

его усовершенствования / А.П. Заболотный, Д.В. Федоша, Н.Л. Криворученко, О.О. Яценко // *Электротехника та електроенергетика*. – 2008. – № 2. – С. 71–74. 3. Заболотный А.П. Построение оптимальной структуры сетей электроснабжения предприятий АПК / А.П. Заболотный, Д.В. Федоша, В.С. Мамбаева // *Проблемы энергообеспечения предприятий АПК и сельских территорий: сборник научных трудов международной научно-практической конференции СПбГАУ.– СПб., 2008. – С. 42–46*. 4. Федоров АА., Садчиков С.В. Характеристики и алгоритмы формирования и отбора вариантов систем промышленного электроснабжения // *Электричество*. – 1982. – № 2. – С. 27–31.

УДК [621.396.6:658.018.2]:004.94

Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Киселичник  
Національний університет “Львівська політехніка”

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ФОРМУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЗАДАНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ У ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Ї Бобало Ю.Я., Недоступ Л.А., Киселичник М.Д., 2009

**Розглянуто питання математичного моделювання дефектності виробів та керування процесами формування заданих властивостей під час виробництва електронних пристроїв.**

**The questions of mathematical modeling of products imperfectness and management of processes of forming of the required properties during the production of electronic devices are examined.**

**Постановка проблеми.** Формування якості під час виконання технологічних процедур проводиться наданням виробу необхідних властивостей, які забезпечать можливість його використання за призначенням. Ці процедури супроводжуються появою виробничих дефектів внаслідок дії на процес великої кількості дестабілізуючих чинників. Рівень дефектності продукції є показником якості виробництва. Тому формуючу здатність технологічних процесів можна оцінювати рівнем сумарної дефектності, який визначається ефективністю виконання технологічних і контрольних процедур на всіх стадіях.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Незважаючи на широке використання типових технологій під час виробництва електронних пристроїв, типових структур технологічних процесів сьогодні не існує [1–3]. Впроваджуючи у виробництво нову техніку, структури процесів вибирають з міркувань тримання високих показників якості виробів і ефективності виробництва за мінімумом сумарних виробничих витрат. Характерним є те, що повний технологічний процес складається з певних його частин – стадій, під час яких виконуються передбачені структурою технологічні і контрольні процедури.

**Виклад основного матеріалу.** Із врахуванням можливості керування технологічними процесами шляхом цілеспрямованої зміни параметрів технологічних і контрольних процедур з метою забезпечення необхідного рівня якості виробів більшість процесів можна зарахувати до однієї з трьох таких груп.

1. Активно керовані процеси з найбільшою формуючою здатністю.

Їхня назва визначає основну цільову функцію. Керування ними відбувається зміною режимів процесів структуро- і формоутворення, складання, монтажу, регулювання виробів тощо, що забезпечує необхідну точність їх параметрів, для формування яких призначені ці процеси. Тут і далі показниками якості є:

P – імовірність правильного контролю якості виробів;

$P_{\text{пр}}$  – імовірність пропуску дефектів;

$P_{\text{вя}}$  – імовірність виявлення дефектів;

$P_{\text{деф}}$  – імовірність наявності дефектів.

Характерними для активно керованих процесів є такі значення показників якості:

$$P_{0,i} \neq 0; P_{\text{пр } 0,i} \neq 0; P_{\text{вя } 0,i} \neq 0; P_{\text{вя } k-1,i} \neq 0;$$

$$P_{\text{в } k,i} \neq 0; P_{k,i} \neq 0; P_{\text{пр } k,i} \neq 0; P_{\text{вя } k,i} \neq 0;$$

де  $k$  – номер технологічного процесу,  $i$  – формований параметр.

2. Пасивно або частково керовані процеси з обмеженою формуючою здатністю.

Зміна параметрів цих процесів є побічним ефектом зміни параметрів керованих процесів. Цей ефект має кореляційні зв'язки різної сили. Характерними для частково керованих процесів є:

$$P_{\text{пр } k-1,i} \neq 0; P_{\text{в } k,i} = 0; P_{k,i} = 0; P_{\text{пр } k,i} \neq 0; P_{\text{вя } k,i} = 0.$$

3. Некеровані процеси з відсутністю формуючої здатності.

Параметри цих процесів є постійними величинами:

$$P_{\text{пр } k-1,i} \neq 0; P_{\text{в } k,i} = 0; P_{k,i} = 0; P_{\text{пр } k,i} \neq 0; P_{\text{вя } k,i} = 0.$$

Вхідні і вихідні параметри, а також параметри керування ними для реальних багатокрокових процесів доцільно подавати до розрахунків показників якості виробів у матричному вигляді [2]. Залежно від керованості процесів, їхні параметри можна згрупувати в діагональні, смужкові і верхньокутові матриці.

Параметри активно керованих процесів описуються діагональною матрицею  $A$  з елементами  $a_{ki}$ ,  $1 \leq k, i \leq n$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \mathbf{L} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & \mathbf{L} & 0 & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ 0 & 0 & \mathbf{L} & a_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{L} & 0 & a_{nn} \end{pmatrix}$$

$$a_{ki} = a_{kk} \delta_{ki} = \begin{cases} a_{kk} & \text{при } k=i \\ 0 & \text{при } k \neq i \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\delta_{k,i}$  – символ Кронекера, який дорівнює одиниці при  $k=i$  і 0 при  $k \neq i$ .

У смужковій матриці  $B$  групуються параметри пасивно керованих процесів. При цьому

$$b_{ki} = 0 \text{ при } \begin{cases} i \in \overline{[1, k-l-1]} \\ i \in \overline{[1, n]} \end{cases}; \quad (2)$$

$$b_{ki} \neq 0 \text{ при } i \in \overline{[k-1, k-l]}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & b_{21} & b_{31} & b_{k1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & b_{32} & b_{k1} & b_{k+1,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{k1} & b_{k+1,3} & b_{k+2,3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & b_{k,k-1} & b_{k+1,k-1} & b_{k+2,k-1} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{k+1,k} & b_{k+2,k} & \dots & b_{n,n-k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{k+2,k+1} & \dots & b_{n,n-k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_{n,n-3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_{n,n-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_{n,n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

де  $l$  – ціле число, що визначає ширину смуги ненульових елементів матриці  $B$ .

Верхньокутна матриця  $C$  параметрів некерованих процесів характеризується всіма нульовими або всіма ненульовими значеннями своїх елементів  $C_{ki}$ :

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & C_{k+1,1} = 0 & C_{k+2,1} = 0 & C_{n,1} = 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{k+2,2} = 0 & C_{n,2} = 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{n,n-k-1} = 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Матриця-стовпчик параметрів керованих процесів вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів має вигляд

$$D = [d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0n}]^T,$$

Вид матриць параметрів активно керованих, пасивно керованих і некерованих процесів визначається за допомогою табл. 1:

Таблиця 1

П а р а м е т р и	Вид матриці			
	$D = \ d_{0,i}\ $	$A = \ a_{k,i}\ $	$B = \ b_{k,i}\ $	$C = \ c_{k,i}\ $
	$P_{\text{деф.0},i} \neq 0$	$P_{\text{в.к},i} \neq 0$	$P_{\text{в.к},i} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$	$P_{\text{в.к},i} = 0$
	$P_{0,i} \neq 0$	$P_{k,i} \neq 0$	$P_{k,i} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$	$P_{k,i} = 0$
	$P_{\text{пр.0},i} \neq 0$	$P_{\text{пр.0},i} \neq 0$	$P_{\text{пр.к},i} \neq 0$	$P_{\text{пр.к},i} \neq 0$
	$P_{\text{вя.0},i} \neq 0$	$P_{\text{вя.к},i} \neq 0$	$P_{\text{вя.к},i} = 0$	$P_{\text{вя.к},i} = 0$

Повна матриця параметрів процедур формування якості виробів  $M$  отримується підсумовуванням матриць-складових  $D, A, B, C$ :

$$M = [d \ a \ b \ c] \quad (4)$$

Отже, матриці  $D, A, B, C$  можна розглядати як блоки матриці  $M$ , а матрицю  $M$  – як синтезовану матрицю. Вона має такий вигляд:

$$M = \begin{pmatrix} d_{01} & a_{11} & b_{21} & b_{31} & b_{k1} & c_{k+1,1} & c_{k+2,1} & c_{n1} \\ d_{02} & 0 & a_{22} & b_{32} & b_{k1} & b_{k+1,2} & c_{k+2,2} & c_{n2} \\ d_{03} & 0 & 0 & a_{33} & b_{k1} & b_{k+1,3} & b_{k+2,3} & 0 & c_{n3} \\ d_{0k} & 0 & 0 & 0 & a_{kk} & b_{k+1,k} & b_{k+2,k} & 0 \\ d_{0,k+1} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{k+1,k+1} & b_{k+2,k+1} & b_{n,n-k} \\ d_{0,k+2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{k+2,k+2} & \\ d_{0,n-1} & 0 & 0 & 0 & & & & \\ d_{0n} & 0 & 0 & 0 & & & & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Виконане дослідження виробництва широкої номенклатури радіовимірювальних приладів показало, що ширина смуги ненульових елементів повної матриці параметрів активно керованих, пасивно керованих і некерованих процесів не є постійною. Вона змінюється під час технологічного процесу. Її ширина тим більша, чим більший вплив  $k$ -ї технологічної або контрольної операції на параметри виробу, які були сформовані на попередніх кроках технологічного процесу. Значення елементів цієї матриці зменшуються в міру віддалення від основної діагоналі.

Наведемо приклад матриці умовних імовірностей правильного контролю якості на основних стадіях технологічного процесу виготовлення друкованих плат комбінованим позитивним методом:

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0.55 & 0.50 & 0.14 & 0.12 & 0.20 & 0.07 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0.80 & 0.40 & 0.30 & 0.20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0.37 & 0.22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0.66 & 0.13 & 0.10 & 0.15 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0.45 & 0.47 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 1 & 0.44 & 0.12 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 1 & 0.23 & 0.06 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 1 & 0.17 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 1 & 0.67 & 0.33 \\ & & & & & & & & & 1 & 0.77 \\ & & & & & & & & & & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

де 1 – виготовлення заготовок; 2 – підготовка поверхні механічним способом; 3 – підготовка поверхні хімічним способом; 4 – виконання рисунка; 5 – нанесення лаку; 6 – свердління отворів; 7 – хімічне міднення; 8 – гальванічне нарощування; 9 – покриття сріблом або олово-свинцем; 10 – травлення міді; 11 – маркування.

З наведеного прикладу очевидно, що за рахунок пасивно керованих процесів глибина контролю якості в першій половині технологічного процесу істотно більша, ніж в другій. Отже, смуга ненульованих значень елементів матриці є збіжною. Ця особливість є характерною і для інших матриць параметрів реальних технологічних процесів.

Ймовірність пропуску дефектів по кожному з параметрів при вихідному контролі якості визначаються матрицею-стовпчиком

$$P_{пр.n} = [P_{пр.n1}, P_{пр.n2}, \dots, P_{пр.nn}]^T. \quad (6)$$

Елементи цієї матриці розраховуються за допомогою системи рекурентних залежностей.

$$\begin{aligned} P_{пр.n1} &= \{P_{пр.n-1,1} + (1 - P_{пр.n-1,1})P_{в.n1}\}(1 - P_{n1}); \\ P_{пр.n2} &= \{P_{пр.n-1,2} + (1 - P_{пр.n-1,2})P_{в.n2}\}(1 - P_{n2}); \end{aligned} \quad (7)$$

**L**

$$P_{пр.nn} = \{P_{деф.0,n}(1 - P_{0n}) + [1 - P_{деф.0,n}(1 - P_{0n})]P_{в.nn}\}(1 - P_{nn}).$$

Стан виробів на виході технологічного процесу характеризується об'єднанням подій  $A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nn}$  виникнення дефектів по кожному з  $n$  параметрів, тому з врахуванням їх адитивності ймовірність наявності дефектів  $P_{прn}$  визначається за умовою

$$P_{пр.n} = P\left(\bigcup_{i=1}^n A_{ni}\right) \quad (8)$$

Враховуючи сумісність подій  $A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nn}$ , дефектність виробів за всіма параметрами на виході технологічного процесу описується ймовірністю  $P_{пр.n,1+2+\dots+n} = P_{прn}$ :

$$\begin{aligned} P_{пр.n,1+2+\dots+n} &= P_{пр.n} = \sum_{1 \leq i \leq n} P_{пр.ni} - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P_{пр.ni_1} P_{пр.ni_2} + \mathbf{L} \rightarrow \\ &\rightarrow \mathbf{L} + (-1)^{S-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_S \leq n} P_{пр.ni_1} P_{пр.ni_2} \times \mathbf{L} \times P_{пр.ni_S} + \mathbf{L} \rightarrow \\ &\rightarrow \mathbf{L} + (-1)^{n-1} P_{пр.n1} P_{пр.n2} \times \mathbf{L} \times P_{пр.nn}, \end{aligned} \quad (9)$$

де ймовірності пропуску дефектів на  $n$ -му кроці технологічного процесу по  $i$ -му параметру,  $j = \overline{1, k}$ , визначається рівняннями:

$$\begin{aligned}
P_{\text{пр.н.1}} &= \langle [P_{\text{пр.н-2,1}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,1}})P_{\text{в.н-1,1}}](1 - P_{\text{н-1,1}}) + \\
&+ \{1 - [P_{\text{пр.н-2,1}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,1}})P_{\text{в.н-1,1}}](1 - P_{\text{н-1,1}})\}P_{\text{в.н1}} \rangle (1 - P_{\text{н1}}); \\
P_{\text{пр.н2}} &= \langle [P_{\text{пр.н-2,2}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,2}})P_{\text{в.н-1,2}}](1 - P_{\text{н-1,2}}) + \\
&+ \{1 - [P_{\text{пр.н-2,2}} + (1 - P_{\text{пр.н-2,2}})P_{\text{в.н-1,2}}](1 - P_{\text{н-1,2}})\}P_{\text{в.н2}} \rangle (1 - P_{\text{н2}});
\end{aligned}
\tag{10}$$

**L**

$$P_{\text{пр.н.н}} = \{P_{\text{пр.н-1,н}} + (1 - P_{\text{пр.н-1,н}})P_{\text{в.н.н}}\}(1 - P_{\text{н.н}}).$$

Ймовірність виходу придатних виробів одержуємо з рівняння

$$P_{\text{пр.н}} = 1 - P\left(\bigcup_{i=1}^n A_{\text{н,i}}\right). \tag{11}$$

**Висновки.** Наведена математична модель дефектності виробів на виході технологічного процесу є універсальною моделлю, її можна використовувати для процесів будь-якої структури і складності.

Наведені ймовірнісні моделі процесів формування дефектності під час серійного виробництва радіоелектронних пристроїв є моделями адаптивними, складання яких ґрунтується на використанні стохастичних залежностей показників якості від параметрів технологічних та контрольних процедур на основних стадіях виробництва. Вони характеризуються можливістю послідовного наближення своїх параметрів до параметрів об'єктів без використання таких класичних методів, як, наприклад, метод множинної кореляції, дисперсійного аналізу тощо. Для реальних багатокрокових і багатопараметричних процесів використання таких методів є практично неможливим. Матрична структура наведених моделей забезпечує можливість роботи з ними в діалоговому режимі, що підвищує оперативність внесення корекцій, визначення необхідних ресурсів і розв'язання оптимізаційних задач.

1. Бобало Ю.Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури. Монографія. – Львів: Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1996. – 168 с. 2. Кіселичник М.Д. Моделювання та оптимізація процесів забезпечення якості радіоелектронної апаратури: Монографія. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 168 с. 3. Bobalo Yu., Nedostup L., Nadobko O., Kiselychuk M., Lazko O. OPTAN-Software for Modelling, Analysis and Optimization of Electronic Devices Process Improvement // Przegląd Elektrotechniczny. – 2009. – С. 59–61.