

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

НЕСТОР НАТАЛІЯ ІГОРІВНА



УДК 621.396.69.002

**СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ВИРОБНИЦТВА РАДІОАПАРАТУРИ МЕТОДОМ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ
ФУНКЦІЙ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань і кафедрі систем автоматизованого проектування.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бондарєв Андрій Петрович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри теоретичної радіотехніки та
радіовимірювань.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Єфіменко Анатолій Афанасійович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри електронних засобів та інформаційно-
комп'ютерних технологій;

кандидат технічних наук, доцент
Шило Галина Миколаївна,
Запорізький національний технічний університет,
завідувач кафедри інформаційних технологій електронних
засобів.

Захист відбудеться «01» березня 2019 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. №226 головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «29» січня 2019 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., доцент*



I. В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день автоматизація рутинної роботи конструктора переросла у функціональний процес проектування конструкторської документації, де важливою ланкою є коректне застосування функціональних математичних моделей об'єктів проектування на МІКРО, МАКРО і МЕТА рівнях, в тому числі із використанням обчислювальних технологій.

У виробництві радіоелектронної апаратури (РЕА) завжди актуальними були математичні і статистичні завдання аналізу та оптимізації технологічних процесів, оскільки саме вони є визначальними при забезпеченні конкурентоздатності продукції, що досягається на практиці переважно пошуком оптимального співвідношення ціни та якості виробів. Чільне місце в цьому ланцюжку належить автоматизації проектно-конструкторських та науково-дослідних робіт, в тому числі – з застосуванням комп'ютерно-інформаційних технологій практично на усіх етапах проектування, а, враховуючи особливості і складність технологічного процесу (ТП) виробництва радіоелектронних пристроїв (РЕП), значна увага завжди приділялась розробленню методів моделювання цього процесу, на підставі результатів якого вдається цілеспрямовано його оптимізувати.

Процес оптимізації технологічного процесу безпосередньо пов'язаний із процедурою статистичного опрацювання даних комп'ютерного чи реального експерименту. Такий підхід не лише не розриває неперервний виробничий процес, але й дає змогу здійснювати його цілеспрямовану корекцію, в тому числі – за умови шкідливих впливів різноманітних випадкових факторів, зокрема таких, як фізична неоднорідність матеріалів, параметри якості енергоносіїв, втомлюваність засобів виробництва, температурні, силові та інші збурення. Як свідчить практика, оптимальним в цьому плані залишається математичне моделювання на основі співвідношень і теорем теорії ймовірностей та математичної статистики. Незважаючи на те, що базові засади статистично-оптимізаційних методів в основному розроблені, врахування реальних виробничих дефектів вимагає конкретизації самих математичних моделей, перш за все, із урахуванням результатів різноманітних процедур інтерполяції та лінеаризації експериментальних даних. Тому актуальним є наукове завдання розроблення економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірнісно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій, оскільки зазначений підхід не досліджувався у працях вчених, які працюють у напрямку тематики цього дисертаційного дослідження, зокрема В.П. Романова, Н.А. Ширяєвої, В.Ю. Корольова, К.Г. Скачека, І.А. Будзко, П.К. Кабкова, В.С. Пугачова, Н.С. Бородачова, В.М. Крищука, Г.М. Шило, Ю.Я. Бобала та інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Завдання, які розглядаються у дисертаційній роботі, є складовою частиною наукових проектів, які виконуються на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань і кафедрі систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка».

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань – «Теорія і методи проектування радіотехнічних кіл, систем і комплексів та забезпечення їх якості», а також науковому напрямку кафедри систем автоматизованого проектування – «Моделювання технологічних процесів та складних систем».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення РЕП на основі імовірно-статистичних моделей із використанням математичного апарату характеристичних функцій.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі часткові завдання:

- Провести аналіз існуючих методів дослідження технологічних процесів, зокрема у галузі виробництва радіоелектронних пристроїв.
- Розробити метод отримання аналітичних виразів для опису реальних розподілів на базі характеристичних функцій, які дають можливість відновлення розподілу відносних відхилень контрольованих параметрів із максимальною точністю.
- Для спрощення моделювання визначити базовий набір операцій технологічного процесу, який складається з операцій обробки та операцій контролю.
- Отримати аналітичні вирази на основі характеристичних функцій для опису елементів базового набору технологічних операцій. Дослідити вплив технологічних операцій з типового набору на закон розподілу відносних відхилень контрольованих параметрів виробу.
- Отримати аналітичні вирази для еквівалентних перетворень послідовного та паралельного з'єднання технологічних операцій, які складають базовий набір.
- Розробити алгоритм прогнозування відсотка придатних виробів на виході технологічного процесу згідно зі статистикою дефектів технологічних операцій.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси виготовлення радіоелектронних пристроїв та їх окремі операції.

Предметом дослідження є методи статистичного аналізу технологічних процесів виробництва радіоапаратури з урахуванням реальних розподілів відносних відхилень контрольованого параметра із застосуванням математичного апарату характеристичних функцій.

Методи досліджень, які використані в дисертації включають методи статистичного аналізу технологічних процесів, математичний апарат теорії ймовірностей, теорії матриць, обчислювальної математики, характеристичних функцій.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше розроблено метод аналізу похибок складних за структурою технологічних процесів (ТП), який, на відміну від точкових та інтервальних оцінок, ґрунтується на аналізі повного фактичного розподілу багатовимірних випадкових величин, що для лінеаризованих (відносно похибок) моделей робить можливим суттєво підвищити адекватність самої моделі, а отже, знизити вартість робіт на розроблення ТП.

2. Уперше, на базі розробленого методу, для оцінювання багатовимірних розподілів похибок технологічних операцій і побудови їх моделей отримано характеристичні функції, які дають змогу описувати реальні закони розподілу відносних відхилень контрольованого параметра без обмежень на характер статистичних зв'язків між ними.

3. Удосконалено метод прогнозування статистичних показників якості готових виробів на основі статистики дефектів технологічних операцій, що робить можливим підвищити точність оцінювання технологічного процесу з урахуванням індивідуальності конкретного виробництва.

Практичне значення одержаних результатів. Найбільш важливі практичні результати дисертаційних досліджень полягають в тому, що розроблені моделі та алгоритми дають змогу:

- для існуючих ТП – виявити «вузькі» місця, визначити технологічні операції (ТО), які найбільш істотно впливають на формування показників якості виробів, і за результатами проведення аналізу здійснити оптимізацію процесу;
- для ТП, що проектуються – ще на ранніх стадіях проектування проаналізувати можливі похибки ТП і скоротити терміни впровадження виробів у серійне виробництво, зокрема налагодити виробничі процеси виготовлення РЕА та РЕП.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використано в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для розроблення та модернізації курсів лекцій з дисциплін «Розробка систем комп'ютерного проектування», «Автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва».

Особистий внесок здобувача. Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно в Національному університеті «Львівська політехніка». У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1,3,4,14,19,20] - написані одноосібно ([1,3,4] – програмна

реалізація алгоритму оптимізації, [14,19,20] – програмна реалізація алгоритму та моделі технологічних операцій); [2,11,16,22,23,24] – розроблення моделей технологічних операцій обробки та контролю; [17,18] – побудова регресійних моделей технологічних операцій; [5,13]- розроблення моделей операцій контролю з відбракуванням виробів по верхній та нижній межах; [6, 12, 15, 21] моделі технологічних операцій оброблення та контролю; [6-9] – алгоритм формування моделі ТП як однієї укрупненої операції, [7,8,9,10] – моделі операцій обробки та контролю.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: 11-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії – TCSET» (смт. Славське, 2012 р.), 9-ій, 10-ій, 11-ій Міжнародних НТК «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки» (с. Поляна, 2007, 2009, 2011 рр.), 5-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (м. Чернівці, 2016 р.); 7-й міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, 2014 р.); 16-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (м. Одеса, 2015 р.), а також ряді Міжнародних НТК «Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів» (м. Львів, 1994-1997 рр.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 24 наукові праці, з них 9 статей у виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України [1-9], 1 - у науковому періодичному виданні іншої держави (Республіка Польща) – [10], 4 публікації у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій, які індексуються в Scopus – [11-14] та 10 публікацій у збірниках праць всеукраїнських науково-технічних конференцій – [15-24].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг дисертації 165 сторінок, з яких основний зміст викладений на 101 сторінці друкованого тексту, що містить 28 рисунків, 1 таблицю. Список посилань налічує 150 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, зв'язок з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих

результатів, подано інформацію про впровадження результатів роботи, особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

У першому розділі – «Сучасні методи аналізу та оптимізації статистичних характеристик параметрів технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв» – проведено аналіз показників якості та особливостей процесів виготовлення РЕП, а також методів їх прогнозування, який показав, що структури технологічних схем різних ТП можна звести до декількох типових і переважна більшість існуючих методів прогнозування якості продукції базується на точкових (проф. Недоступ Л. А., проф. Бобало Ю.Я.) або інтервальних (проф. Крищук В.М., доц. Шило Г.М.) оцінках імовірності відхилення контрольованого параметра від нормативу без урахування фактичного розподілу цих відхилень. На основі цього зроблено висновок, що актуальним є завдання розроблення методу прогнозування якості продукції, який базується на реальних розподілах похибок контрольованого параметра, що дає змогу розробити на його основі метод аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірнісно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій, потенційно економний за витратами часу.

У другому розділі – «Застосування характеристичних функцій для формування моделей похибок базових технологічних операцій» – розроблено моделі типових технологічних операцій і метод їх побудови на основі ступінчатої функції розподілу.

Аналіз похибок технологічних процесів із застосуванням характеристичних функцій, як і будь-які методи інтегральних перетворень, є ефективним в тих випадках, коли остаточний результат вдається отримати в аналітичній формі. У переважній більшості випадків для складних ТП такі перетворення на практиці не є здійсненними. Тому алгоритми аналізу точності виробництва доцільно будувати на основі поєднання аналітичних і обчислювальних методів.

Механізм урахування похибок послідовних ТО у результуючому розподілі є досить складним, що і викликало таку велику кількість робіт, пов'язаних із їх апроксимацією. В цій роботі пропонується використовувати апарат характеристичних функцій для отримання наскрізного розподілу імовірності відхилення від нормативу. Характеристичні функції отримуються з використанням перетворення Фур'є з обов'язковим масштабуванням та нормуванням розподілів імовірностей. Використання характеристичних функцій для аналізу ТП значно спрощує отримання параметрів розподілу похибок на кожному з етапів виробництва і дає можливість, при необхідності, визначити фактичний розподіл імовірності відхилення від нормативу. Дослідження показали, що при відновленні початкового закону розподілу по характеристичній функції порядок значень модуля різниці коливається в межах 10^{-15} .. 10^{12} , тобто можна вважати, що відновлення закону по характеристичній функції є точним. Такі результати було отримано для розподілів, які описані аналітичними виразами, модельних розподілів та розподілів, заданих статистично.

В цій роботі пропонується використовувати універсальну ступінчасту функцію густини розподілу ймовірностей. Ступінчаста функція густини розподілу ймовірностей (рис. 1), яка відповідає кусково-лінійному інтегральному розподілу, є зручною і простою апроксимацією для густин складної форми, в тому числі і розподілів, для яких важко або і неможливо підібрати апроксимуючу функцію.

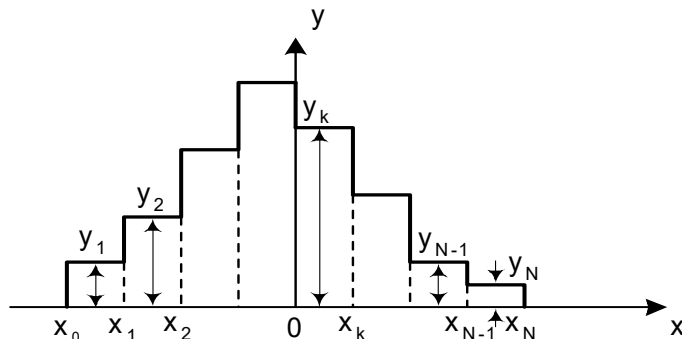


Рис. 1. Ступінчаста функція густини розподілу ймовірностей

Крок по координаті x приймаємо рівномірним і рівним h . Тоді $x_k = x_0 + hk$ ($k=1,2,\dots,N$). Характеристичну функцію для такого розподілу можна визначити із таких співвідношень:

- для одновимірного закону:

$$g_{cm}(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i\lambda x} dx = \sum_{k=1}^N y_k \int_{x_{k-1}}^{x_k} e^{-i\lambda x} dx = \frac{i}{\lambda} \sum_{k=1}^N y_k (e^{-i\lambda x_k} - e^{-i\lambda x_{k-1}}). \quad (1)$$

- для багатовимірного закону:

$$g_{cm}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = (-i)^n \sum_{k_1=1}^{N_1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} y_{k_1 \dots k_n} \prod_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} (e^{i\lambda_j x_{k_j}} - e^{i\lambda_j x_{k_j-1}}). \quad (2)$$

Для визначення параметрів універсальної функції $f_{CT}(x)$ представимо її рядом Маклорена і, прирівнюючи члени ряду при однакових ступенях в рядах універсальної і характеристичної функцій та долучивши умову нормування, отримаємо систему N лінійних рівнянь для обчислення значень y_k :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N \frac{y_k}{r+1} (x_k^{r+1} - x_{k-1}^{r+1}) = i^{-r} \left[\frac{d^r}{d\lambda^r} g(\lambda) \right]_{\lambda=0}, & r = 1, 2, \dots, N-1. \\ \dots \dots \dots \dots \\ h \sum_{k=1}^N y_k = 1, \end{cases} \quad (3)$$

За аналогією отримуємо систему рівнянь для обчислення параметрів багатовимірної універсальної функції розподілу $f_{cm}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за даною характеристичною $g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$.

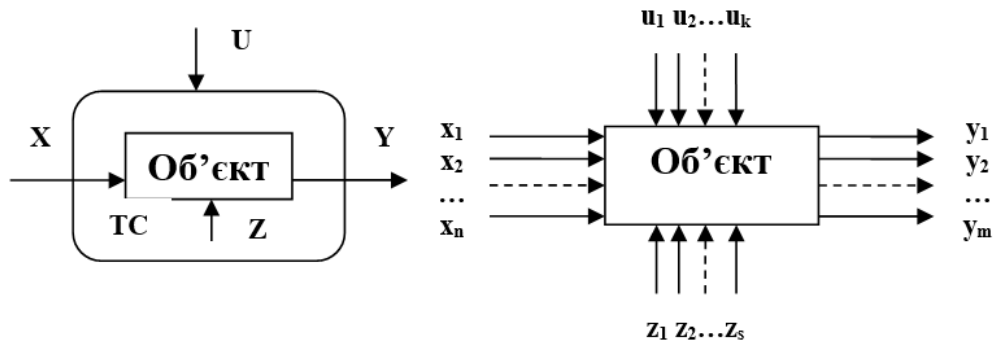


Рис. 2. Схема ТО і її зв'язки з оточуючим середовищем
(ТС- технологічне середовище)

На основі цих співвідношень побудовано моделі базових елементів технологічного процесу. Джерелами відхилень від номінальних значень параметрів ТП є впливи зовнішнього середовища, а також шуми і флуктуації різних величин, які виникають усередині системи. Об'єкт виготовлення пов'язаний із технологічним середовищем множиною зв'язків, які визначають його стан в процесі виробництва.

В загальному вигляді схема ТО і її зв'язки з оточуючим середовищем (технологічним середовищем) представлені на рис. 2.

В загальному випадку об'єкт характеризують такі параметри:

- вхідні величини (входи) - $X^t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;
- управляючі впливи (управління) - $U^t = (u_1, u_2, \dots, u_k)$;
- збурюючі впливи (збурення) - $Z^t = (z_1, z_2, \dots, z_s)$;
- вихідні величини (виходи) - $Y^t = (y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Вхідними назвемо параметри, значення яких можуть бути виміряні, але можливість впливу на них в даній операції відсутня. Ці параметри не залежать від режимів даної технологічної операції, оскільки формуються на попередніх етапах ТП.

До управляючих віднесемо параметри, на які можна безпосередньо впливати у відповідності з поставленими вимогами, що дає можливість керувати процесом.

Збурюючими назвемо параметри, значення яких випадковим чином змінюються в часі і які недоступні для вимірювання.

До вихідних належать параметри, значення яких зумовлені режимом ТП. Ці параметри характеризують стан об'єкта як результат сумарного впливу вхідних, управляючих і збурюючих параметрів.

Вектори Y , X , U , Z в загальному випадку є випадковими, а їх компоненти – корельованими. Залежність між випадковим вектором стану Y і векторами X , U , Z можна записати в вигляді:

$$Y = AX + BU + \Gamma Z + \Theta, \quad (4)$$

де A , B , Γ - прямокутні матриці зв'язку з розмірами відповідно $(m \times n)$, $(m \times k)$ і $(m \times s)$, а Θ - не випадковий вектор розміру m .

При розрахунку похибки технологічного процесу зручніше користуватися рівняннями виробничих похибок у відносних величинах із безрозмірними елементами матриць зв'язку. Безрозмірна форма рівняння є найбільш загальною, не зв'язаною з масштабами і одиницями розмірності величин різної фізичної природи. Відносні похибки величин обчислюємо згідно формул:

$$\begin{aligned} \delta_{x_p} &= \frac{X_p - x_{Hp}}{x_{Hp}}, & \delta_{u_p} &= \frac{U_p - u_{Hp}}{u_{Hp}}, \\ \delta_{y_p} &= \frac{Y_p - y_{Hp}}{y_{Hp}}, & \delta_{z_p} &= \frac{Z_p - z_{Hp}}{z_{Hp}}. \end{aligned} \quad (5)$$

При побудові моделі технологічної операції експериментальним шляхом можна визначити лише сумарний вплив компоненти Δ_z на вихідні параметри Δ_y , оскільки ці внутрішні збурення не контролюються, а часто навіть їх фізична природа невідома. Тому рівняння (4) в блочній формі матиме вигляд:

$$\Delta_y = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_u \\ \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де: \mathbf{S} - це m -вимірний вектор сумарного впливу внутрішніх збурень; \mathbf{E} - одинична матриця з розмірами $(m \times m)$.

Позначимо через $\mathbf{g}_x(\lambda)$, $\mathbf{g}_y(\lambda)$, $\mathbf{g}_u(\lambda)$, $\mathbf{g}_s(\lambda)$ характеристичні функції векторів Δ_x , Δ_y , Δ_u і \mathbf{S} , відповідно. Тоді, виходячи з незалежності цих векторів і прийнявши, що математичні сподівання похибок m_u і m_s дорівнюють нулю, для обробляючої технологічної операції отримуємо характеристичну функцію у вигляді:

$$\mathbf{g}_y(\lambda) = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \lambda) e^{-\frac{1}{2} \lambda^t (\mathbf{B} \mathbf{K}_u \mathbf{B}^t + \mathbf{K}_s) \lambda} = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \lambda) \mathbf{g}_0(\lambda). \quad (7)$$

Матриця \mathbf{K}_0 - симетрична і за фізичним змістом – це кореляційна матриця сумісного впливу векторів \mathbf{U} і \mathbf{S} на похибки вихідних параметрів технологічних операцій.

Окрім операцій із одним потоком на вході і одним потоком на виході в технологічних процесах часто присутні технологічні операції із декількома потоками на вході і одним на виході (наприклад операція збирання). Для таких операцій характерним є те, що вхідний потік формується змішуванням вихідних потоків X_1, X_2, \dots, X_n від n попередніх технологічних операцій. У цьому випадку випадкові величини X_i ($i=1,2,\dots,n$) є незалежними і тому, виходячи з властивостей характеристичних функцій, справедливим є твердження, що для випадкової величини

$$X = \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

характеристична функція набуде вигляду

$$g_y(\lambda) = g_0(\lambda) \prod_{i=1}^n g_{x_i}(\mathbf{A}_i^t \lambda). \quad (9)$$

На функції розподілу похибок особливий вплив має вимірювальний поопераційний контроль, який розділяє потік виробів на два субпотіки (“придатні” і “брак”) і сильно змінює функцію розподілу похибок виробів, які поступають на подальшу обробку.

Розглянемо операцію контролю з розділенням по верхніх границях всіх параметрів: на вхід операції контролю поступають однорідні вироби, які характеризуються n контрольованими параметрами. Відносні відхилення параметрів від номінальних є випадковими величинами і задаються випадковим вектором із корельованими компонентами

$$\delta_x = \|\delta_{x_1}, \dots, \delta_{x_n}\|. \quad (10)$$

Позначимо сумісну густину розподілу цього вектора через $w_x(x_1, \dots, x_n) = w_x(x)$. Характеристична функція розподілу визначається з виразу:

$$g_x(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(\lambda_1 x_1, \dots, \lambda_n x_n)} w(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = g_x(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(\lambda, x)} w_x(x) dx. \quad (11)$$

В останньому виразі інтеграл слід розуміти як багатовимірний, а (λx) як скалярний добуток векторів λ і x . Надалі будемо користуватися переважно такою скороченою формою запису.

Контрольна операція розділяє вироби по заданих граничних значеннях похибок $a = \|a_1, \dots, a_n\|$. Для визначеності прийемо, що a - вектор верхніх граничних значень. За рахунок похибок вимірювань розділення здійснюється неточно. Прийемо, що похибки вимірювань δ_x розподілені за нормальним законом із нульовим математичним сподіванням і задаються сумісною густиною розподілу:

$$w_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2^n \pi^n |K_x|}} e^{-\frac{1}{2}(K_x^{-1} x, x)}, \quad (12)$$

де K_x - кореляційна матриця вектора x та $|K_x|$ - визначник кореляційної матриці.

Характеристична функція вектора похибок вимірювань має вигляд:

$$g_x(\lambda) = e^{-\frac{1}{2}(K_x \lambda, \lambda)}. \quad (13)$$

Введемо випадковий вектор результату вимірювань $\eta = \delta_x + \delta_u$ і визначимо його густину розподілу $w_s(s)$. Якщо вектори δ_x і δ_u незалежні, то характеристична функція вектора η визначається з виразу

$$g_s(\lambda) = g_x(\lambda)g_u(\lambda) = g_s(\lambda)e^{-\frac{1}{2}(K_s\lambda,\lambda)}. \quad (14)$$

Після розділення по верхніх граничних значеннях вектора a для потоку виробів, які прийняті як придатні, густина розподілу контрольованих параметрів із урахуванням похибок вимірювання набуває вигляду:

$$w_\tau(\tau) = \begin{cases} \frac{w_s(\tau)}{c} & \tau \leq \mathbf{a} \\ 0 & \tau > \mathbf{a} \end{cases}, \quad (15)$$

де:
$$c = \int_{-\infty}^{a_1} \dots \int_{-\infty}^{a_n} w_s(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1 \dots d\xi_n = \int_{-\infty}^a w(\xi) d\xi.$$

Характеристична функція для операцій контролю ТП в скороченому записі відповідно має вид:

$$g_\tau(\lambda) = \int_{-\infty}^{\mathbf{a}} e^{i(\lambda,\tau)} w_s(\tau) d\tau. \quad (16)$$

Видаляючи з вектора τ похибки вимірювань, отримаємо випадковий вектор вихідних параметрів виробу, який поступає на подальшу обробку після операції контролю. Характеристичною функцією різниці $\tau - \delta_k$ буде:

$$g_y(\mathbf{y}) = g_\tau(\lambda)g_u(-\lambda) = e^{-\frac{1}{2}(K_u \lambda,\lambda)} \int_0^{\mathbf{a}} e^{i(\lambda,\tau)} w_s(\tau) d\tau. \quad (17)$$

Підкреслимо, що в потоці виробів, які вважаються придатними з певною ймовірністю можуть бути вироби, параметри яких виходять за межі допуску, оскільки процес їх розділення відбувається з похибками.

Таким же способом можна отримати функцію для операцій контролю з розділенням по нижній границі допуску. Для цього слід поміняти знак вектора похибок δ_x і модифікувати межі інтегрування.

Ланцюжок перетворень для цього випадку має такий вигляд (збережені всі позначення попереднього випадку):

$$g_s(\lambda) = g_x(\lambda)g_u(\lambda) = g_s(\lambda)e^{-\frac{1}{2}(K_s\lambda,\lambda)}, \quad (18)$$

$$w_\tau(\tau) = \begin{cases} \frac{w_s(\tau)}{c} & \tau > \mathbf{a} \\ 0 & \tau \leq \mathbf{a} \end{cases}. \quad (19)$$

Характеристична функція для операцій контролю ТП в скороченому записі, відповідно, має вигляд:

$$g_{\tau}(\lambda) = \int_a^{\infty} e^{i(\lambda, \tau)} w_s(\tau) d\tau. \quad (20)$$

При необхідності контролю щодо потрапляння значення контрольованого параметра до меж заданого інтервалу, операція контролю розглядається як дві послідовні операції контролю по одній межі.

Третій розділ – «Статистичні моделі типових з'єднань технологічних операцій у технологічних процесах» – дисертаційної роботи присвячений моделюванню точності технологічних процесів і розробленню пакету процедур для аналізу та оптимізації технологічних процесів.

Зважаючи на складність та громіздкість реальних ТП, особливо у галузі виробництва РЕА, з метою спрощення їх математичного опису та полегшення обчислень можна виділити ряд типових послідовностей виконання технологічних операцій:

- технологічні операції, які виконуються послідовно одна за одною;
- технологічні операції, які виконуються паралельно одна одній у часі над потоками однотипних виробів;
- технологічні операції, які виконуються паралельно одна одній у часі над потоками різнотипних виробів.

У простому послідовному технологічному процесі, який складається з декількох ланок, виріб почергово проходить кожну ланку, зазнаючи на кожній із них певних наперед визначених трансформацій. Оскільки кожна ланка впливає на об'єкт, то при її проходженні змінюються і параметри об'єкта, а отже можуть трансформуватися і розподіли відносних відхилень контрольованих параметрів. Кожну ланку характеризують параметрами перетворення похибок, але всі вони розглядаються в рамках лінійної моделі. Особливістю послідовного ТП є те, що вихідні параметри TO_j є входними для TO_{j+1} . Виділимо з процесу дві суміжні ланки TO_j і TO_{j+1} (див. рис. 3).

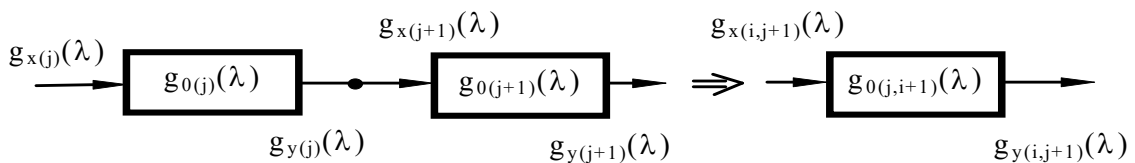


Рис.3. Послідовне з'єднання ТО оброблення.

Характеристичну функцію операції TO_j описує рівняння (7). Для послідовного поєднання технологічних операцій характерним є те, що характеристична функція на виході j -ї ТО є входною для $(j+1)$ -ї. Тобто справедливим є вираз:

$$g_{x(j+1)}(\lambda) = g_{y(j)}(\lambda). \quad (21)$$

Враховуючи формули (7) і (21), запишемо характеристичну функцію на виході операції TO_{j+1} :

$$g_{y(j+1)}(\lambda) = g_{x(j)}(A_{(j+1)}^t \lambda) g_{0(j+1)}(\lambda) = g_{x(j)}(A_{(j)}^t A_{(j+1)}^t \lambda) g_{0(j)}(A_{(j+1)}^t \lambda) g_{0(j+1)}(\lambda), \quad (22)$$

де \mathbf{A} - прямокутні матриці зв'язку відповідних розмірів. Після відповідних перетворень і підстановок отримаємо вираз, який пов'язує характеристичні функції на вході j -ї та виході $(j+1)$ -ї технологічних операцій:

$$g_{y(j+1)}(\lambda) = g_{x(j)}(A_{(j,j+1)}^t \lambda) g_{0(j,j+1)}(\lambda). \quad (23)$$

З виразу (23) видно, що дві послідовні обробні операції можна замінити однією еквівалентною. Процес об'єднання можна поширити на довільну кількість послідовних операцій.

У якості початкових операцій у таких послідовних ланках дуже часто для вхідних параметрів $X_{(1)}$ можна прийняти нормальний закон розподілу. Тоді для послідовної ланки з r операцій оброблення отримаємо наступний вираз:

$$g_{y(1,r)}(\lambda) = g_{x(1)}(A_{(1,r)}^t \lambda) g_{0(1,r)}(\lambda) = e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_{(0)} \mathbf{A}_{(1,r)}^t \lambda, \mathbf{A}_{(1,r)}^t \lambda)} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_{(1,r)} \lambda, \lambda)}, \quad (24)$$

де \mathbf{K}_0 - кореляційна матриця вхідних параметрів; r - кількість послідовних операцій оброблення.

Паралельне з'єднання технологічних операцій оброблення однорідних виробів (див. рис. 4) виникає в тих випадках, коли однакові технологічні операції виконуються паралельно на декількох технологічних ланках із різними параметрами, тобто коли для синхронізації потоку необхідно прискорити проходження виробів через ТО.

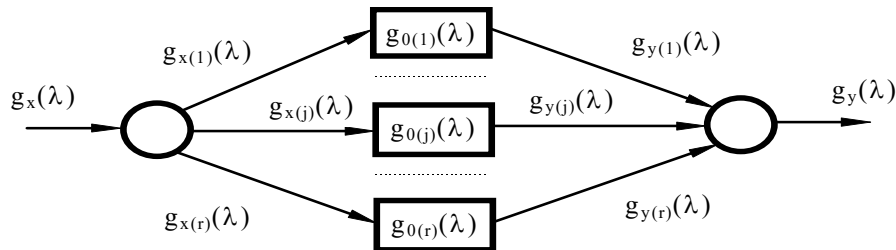


Рис. 4. Паралельне з'єднання операцій оброблення в ТП

Вважатимемо, що розділення потоку здійснюється випадково та i -тою технологічною ланкою обробляється частина виробів всього потоку, яка визначається зі співвідношення

$$\alpha_i = \frac{N_i}{N}. \quad (25)$$

Значення N_i залежить від пропускної здатності обладнання ланки ТП. Для оброблення всього потоку повинна виконуватися умова:

$$\sum_{i=1}^t \alpha_i = 1, \quad (26)$$

де t - кількість паралельних ланок. Кожен частковий потік має такий самий закон розподілу, як і весь вхідний потік. Але на виході кожної ланки закони можуть

відрізнятися. Тому для паралельного з'єднання технологічних операцій оброблення однорідних виробів отримуємо вираз для характеристичної функції:

$$g_y(\lambda) = \sum_{j=1}^t \alpha_j g_x(A_{(j)}^t \lambda) e^{-\frac{1}{2} \lambda^t K_{0(j)} \lambda}. \quad (27)$$

Паралельне з'єднання технологічних операцій оброблення потоків різнорідних виробів є моделлю групової технологічної операції. З погляду аналізу похибок ТП, особливістю такої структури технологічного процесу є те, що закони розподілу похибок окремих потоків корельовані і їх сукупність слід розглядати як таку, що підпорядковується одному багатовимірному загальному закону розподілу.

Як приклад, на рис. 5 зображено один із можливих варіантів структурної схеми такої технологічної ланки. Перша операція технологічної ланки – групова операція оброблення. Наступні паралельні операції – операції оброблення окремих потоків (наприклад, операції додаткового оброблення штампованих деталей). Третя операція – операція оброблення всього потоку (наприклад, операція збирання).

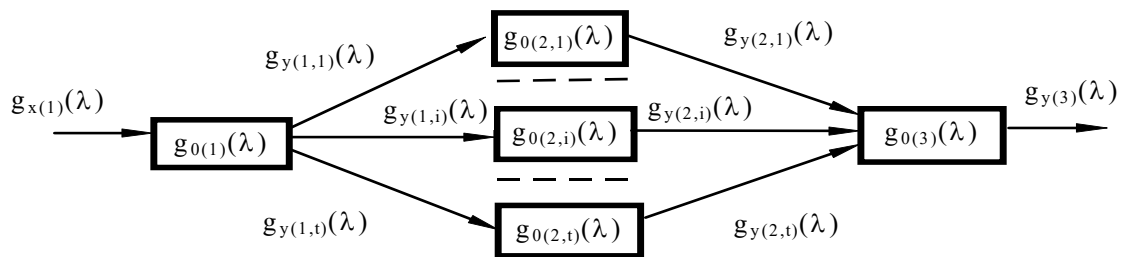


Рис.5. Паралельна структура технологічної ланки з обробленням різнорідних потоків.

Характеристичну функцію для опису такої структури визначаємо за формулами (23) і (24) для послідовного з'єднання технологічних операцій з урахуванням блочної структури матриць зв'язку окремих операцій.

Для першої технологічної операції матричне рівняння у блочній формі, відповідно до розмірів окремих векторів похибок на виході операції, має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{y_1(1)} \\ \dots \\ \Delta_{y_i(1)} \\ \dots \\ \Delta_{y_t(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1(1)} & B_{1(1)} & E_{1(1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{i(1)} & B_{i(1)} & E_{i(1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{t(1)} & B_{t(1)} & E_{t(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_{x(1)} \\ \Delta_{u(1)} \\ S(1) \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Для групи операцій паралельного оброблення аналогічні матриці зв'язку мають вигляд матриць, елементами головної діагоналі яких є $A_{i(2)}$ – прямокутні матриці A окремих операцій, елементи поза головною діагоналлю - нульові матриці відповідних розмірів. Матриці B і E мають таку ж структуру з точністю до позначень і розмірів окремих блоків.

Для третьої технологічної операції блочну структуру має тільки матриця A :

$$\mathbf{A}_{(3)} = \left\| \mathbf{A}_{1(3)} \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{i(3)} \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{t(3)} \right\|. \quad (29)$$

При аналізі складних схем технологічних процесів отримані формули дають можливість спростити обчислення попередньою заміною послідовних виробничих ланок еквівалентними операціями. Визначення характеристичної функції зводиться до простих операцій із матрицями.

Основним алгоритмом обчислення вихідних похибок ТП є метод згортки. Цей алгоритм полягає в тому, що на кожній ітерації в структурній схемі технологічного процесу виділяють типові структури, розглянуті вище, замінюють еквівалентними укрупненими ТО і визначають для них характеристичні функції.

В четвертому розділі – «Порівняльний аналіз та приклади оптимізації» – здійснено порівняння результатів аналізу та оптимізації шестикрокового ТП виготовлення друкованих одношарових плат РЕА комбінованим позитивним методом за допомогою розробленого прототипу програмного комплексу, який використовує моделювання технологічного процесу за допомогою характеристичних функцій та програмного комплексу **ОПТАН-ГК**, розробленого у Національному університеті «Львівська політехніка». Проведений аналіз показав, що врахування реального закону розподілу відхилень дає змогу отримати більш точний прогноз проценту браку виробів, а відтак і знайти більш оптимальний варіант технологічного процесу (див. рис. 6). На цьому рисунку представлено закон розподілу відхилень від нормативу контрольованого параметра вхідної партії матеріалів (див. рис. 6а), та зміну розподілу відносного відхилення контрольованого параметру при проходженні виробом технологічного процесу (див. рис. 6б).

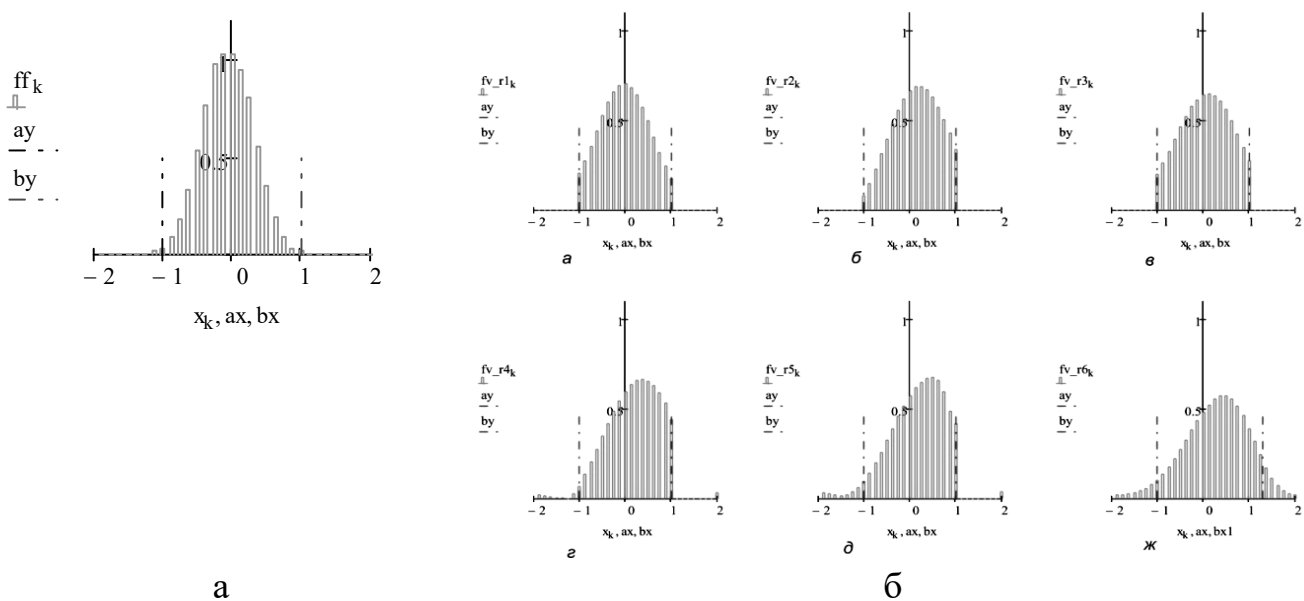


Рис. 6. Розподіли відносних відхилень від нормативу:
а – параметрів партії матеріалів; б – контрольованого параметра виробів на виході технологічних операцій.

У Додатку А подано основні властивості характеристичних функцій, на яких базуються розрахунки у представлених в дисертації моделях.

Розроблений метод аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій є економним за витратами часу тому, що завдяки властивостям цих функцій значно зменшується об'єм обчислень при перетворенні законів розподілу відносних відхилень. Також цей метод робить можливим отримання додаткової інформації щодо виявлення операцій, які максимально впливають на виникнення дефектів для оптимального розміщення операцій контролю по ходу ТП.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання розроблення економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій. При розв'язанні поставленого завдання отримані такі наукові та практичні результати:

1. На основі аналізу існуючих методів дослідження технологічних процесів зроблено висновок, що ці методи, в основному, використовують точкові або інтервальні оцінки. Тому актуальним є розроблення методів статистичного оцінювання ТП, які враховують реальні розподіли відносних відхилень контрольованих параметрів від номіналу.

2. Розроблено метод отримання аналітичних виразів та графіків реальних розподілів на базі характеристичних функцій, які дають змогу відновити на їх основі розподіл відносних відхилень контрольованого параметра з похибкою не більше 10^{13} .

3. У роботі розглянуто базовий набір операцій технологічного процесу, який складається з типових операцій обробки. А саме:

- з одним потоком на вході та одним потоком на виході,
- з декількома потоками на вході і одним потоком на виході,
- з одним потоком на вході і декількома потоками на виході.

До базового набору також віднесено операції контролю з відбракуванням виробів по нижній межі та з відбракуванням виробів по верхній межі.

4. Отримано аналітичні вирази на основі характеристичних функцій для опису елементів базового набору технологічних операцій та графічно проілюстровано перетворення «вхід-вихід» закону розподілу відносних відхилень контрольованих параметрів низки типових технологічних операцій.

5. Отримано аналітичні вирази для типових з'єднань декількох операцій

- послідовного;

- паралельного з'єднання з однотипними потоками на вході;
- паралельного з'єднання з різнотипними потоками на вході.

6. Для прогнозування статистичних показників щодо виходу придатних виробів за статистикою дефектів технологічних операцій розроблено ітераційний алгоритм заміни декількох технологічних операцій однією еквівалентною з метою зменшення кількості обчислень. Відповідно до цього алгоритму, спрощення можна проводити покроково, включно із заміною усього технологічного процесу однією еквівалентною операцією.

7. Розроблений метод був застосований до аналізу чотирьох типових технологічних процесів у виробництві радіоелектронної апаратури. Отримані результати показують, що розроблені моделі, на відміну від точкових та інтервальних оцінок, є чутливими до форми розподілу відносних відхилень контрольованого параметра, що дає змогу для оцінки виходу придатних виробів підвищити точність прогнозу на 6-10%.

8. Розроблено економний за витратами часу метод аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірнісно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій. Точна кількісна оцінка виграшу є утрудненою тим, що через складність математичних перетворень реальні розподіли вкрай рідко використовують для моделювання технологічних процесів. Експертна порівняльна оцінка показує виграш від застосування запропонованого методу по часу на 2-3 порядки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Нестор Н. І. Оптимізація технологічних процесів по критеріях якості та мінімальних виробничих витрат методом гілок і границь // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». 1995. № 289: Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв. С. 65–69.

2. Мотика І. І., Нестор Н. І. Аналіз похибок технологічних операцій з використанням характеристичних функцій // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». 1998. № 327: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 100–110.

3. Нестор Н. І. Оптимізація послідовності технологічних операцій за критеріями виходу придатних виробів і вартості виробів // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». 1999. № 373: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 42–46.

4. Нестор Н. І. Пакет процедур для розв'язання оптимізаційних задач методом гілок та границь // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2000. № 398: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 99–104.

5. Мотика І. І., Нестор Н. І. Моделі операцій контролю для аналізу точності технологічних процесів // Вісник Національного університету «Львівська

політехніка». 2002. № 444: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 57–60.

6. Мотика І. І., Недоступ Л. А., Нестор Н. І. Стандартний розподіл імовірностей для аналізу похибок технологічних процесів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2006. № 564: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 79–82.

7. Мотика І. І., Недоступ Л. А., Нестор Н. І. Бібліотека моделей технологічних операцій для аналізу точності процесів виготовлення // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2008. № 626: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 126–132.

8. Мотика І. І., Недоступ Л. А., Нестор Н. І. Моделі для статистичного аналізу технологічних процесів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009. № 651: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 78–81.

9. Мотика І. І., Недоступ Л. А., Нестор Н. І. Моделювання статистичних характеристик технологічних процесів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2010. № 685: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 55–59.

Публікація у науковому періодичному виданні іншої держави:

10. Bondariev A., Nestor N. Advantages of the use of characteristic functions for the statistical analysis of technological processes // Machine Dynamics Research. 2017. Vol. 41, № 3. P. 5–12. (ISSN 2080-9948, Республіка Польща)

Публікації у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій:

11. Kernytskyu A., Motyka I., Nestor N. Models for analysis of accuracy of technological processes // The experience of designing and applications of CAD systems in microelectronics : proc. of the IX Intern. conf., 20-24 Feb. 2007, Lviv, Polyana, Ukraine. Lviv, 2007. P. 303-304. (Scopus)

12. Motyka I., Nestor N., Karkulyovskyy V., Kernytskyu A. Recursive algorithm of statistical analysis of technological process applying characteristic functions // The experience of designing and applications of CAD systems in microelectronics : proc. of the X Intern. conf., 24-28 Febr. 2009, Lviv, Polyana, Ukraine. Lviv, 2009. P. 42. (Scopus)

13. Motyka I., Nestor N. Models of control operations with the division of the limits of parameters // The experience of designing and applications of CAD systems in microelectronics : proc. of the XI Intern. conf., 23-25 Febr. 2011, Lviv, Polyana, Ukraine. Lviv, 2011. P. 417–418. (Scopus)

14. Nestor N. Package of procedures for the decision of optimization tasks by the method of branches and borders // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії : матеріали XI Міжнар. конф. TCSET2012, 21-24 лют. 2012 р., Львів, Славське, Україна. Львів, 2012. С. 462. (Scopus)

15. Бондарев А. П., Нестор Н. І. Застосування характеристичних функцій для опису законів розподілу похибок комбінованих технологічних операцій. // Труды XVI Междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2015), 25 - 29 мая 2015 г., Украина, г. Одесса. С.12-13.

16. Мотика І.І., Нестор Н. І. Метод аналізу виробничих похибок. // Матеріали Міжнародної НТК «Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів», Львів, 1994. С. 14-15.

17. Мелень М.В., Кіселичник М.Д., Бобало Ю. Я., Якубенко В.М., Нестор Н. І. Дослідження кореляційних залежностей надійності РЕА від рівня якості виробництва. // Матеріали Міжнародної НТК «Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів». 21-27 лютого, Львів, 1994. С. 14.

18. Недоступ Л.А., Бобало Ю. Я., Якубенко В.М., Нестор Н. І. Моделі процесів формування якості РЕА з врахуванням адитивності та мультиплікативної дефектності виробництва. // Матеріали Міжнародної НТК «Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів». 21-27 лютого, Львів, 1994. С. 38.

19. Нестор Н. І. Програмний модуль для оптимізації технологічних процесів методом гілок і границь. // Тези доповідей Міжнародної НТК «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки», 20-26 лютого 1995 р., Львів, 1995. С. 156

20. Нестор Н. І. Застосування характеристичних функцій для аналізу похибок технологічних процесів. // «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки». Тези доп. 4-ої Міжнар. наук.-техн. конф., Львів, 1997. С. 131-132.

21. Kernitskiy A., Motyka I., Nedostup L., Nestor N.I. Basic set of models for statistical analysis of technological processes. // Proceedings of the XVI International Ukrainian-Polish Conference «CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Problems». 13-14 October, Lviv, Ukraine, 2008. P. 98-99.

22. Motyka I., Nedostup L., Nestor N. Models of technological processes for statistical analysis. // Proceedings of the XVII Polish – Ukrainian Conference on “CAD in Machinery Design – Implementation and Educational Problems. October 9-10, Krasieczyn, 2009. P. 37-38.

23. Бондарев А.П., Нестор Н. І. Моделювання законів розподілу похибок технологічних операцій із застосуванням характеристичних функцій. // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей VII Міжнарод. наук.-практ. конф., 17-19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя. – Запоріжжя: ЗНТУ. С. 264-265.

24. Бондарев А.П., Нестор Н. І. Модель технологічної операції із урахуванням розподілів параметрів технологічного середовища. // Proceedings of the Vth International Scientific Practical Conference «Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems», 3–5 November 2016, Chernivtsi, Ukraine, 2016. P. 181-182.

АНОТАЦІЯ

Нестор Н. І. Статистичне моделювання технологічних процесів виробництва радіоапаратури методом характеристичних функцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертацію присвячено розв’язанню важливого науково-технічного завдання - розробленню економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій.

У роботі було проведено аналіз реального стану забезпечення якості широкого спектру РЕП при їх серійному виробництві і визначені основні причини виникнення дефектів при виготовлення РЕП і їх відмов при експлуатації. На основі цього аналізу запропоновано методи моделювання реальних процесів формування якості виробів із використанням інформації, якою володіє підприємство. Такий підхід забезпечує отримання математичних моделей, які максимально точно відображають процеси, що є характерними для підприємства. Запропоновано методи визначення оптимальних вимог до якості матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів та інших ресурсів, при яких забезпечується необхідний рівень якості РЕП при мінімальних виробничих витратах. Розроблено методи визначення оптимальної глибини контролю і раціонального розміщення контрольних операцій у структурі процесу, при яких забезпечується необхідний рівень якості виробів при мінімальних виробничих витратах.

На основі запропонованих методів і моделей розроблено прототип пакету процедур для аналізу технологічних процесів виробництва РЕП, за допомогою якого отримано прогнозовані показники якості готових виробів, що підтверджують адекватність запропонованих моделей і методів.

Запропоновані моделі та методи оптимізації процесів формування і контролю якості характеризуються гнучкістю і можуть бути використані для оптимізації виробництва широкого спектру РЕП, що випускаються серійно.

Ключові слова: математична модель, моделі технологічних операцій, моделі операцій обробки, моделі операцій контролю, виносні відхилення від номіналу, аналіз технологічних процесів, характеристична функція.

ABSTRACT

Nestor N. I. Statistical modelling of technological processes of radio equipment production by the method of characteristic functions. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.13 – «Radio Engineering Devices and Telecommunication Means» (172 – Telecommunications and Radio Engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical task - the development of economy time-consuming method of analysis of technological processes for the manufacture of radio-electronic devices based on probabilistic-statistical models using characteristic functions.

In the work the analysis of the real state of quality assurance of a wide range of radio-electronic devices (RED) was conducted in their serial production field and the main causes of defects in the manufacture of RED and their failure during operation were determined. Based on this analysis, methods were contributed for modelling real processes of forming product quality using the information that the enterprise owns. This approach provides the obtaining of mathematical models that accurately reflect the processes that are typical for the enterprise. The methods of determining the optimal requirements for the quality of materials, semi-finished products, component parts and other resources, which provide the required level of quality of RED with minimum production costs, are offered. The methods of determining the optimum depth of control and rational placement of control operations in the structure of the process, in which the required level of quality of products at the minimum production costs is ensured.

On the basis of the proposed methods and models a prototype of a package of procedures for the analysis of technological processes of RED production was developed, with the help of which predicted quality indicators of finished products were obtained, which confirm the adequacy of the proposed models and methods.

The contributed models and methods of quality formation and quality controlling processes optimization are characterized by flexibility and can be used to optimize the production of a wide range of RED, which are produced serially.

Keywords: mathematical model, model of technological operations, model of processing operations, models of control operations, relative divergence from the nominal, analysis of technological processes, characteristic function.

АННОТАЦИЯ

Нестор Н. И. Статистическое моделирование технологических процессов производства радиоаппаратуры методом характеристических функций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи - разработке экономного по затратам времени метода анализа технологических процессов изготовления радиоэлектронных устройств на основе вероятностно-статистических моделей с использованием характеристических функций.

В работе был проведен анализ реального состояния качества широкого спектра радиоэлектронных устройств (РЭУ) при их серийном производстве и определены основные причины возникновения дефектов при изготовлении РЭУ и их отказов при эксплуатации. На основе этого анализа предложены методы моделирования реальных процессов формирования качества изделий с использованием информации, которой располагает предприятие. Такой подход обеспечивает получение математических моделей, которые максимально точно отражают процессы, характерные для предприятия. Предложены методы определения оптимальных требований к качеству материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и других ресурсов, при которых обеспечивается необходимый уровень качества РЭУ при минимальных производственных затратах. Разработаны методы определения оптимальной глубины контроля и рационального размещения контрольных операций в структуре процесса, при которых обеспечивается необходимый уровень качества изделий при минимальных производственных затратах.

На основе предложенных методов и моделей разработан прототип пакета процедур для анализа технологических процессов производства РЭУ, с помощью которого получены прогнозируемые показатели качества готовых изделий, подтверждающие адекватность предложенных моделей и методов.

Предложенные модели и методы оптимизации процессов формирования и контроля качества характеризуются гибкостью и могут быть использованы для оптимизации производства широкого спектра РЭУ, выпускаемых серийно.

Ключевые слова: математическая модель, модели технологических операций, модели операций обработки, модели операций контроля, относительные отклонения от номинала, анализ технологических процессов, характеристическая функция.