

4. Синтез системы управления частотой вращения газового ДВС в составе энергоустановки / С.А. Сериков, Ю.Н. Бороденко, А.В. Бажинов, А.А. Дзюбенко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - Луганськ: СНУ. - 2006. - №7(101). – С. 169 – 173.
5. Бороденко Ю.М., Серіков С.А., Смирнов О.П. Система керування гібридною силовою установкою з пневмодвигуном (Севастополь 2008)
6. Бажинов А.В., Бороденко Ю.Н., Сериков С.А., Дзюбенко А.А. Система управління пневмотрансміссією гібридного автомобіля. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ: СНУ, №6(112), 2007. – С. 11 – 14.
7. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. М.: Машиностроение, 1978. – 472 с.
8. Автомобильный справочник. Пер.с англ. Первое русское издание. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 896 с.

УДК 621.396.6:658.018

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ФОРМУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

Ю.Я. Бобало

Кандидат технічних наук, професор, ректор  
Національний Університет «Львівська політехніка»  
вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013  
Контактний тел.: (032) 272-16-33  
e-mail: rektor@poly.net.lviv.ua

*Розглянуті концептуальні питання системного моделювання та керування процесами формування та контролю якості радіоелектронної апаратури на стадії виготовлення. Викладені результати досліджень та наскрізного математичного моделювання формалізованої крокової підсистеми забезпечення якості у складі технологічної та контрольної процедури*

## 1. Вступ

Процеси виготовлення радіоелектронної апаратури (РЕА) за своєю сутністю є процесами формування якості і традиційно розглядаються як процеси функціонування складних ергатичних систем, в яких задіяна велика кількість різноманітних ресурсів. Серед багатьох показників ефективності таких систем показник, який характеризує їх спроможність забезпечувати рівень якості і надійності виробів з допустимими витратами ресурсів, за своєю значущістю у більшості випадків займає одне з перших місць.

Сучасна методологія комплексного техніко-економічного моделювання процесів забезпечення якості та їх оптимізації ще не має достатнього теоретич-

ного підґрунтя, хоча методи моделювання окремих технологічних процесів досить добре розроблені і висвітлені в літературі [1,2].

Технологічні процеси виготовлення РЕА характеризуються множинами потоків виробничих дефектів різної інтенсивності, які можуть утворюватись на будь-якій стадії виробництва, мати специфічну природу, джерела виникнення і спрямованість. В процесі виробництва відбувається постійне перетворення цих потоків, зокрема їх ущільнення під час виконання технологічних процедур і розрідження під час процедур контролю [3].

В статті розглядається методика наскрізного математичного моделювання забезпечення якості РЕА на основі системного аналізу технологічних процесів виробництва та контролю [4].

**2. Моделювання процесу формування якості**

Формалізація технологічного процесу зводиться до його відображення множиною покрокових підсистем, кожна з яких складається з технологічних та контрольних процедур, з'єднаних за відповідною схемою [5]. На рис. 1 А зображено k-тий крок процесу у вигляді підсистеми S<sub>к,к</sub>, яка складається з технологічної операції ТО<sub>к,к</sub>, під час якої формується якість виробу стосовно k-того параметра, і контрольної операції КО<sub>к,к</sub>, під час якої оцінюється отримувана якість. Варіант формалізованого зображення підсистеми S<sub>к,к</sub> наведено на рис. 1 В.

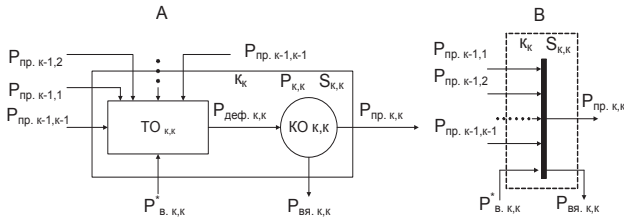


Рисунок 1. Схема k-того кроку технологічного процесу А) і його формалізоване зображення В)

Вхідними некерованими на k-тому кроці параметрами підсистеми S<sub>к,к</sub> є потоки дефектів, пропущених з попередніх кроків технологічного процесу, які в умовах стабільного виробництва є стаціонарними і оцінюються ймовірностями пропуску дефектів P<sub>пр.к-1,1</sub>; P<sub>пр.к-1,2</sub>; ...; P<sub>пр.к-1,к-1</sub>. Вхідним керованим параметром є потік дефектів, що вводяться у виріб під час k-тої технологічної операції з ймовірністю P<sub>в.к,к</sub><sup>\*</sup>. Параметром керування контрольною процедурою підсистеми S<sub>к</sub> є глибина контролю, показник якої æ визначає безпомилковість оцінювання якості з ймовірністю P<sub>к,к</sub>.

Вихідними параметрами підсистеми є потоки пропущених і виявлених дефектів з відповідними ймовірностями P<sub>пр.к,к</sub> і P<sub>вя.к,к</sub>. В загальному виді ці параметри описуються залежностями:

$$\begin{aligned}
 P_{пр.к-1,Σ} &= \Phi(P_{пр.к-1,1}; P_{пр.к-1,2}; \dots; P_{пр.к-1,к-1}), \\
 P_{в.к,к} &= \Psi(P_{в.к,к}^*, P_{пр.к-1,Σ}), \\
 P_{пр.к,к} &= H(P_{деф.к,к}, P_{к,к}), \\
 P_{вя.к,к} &= \Theta(P_{деф.к,к}, P_{к,к}).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Пропущені дефекти з попередніх кроків технологічного процесу, які досягли k-тої технологічної операції, можуть негативно впливати на якість її виконання. Це проявляється у збільшенні ймовірності введення дефектів P<sub>в.к,к</sub><sup>\*</sup> і, як наслідок, у появі мультиплікативної складової сумарної дефектності P<sub>деф.к</sub>, яка описується наступною залежністю:

$$\begin{aligned}
 P_{деф.к} &= P_{пр.к-1,1} \oplus P_{пр.к-1,2} \oplus \dots \oplus P_{пр.к-1,к-1} + \\
 &+ (1 - P_{пр.к-1,к-1}) P_{в.к,к}^* \prod_{i=1}^k K_{к,i}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де K<sub>к,i</sub> = φ(P<sub>пр.к-1,i</sub>) ≥ 1 - показник впливу дефектності попередніх стадій технологічного процесу на форму-

вання дефектності при виконанні k-тої операції, ⊕ - умовне позначення ймовірнісного підсумовування.

Визначення ймовірності введення дефектів P<sub>в.к,к</sub> при виконанні технологічної операції на сьогодні не має достатньої теоретичної бази і тому для реальних процесів приходиться використовувати емпіричні функції, які повинні забезпечувати виконання наступних умов: P<sub>в.к,к</sub> = P<sub>в.к,к</sub><sup>\*</sup>, при P<sub>пр.к-1,i</sub> = 0, i = 1, k-1; P<sub>в.к,к</sub> = 0 при P<sub>в.к,к</sub><sup>\*</sup> = 0, ∀ P<sub>пр.к-1,i</sub> = [0,1].

Експериментально встановлено, що ймовірність введення дефектів P<sub>в.к,к</sub> задовільно описується залежністю

$$P_{в.к,к} = 1 - (1 - P_{в.к,к}^*) \exp\{-K_a P_{в.к,к}^* (1 - P_{в.к,к}^*) P_{пр.к-1,к}\}
 \tag{3}$$

де K<sub>a</sub> – адаптаційний коефіцієнт, який визначається за формулою

$$K_a = \frac{\ln(1 - P_{в.к,к}^*) - \ln(1 - P_{в.к,к})}{P_{в.к,к}^* (1 - P_{в.к,к}^*) P_{пр.к-1,к}}
 \tag{4}$$

**3. Моделювання процесу контролю якості**

Зона ефективності контрольної операції КО<sub>к,к</sub> для k-того параметра виробу не обмежується тільки цим параметром, а може охоплювати деяку множину параметрів, сформованих на попередніх кроках, як це показано на рис. 2.

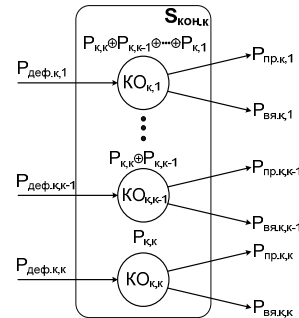


Рисунок 2. Зона ефективності k-тої контрольної операції КО<sub>к,к</sub>

У більшості практичних випадків виконується умова P<sub>к,к</sub> > P<sub>к,к-1</sub> > ... > P<sub>к,2</sub> > P<sub>к,1</sub>. Ці ймовірності правильного контролю визначаються наступним чином: P<sub>к,к-1</sub> = P<sub>к,к</sub> · P<sub>к(i)</sub>, i = 1, k.

Для багатьох процесів контролю якості серійного виготовлення радіовиміральної техніки експериментально встановлені наступні вирази:

$$P_{к,к} = 1 - e^{-B_k æ_k}, P_{к(i)} = 1 - e^{-C_k (k-i)},
 \tag{5}$$

де æ<sub>к</sub> - коефіцієнт, що визначає обсяг k-тої контрольної операції, B<sub>к</sub>, C<sub>к</sub> - коефіцієнти, які залежать від виду контролю, ступеню автоматизованості, контролепридатності виробу, метрологічного забезпечення і інших факторів.

Оскільки уведення дефектів на k-тому кроці технологічного процесу і пропуску дефектів з попередніх кроків є подіями незалежними, то ймовірності пропуску дефектів з k-того кроку і виявлення дефектів під час контролю на k-тому кроці визначаються наступними рекурентними залежностями:

$$P_{\text{пр.к,к}} = [P_{\text{пр.к-1,}\Sigma} + (1 - P_{\text{пр.к-1,}\Sigma})P_{\text{в.к,к}}](1 - P_{\text{к,к}}), \quad (6)$$

$$P_{\text{вя.к,к}} = [P_{\text{пр.к-1,}\Sigma} + (1 - P_{\text{пр.к-1,}\Sigma})P_{\text{в.к,к}}]P_{\text{к,к}},$$

де імовірності  $P_{\text{пр.к,к}}$ ,  $P_{\text{вя.к,к}}$  характеризують ефективність к-того кроку технологічного процесу в технічному аспектах. Перша імовірність стосується якості виробів після к-того кроку, друга - втрат виявлених дефектів.

Остаточно наскрізні математичні моделі дефектності п-крокового технологічного процесу мають наступний вигляд:

Модель пропуску дефектів з останнього кроку технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.н,1}} &= (P_{\text{пр.н-2,1}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,1}})P_{\text{в.н-1,1}})(1 - P_{\text{н-1,1}}) + \\ &+ \{1 - [P_{\text{пр.н-2,1}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,1}})P_{\text{в.н-1,1}}]\} P_{\text{в.н,1}}(1 - P_{\text{н,1}}); \\ P_{\text{пр.н,2}} &= (P_{\text{пр.н-2,2}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,2}})P_{\text{в.н-1,2}})(1 - P_{\text{н-1,2}}) + \\ &+ \{1 - [P_{\text{пр.н-2,2}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,2}})P_{\text{в.н-1,2}}]\} P_{\text{в.н,2}}(1 - P_{\text{н,2}}); \\ &\dots\dots\dots \\ P_{\text{пр.н,n}} &= [P_{\text{пр.н-1,n}} + (1 - P_{\text{пр.н-1,n}})P_{\text{вн,n}}](1 - P_{\text{н,n}}). \end{aligned} \quad (7)$$

Модель виявлення дефектів на останньому кроці технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{\text{вя.н,1}} &= (P_{\text{пр.н-2,1}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,1}})P_{\text{в.н-1,1}})(1 - P_{\text{н-1,1}}) + \\ &+ \{1 - [P_{\text{пр.н-2,1}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,1}})P_{\text{в.н-1,1}}]\} P_{\text{в.н,1}}P_{\text{н,1}}; \\ P_{\text{вя.н,2}} &= (P_{\text{пр.н-2,2}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,2}})P_{\text{в.н-1,2}})(1 - P_{\text{н-1,2}}) + \\ &+ \{1 - [P_{\text{пр.н-2,2}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,2}})P_{\text{в.н-1,2}}]\} P_{\text{в.н,2}}P_{\text{н,2}} \\ P_{\text{вя.н,n}} &= [P_{\text{пр.н-1,n}} + (1 - P_{\text{пр.н-1,n}})P_{\text{вн,n}}]P_{\text{н,n}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Отримані математичні моделі дефектності багатокрокових технологічних процесів є досить громіздкими аналітичними залежностями. Компактнішим є матричне зображення цих моделей:

$$\begin{aligned} \|P_{\text{пр}}\| &= (\|P_{\text{пр.к-1,i}}\| + \|1 - P_{\text{пр.к-1,i}}\| \cdot \|P_{\text{в.к,i}}\|) \cdot \|1 - P_{\text{к,i}}\|, \quad (9) \\ \|P_{\text{вя}}\| &= (\|P_{\text{пр.к-1,i}}\| + \|1 - P_{\text{пр.к-1,i}}\| \cdot \|P_{\text{в.к,i}}\|) \cdot P_{\text{к,i}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad \kappa = \overline{1, n} \end{aligned}$$

Матриці в (9) мають верхньотрикутну форму. Якщо на к-тому кроці технологічного процесу контролю піддають лише параметри, сформовані к-тою технологічною операцією, то матриці імовірностей стають діагональними. Зазначимо, що в (9) добуток матриць обчислюється за правилом скалярного добутку матриць:

$$\begin{aligned} (A_1, A_2, \dots, A_m) &= \sum_{\kappa=1}^n \sum_{i=1}^n a_{\kappa,i}^{(1)} a_{\kappa,i}^{(2)} \dots a_{\kappa,i}^{(m)}, \\ A_j &= \|a_{\kappa,i}^{(j)}\|, \quad i = \overline{1, n}, \quad \kappa = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметрами керування дефектністю в наведених моделях є елементи матриць імовірностей уведення дефектів і матриць імовірностей вірного та невірного контролю.

---

### Висновки

---

Викладені підходи до імовірнісного моделювання наскрізних процесів забезпечення якості виробів і витрат, пов'язаних з їхнім проведенням, не мають суттєвих обмежень щодо складності структур і особливостей фізичної суті окремих технологічних операцій, з яких складаються процеси, що розглядаються. Запропонована методика математичного моделювання 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.

---

### Література

1. Недоступ Л.А. Оптимизация контроля, регулировки и технологической приработки приборов. – Львів: Вища школа, 1987. - 152 с.
2. Кіселичник М.Д. Моделювання та оптимізація процесів забезпечення якості. - Львів, 2001. - 168 с.
3. Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Питання теорії перетворення потоків при проведенні технологічних і контрольних процедур // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка", 1999. - № 369: Радіоелектроніка та телекомунікації. - С.172-176.
4. Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури. - Львів, 1996. - 167 с.
5. A. Zickis. Structural Model of Electronic Device Manufacturing Process Quality // Electronics and electrical engineering. - Technologija: Kaunas, 2006. - № 5 (69) - Pp. 37-40.