \chi_{k,i}) + C_{к,\Sigma}(C_{к,k,i}, K_{вя,k,i}) + C_{е,\Sigma}(C_{е,k,i}, \chi_{вя,k,i}), \quad (25)$$

де: $\kappa = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, k}$ – відповідно, номер кроку технологічного процесу і номер параметра, який формується на цьому кроці; $C_{в,k,i}$ – витрати на формування i -го параметра; $K_{в,k,i}$ – коефіцієнт варіації витрат; $C_{кон,k,i}$ – витрати на контроль якості формування i -го параметра; $\chi_{к,i}$ – показник глибини контролю; $C_{к,i}$ – витрати забракування виробу за i -м параметром; $P_{вя,k,i}$ – імовірність виявлення браку за i -м параметром; $C_{е,k,i}$ – витрати, пов'язані з відмовою виробу за i -м параметром на стадії експлуатації; $P_{вя,k,i}$ – імовірність виявлення дефекту за i -м параметром.

Далі наведено спрощений варіант математичної моделі сумарних витрат забезпечення якості виробів для технологічного процесу типової структури, що складається з технологічних процедур структуроутворення, формоутворення, збирання, електронного монтажу, регулювання і технологічного припрацювання готових виробів:

$$\begin{aligned} C_{\Sigma} = & C_{су,1,1} K_{су,1,1} + C_{су,2,2} K_{су,2,2} + \dots + C_{су,n,n} K_{су,n,n} + \\ & + C_{фу,1,1} K_{фу,1,1} + C_{фу,2,2} K_{фу,2,2} + \dots + C_{фу,n,n} K_{фу,n,n} + \\ & + C_{з,1,1} K_{з,1,1} + C_{з,2,2} K_{з,2,2} + \dots + C_{з,n,n} K_{з,n,n} + \\ & + C_{м,1,1} K_{м,1,1} + C_{м,2,2} K_{м,2,2} + \dots + C_{м,n,n} K_{м,n,n} + \\ & + C_{р,1,1} K_{р,1,1} + C_{р,2,2} K_{р,2,2} + \dots + C_{р,n,n} K_{р,n,n} + \\ & + C_{тп,1,1} K_{тп,1,1} + C_{тп,2,2} K_{тп,2,2} + \dots + C_{тп,n,n} K_{тп,n,n} + \\ & + C_{кон.су,1,1} \chi_{су,1,1} + C_{кон.су,2,2} \chi_{су,2,2} + \dots + C_{кон.су,n,n} \chi_{су,n,n} + \\ & + C_{кон.фу,1,1} \chi_{фу,1,1} + C_{кон.фу,2,2} \chi_{фу,2,2} + \dots + C_{кон.фу,n,n} \chi_{фу,n,n} + \\ & + C_{кон.з,1,1} \chi_{з,1,1} + C_{кон.з,2,2} \chi_{з,2,2} + \dots + C_{кон.з,n,n} \chi_{з,n,n} + \\ & + C_{кон.м,1,1} \chi_{м,1,1} + C_{кон.м,2,2} \chi_{м,2,2} + \dots + C_{кон.м,n,n} \chi_{м,n,n} + \\ & + C_{кон.р,1,1} \chi_{р,1,1} + C_{кон.р,2,2} \chi_{р,2,2} + \dots + C_{кон.р,n,n} \chi_{р,n,n} + \\ & + C_{кон.тп,1,1} \chi_{тп,1,1} + C_{кон.тп,2,2} \chi_{тп,2,2} + \dots + C_{кон.тп,n,n} \chi_{тп,n,n} + \\ & + C_{к.су,1,1} P_{вя.су,1,1} + C_{к.су,2,2} P_{вя.су,2,2} + \dots + C_{к.су,n,n} P_{вя.су,n,n} + \\ & + C_{к.фу,1,1} P_{вя.фу,1,1} + C_{к.фу,2,2} P_{вя.фу,2,2} + \dots + C_{к.фу,n,n} P_{вя.фу,n,n} + \\ & + C_{к.з,1,1} P_{вя.з,1,1} + C_{к.з,2,2} P_{вя.з,2,2} + \dots + C_{к.з,n,n} P_{вя.з,n,n} + \\ & + C_{к.м,1,1} P_{вя.м,1,1} + C_{к.м,2,2} P_{вя.м,2,2} + \dots + C_{к.м,n,n} P_{вя.м,n,n} + \\ & + C_{к.р,1,1} P_{вя.р,1,1} + C_{к.р,2,2} P_{вя.р,2,2} + \dots + C_{к.р,n,n} P_{вя.р,n,n} + \\ & + C_{к.тп,1,1} P_{вя.тп,1,1} + C_{к.тп,2,2} P_{вя.тп,2,2} + \dots + C_{к.тп,n,n} P_{вя.тп,n,n} + \\ & + C_{е.су,1,1} P_{вя.е.су,1,1} + C_{е.су,2,2} P_{вя.е.су,2,2} + \dots + C_{е.су,n,n} P_{вя.е.су,n,n} + \\ & + C_{е.фу,1,1} P_{вя.е.фу,1,1} + C_{е.фу,2,2} P_{вя.е.фу,2,2} + \dots + C_{е.фу,n,n} P_{вя.е.фу,n,n} + \\ & + C_{е.з,1,1} P_{вя.е.з,1,1} + C_{е.з,2,2} P_{вя.е.з,2,2} + \dots + C_{е.з,n,n} P_{вя.е.з,n,n} + \\ & + C_{е.м,1,1} P_{вя.е.м,1,1} + C_{е.м,2,2} P_{вя.е.м,2,2} + \dots + C_{е.м,n,n} P_{вя.е.м,n,n} + \\ & + C_{е.р,1,1} P_{вя.е.р,1,1} + C_{е.р,2,2} P_{вя.е.р,2,2} + \dots + C_{е.р,n,n} P_{вя.е.р,n,n} + \\ & + C_{е.тп,1,1} P_{вя.е.тп,1,1} + C_{е.тп,2,2} P_{вя.е.тп,2,2} + \dots + C_{е.тп,n,n} P_{вя.е.тп,n,n} . \end{aligned} \quad (26)$$

В моделі (26) використані такі індекси: C_y – структуроутворення; ΦU – формоутворення; Z – збирання; M – монтаж; P – регулювання; $ТП$ – технологічне припрацювання. Імовірності $P_{\text{вя}}$ і $P_{\text{вяе}}$ – визначені за формулами (19) та (21).

Громіздкість таких моделей можна суттєво зменшити, якщо множини $C_{\text{в.к,і}}$, $K_{\text{в.к,і}}$, $C_{\text{кон.к,і}}$, $\chi_{\text{к,і}}$, $C_{\text{к.к,і}}$, $P_{\text{вя.к,і}}$, $C_{\text{е.к,і}}$ і $P_{\text{вя.е.к,і}}$ описати матрицями з такими умовами:

$$\begin{aligned} C_{\text{в.к,і}}, K_{\text{в.к,і}}, C_{\text{кон.к,і}}, \chi_{\text{к,і}} &= \begin{cases} \neq 0 & \text{при } \kappa = i; \\ 0 & \text{при } \kappa \neq i; \end{cases} \\ C_{\text{к.к,і}}, C_{\text{вя.к,і}} &= \begin{cases} \neq 0 & \text{при } i \leq \kappa; \\ 0 & \text{при } i > \kappa; \end{cases} \\ C_{\text{е.к,і}}, C_{\text{вя.к}} &= \begin{cases} \neq 0 & \text{при } \kappa = n \\ 0 & \text{при } \forall(\kappa - n). \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

Згідно з (27) матриці $C_{\text{в}}$, $K_{\text{в}}$, $C_{\text{кон}}$, χ є діагональними:

$$\begin{aligned} C_{\text{в}} &= \text{diag} \| C_{\text{в.1,1}}, C_{\text{в.2,2}}, \dots, C_{\text{в.н,н}} \|; \\ K_{\text{в}} &= \text{diag} \| K_{\text{в.1,1}}, K_{\text{в.2,2}}, \dots, K_{\text{в.н,н}} \|; \\ C_{\text{кон}} &= \text{diag} \| C_{\text{кон.1,1}}, C_{\text{кон.2,2}}, \dots, C_{\text{кон.н,н}} \|; \\ \chi &= \text{diag} \| \chi_{1,1}, \chi_{2,2}, \dots, \chi_{n,n} \|, \end{aligned} \quad (28)$$

матриці $C_{\text{к}}$ і $P_{\text{вя}}$ – верхньотрикутними:

$$C_{\text{к}} = \begin{pmatrix} C_{\text{к.1,1}} & C_{\text{к.2,1}} & \dots & C_{\text{к.н,1}} \\ 0 & C_{\text{к.2,2}} & \dots & C_{\text{к.н,2}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & C_{\text{к.н,н}} \end{pmatrix}; \quad P_{\text{вя}} = \begin{pmatrix} P_{\text{вя.1,1}} & P_{\text{вя.2,1}} & \dots & P_{\text{вя.н,1}} \\ 0 & P_{\text{вя.2,2}} & \dots & P_{\text{вя.н,2}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{\text{вя.н,н}} \end{pmatrix}, \quad (29)$$

а матриці $C_{\text{е}}$ і $P_{\text{вя.е}}$ – стовпцевими:

$$\begin{aligned} C_{\text{е}} &= \| C_{\text{е.н,1}}, C_{\text{е.н,2}}, \dots, C_{\text{е.н,н}} \|^T, \\ P_{\text{вя.е}} &= \| P_{\text{вя.е.н,1}}, P_{\text{вя.е.н,2}}, \dots, P_{\text{вя.е.н,н}} \|^T. \end{aligned} \quad (30)$$

Загальна математична модель сумарних витрат із забезпечення якості виробів виглядає так:

$$C_{\Sigma} = (C_{\text{в}}, K_{\text{в}}) + (B, \chi, C_{\text{кон}}) + (C_{\text{к}}, P_{\text{вя}}) + (C_{\text{е}}, P_{\text{вя.е}}) + (C_{\text{е}}, P_{\text{вя.е}}), \quad (31)$$

де $(C_B, K_B), (B, \chi, C_{\text{кон}}), (C_K, P_{\text{вн}}), (C_c, P_{\text{вн.с}}), (C_c, P_{\text{вн.с}})$ – скалярні добутки відповідних матриць, визначені за загальним правилом

$$(A_1, A_2, \dots, A_m) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n a_{k,i}^{(1)} a_{k,i}^{(2)} \dots a_{k,i}^{(m)}, \quad (32)$$

де $A_j = \|a_{k,i}^{(j)}\|, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

У формулі (31) $B = \text{diag} \|b_{k,k}\|$ – булева матриця. Мінімізація витрат C_{Σ} за заданих значень елементів булевої матриці B відбувається шляхом знаходження оптимальних значень показників $\chi_{k,i}$ з урахуванням технічних та економічних обмежень.

Загалом процедуру оптимізації технологічних процесів можна записати як розв'язок прямої та оберненої задачі.

Пряма задача:

$$\begin{cases} P(x_0) = \sup P(x); \\ x_0 \in \{x\}; \\ C(x) < C_0, \end{cases}$$

де $P(x)$ – формалізований показник (критерій) якості системи; $P(x_0)$ – експериментальний рівень цього показника; $C(x)$ – показник обмеження; C_0 – його допустимий рівень,

Обернена задача:

$$\begin{cases} C(x_0) = \inf C(x); \\ x_0 \in \{x\}; \\ P(x) < P_0, \end{cases}$$

де P_0 – заданий рівень показника якості системи.

Для процесів формування та контролю якості радіоелектронних пристроїв показниками якості можуть бути імовірність відсутності дефектів у разі виконання технологічних операцій, імовірність пропуску дефектних одиниць продукції до споживача, відсоток випуску придатних, сумарні виробничі витрати із забезпечення якості виробів на стадіях виробництва та експлуатації тощо.

З використанням математичних моделей пропуску дефектів і сумарних виробничих витрат (20), (22), (25), (26), (31) задачі оптимізації набувають вигляду

$$P_{\text{пр}} \leq P_{\text{пр.доп}}$$

$$C_{\Sigma} \rightarrow C_{\Sigma \text{ min}}$$

$$P_{\text{пр.о.і}} \in G_{P_{\text{пр.о.і}}}$$

$$P_{\text{в.к.і}}^* \in G_{P_{\text{в.к.і}}^*}$$

$$P_{\text{к.і}} \in G_{P_{\text{к.і}}}$$

$$K_B \in G_{K_B}$$

$$C_B \in G_{C_B}$$

$$C_{\text{кон}} \in G_{C_{\text{кон}}}$$

$$C_K \in G_{C_K}$$

$$C_c \in G_{C_c}$$

$$C_{\Sigma} \leq C_{\text{доп}}$$

$$P_{\text{пр}} \rightarrow P_{\text{пр. min}}$$

$$P_{\text{пр.о.і}} \in G_{P_{\text{пр.о.і}}}$$

$$P_{\text{в.к.і}}^* \in G_{P_{\text{в.к.і}}^*}$$

$$P_{\text{к.і}} \in G_{P_{\text{к.і}}}$$

$$K_B \in G_{K_B}$$

$$C_B \in G_{C_B}$$

$$C_{\text{кон}} \in G_{C_{\text{кон}}}$$

$$C_K \in G_{C_K}$$

$$C_c \in G_{C_c}$$

Використані в цих задачах параметри оптимізації $P_{в.к.і}^*$, $K_в$, $C_в$, $K_в$ та інші можуть бути кореляційно або функціонально взаємопов'язаними.

Приклад оптимізації процесу за критерієм мінімуму сумарних витрат у разі використання як параметра оптимізації показника глибини контролю χ наведено на рис. 8.

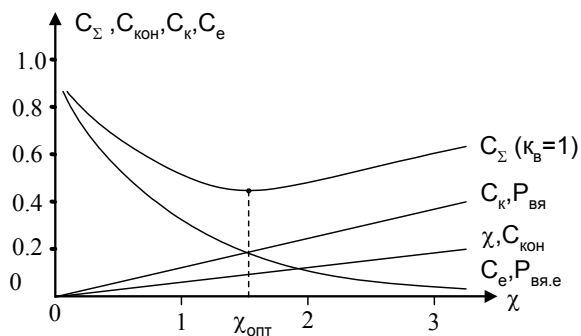


Рис. 8. Визначення оптимального значення показника глибини контролю χ за критерієм мінімуму сумарних витрат

Зазначимо, що в загальному випадку неможливо отримати єдині розв'язки як прямої, так і зворотної задачі з огляду на те, що кількість рівнянь–критеріїв оптимальності менша, ніж кількість умов і обмежень. Це означає, що для конкретного технологічного процесу можна визначити множину його квазіоптимальних варіантів, визначивши для кожного з них відповідну комбінацію його технічних та економічних показників у межах допустимих областей.

Отже, викладені підходи до імовірнісного моделювання наскрізних процесів забезпечення якості виробів і витрат, пов'язаних з їхнім проведенням, не мають теоретичних обмежень щодо складності структур і особливостей фізичної суті окремих технологічних процедур, з яких складаються ці процеси. Запропонований математичний апарат з використанням універсальних критеріїв якості у вигляді імовірностей уведення, виявлення та пропуску дефектів дає змогу моделювати процеси виробництва широкого класу технічних об'єктів, виконувати процедури декомпозиції і синтезу систем, розв'язувати задачі їхньої комплексної оптимізації.

1. Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Питання теорії перетворення потоків при проведенні технологічних і контрольних процедур // Вісник ДУ"ЛП". Радіоелектроніка та телекомунікації. 1999. №369, С. 172–176.
2. Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури. Львів, 1996. 167 с.
3. Кіселичник М.Д. Моделювання та оптимізація процесів забезпечення якості. Львів, 2001. 168 с.
4. Недоступ Л.А. Оптимізація контролю регулювання та технічного припрацювання радіоелектронних пристроїв. Львів, 1987. 152 с.

**THE SYSTEM ANALYSIS, MODELLING AND OPTIMISATION OF
SECURING PROCESSES OF QUALITY RADIO-ELECTRONIC DEVICES.**

L. Nedostup, M. Kyselychnyk, Y. Bobalo, O. Lazko

*Lviv Polytechnic National University
S. Bandery Str. 12, UA-79013 Lviv, Ukraine*

The paper discusses conceptual questions of modeling and optimizing of quality providing processes. It is accepted in attention technical and economic aspects of the process of modeling. Technological process is presented as complex system which is characterized by ensemble a stream defects. Formalizations of the technological process are cited an instance. It is considered principles of the shaping additive and multiplicative defective forming.

Key words: – manufacturing process, parameters of quality, quality control.

Стаття надійшла до редколегії 10.05.2004

Прийнята до друку 01.06.2004