

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НЕСТОР НАТАЛІЯ ІГОРІВНА

УДК 621.396.69.002

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ /Н. І. Нестор/

Науковий керівник –
доктор технічних наук, професор
Бондарєв Андрій Петрович,

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.10*

/І.В. Демидов/

Львів – 2019

АНОТАЦІЯ

Нестор Н.І. Статистичне моделювання технологічних процесів виробництва радіоапаратури методом характеристичних функцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.13 «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська Політехніка» МОН 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 ймовірнісно-статистичних моделей із використанням характеристичних функцій.

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 проведено аналіз показників якості та особливостей процесів виготовлення РЕП а також методів їх прогнозування, який показав, що структури технологічних схем різних ТП можуть бути зведені до декількох типових і переважна більшість методів прогнозування якості продукції базується на точкових або інтервальних оцінках імовірності відхилення контрольованого параметра від нормативу без урахування фактичного розподілу цих відхилень.

У другому розділі дисертації розроблено моделі типових технологічних операцій і метод їх побудови на основі ступінчатої функції розподілу.

Аналіз похибок технологічних процесів із застосуванням характеристичних функцій, як будь-які методи інтегральних перетворень, є ефективним в тих випадках, коли остаточний результат вдається отримати в аналітичній формі. У переважній більшості випадків для складних технологічних процесів такі перетворення практично не реальні. 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 з апроксимацією. В даній 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. Можна стверджувати, що використання їх для аналізу технологічних процесів значно спрощує отримання параметрів розподілу на кожному з етапів і дозволяє 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 описуються аналітичними виразами, модельних розподілів та розподілів, заданих статистично.

В цій роботі ми пропонуємо використовувати як універсальну ступінчасту функцію густини розподілу ймовірностей. Ступінчаста густина розподілу ймовірностей, 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.

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

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

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, хоча б в принципі, але можливість впливу на них в даній операції відсутня. Припустимо також, що ці параметри не залежать від режимів даної технологічної операції.

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 міняються в часі і які недоступні для вимірювання.

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

При розрахунку точності технологічного процесу зручніше користуватися рівняннями виробничих похибок у відносних величинах з

безрозмірними елементами матриць зв'язку. Безрозмірна форма рівняння є найбільш загальною, не зв'язаною з масштабами і розмірностями величин різної фізичної природи.

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.

Окрім операцій з одним потоком на вході і одним потоком на виході в технологічних процесах часто присутні технологічні операції з декількома потоками на вході і одним на виході (н.пр. операція збирання). Для таких операцій характерним є те, що вхідний потік формується змішуванням вихідних потоків X_1, X_2, \dots, X_n п попередніх технологічних операцій.

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

Операція контролю з розділенням по верхніх границях всіх параметрів.

На вхід операції контролю поступають однорідні вироби, які характеризуються п контрольованими параметрами. Відносні відхилення параметрів від номінальних є випадковими величинами і задаються випадковим вектором із корельованими компонентами

Контрольна операція розділяє вироби по заданих граничних значеннях похибок $a = \|a_1, \dots, a_n\|$. Для визначеності приймемо, що a - вектор верхніх граничних значень. За рахунок похибок вимірювань розділення здійснюється неточно.

Підкреслимо, що в потоці виробів, які вважаються придатними з певною ймовірністю можуть бути вироби, параметри яких виходять за межі допуску, оскільки 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_u) і модифікувати межі інтегрування.

При контролі на попадання значення контрольованого параметра в заданий інтервал контрольна операція розглядається як дві послідовні контрольні операції по одній межі

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений моделюванню точності технологічних процесів і розробці пакету процедур для аналізу та оптимізації технологічних процесів.

Зважаючи на складність та громіздкість реальних ТП, 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 r ланок, виріб по чергово проходить кожну ланку, зазнаючи на кожній певних наперед визначених трансформацій. Оскільки кожна ланка впливає на об'єкт, то при проходженні її змінюються і параметри об'єкта, а отже можуть трансформуватися і розподіли відносних відхилень контрольованих параметрів. Кожна ланка характеризується своїми параметрами перетворення похибок, але всі вони розглядаються в рамках лінійної моделі. Особливістю послідовного ТП є те, що вихідні параметри TO_j є вхідними для TO_{j+1} .

Процес об'єднання здійснюється шляхом заміни двох послідовних технологічних операцій однією еквівалентною і його можна продовжити на довільну кількість послідовних операцій.

Паралельне з'єднання технологічних операцій обробки однорідних виробів виникає в тих випадках, коли однакові технологічні операції виконуються паралельно на декількох технологічних ланках з різними параметрами, коли для синхронізації потоку необхідно прискорити проходження виробів через ТО.

Паралельне з'єднання технологічних операцій оброблення потоків різнорідних виробів може служити моделлю групової технологічної операції. З погляду аналізу похибок особливістю такої структури технологічного процесу є те, що закони розподілу похибок окремих потоків корельовані і їх слід розглядати як один багатовимірний сумісний закон розподілу.

Характеристичну функцію такої структури можна знайти за формулами 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 добутку квадратної матриці коефіцієнтів зв'язку і матриці-стовбчика, яка відображає вплив технологічної операції на об'єкт обробки.

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 з матрицями.

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

В четвертому розділі розглянуто порівняння результатів аналізу та оптимізації шести крокового ТП виготовлення друкованих одношарових плат комбінованим позитивним методом за допомогою розробленого прототипу пакету процедур, який використовує моделювання технологічного процесу за допомогою характеристичних функцій та системи ОПТАН-ГК. Проведений аналіз показав, що врахування реального закону розподілу відхилень дозволяє отримати більш точний прогноз проценту браку, а відтак і знайти більш оптимальний варіант технологічного процесу.

Таким чином, у дисертаційній роботі розв'язано науково-технічне завдання розроблення економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірнісно-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 вигравш від застосування запропонованого методу по часу на 2-3 порядки.

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.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

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.

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)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Kernytskyy 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., Karkulyovsky V., Kernytskyy 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 – Imlementacion 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.

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 economical time-consuming method of analysis of technological processes for the manufacture of radio-electronic devices based on probabilistic-statistical models with the use of characteristic functions.

In the introduction the reasons for choosing the topic of research, the connection with scientific programs, plans, themes, formulated the purpose and objectives of the research, the scientific novelty and the practical value of the results obtained, information on the implementation of the results of the work, the

personal contribution of the applicant, the testing of work and publication, is provided.

In the first section the analysis of indicators of quality and features of processes of manufacture of radio-electronic products and their methods of forecasting was carried out, which showed that the structures of technological schemes of various technological processes can be reduced to several typical and overwhelming majority of methods of forecasting the quality of products based on point or interval estimates of the probability of deviation a controlled parameter from the norm without taking into account the actual distribution of these deviations.

In the second section of the dissertation the models of typical technological operations and the method of their construction on the basis of a stepped distribution function are developed.

The analysis of the errors of technological processes using characteristic functions, as any methods of integral transformations, is effective in those cases where the final result can be obtained in an analytical form. In the vast majority of cases for such complex processes, such transformations are practically not real. Therefore, algorithms for analyzing the accuracy of production should be based on a combination of analytical and computational methods.

The mechanism for taking into account the errors of successive technological operations in the resulting distribution is rather complicated, which has caused so many work related to approximation. In this paper it is proposed to use the apparatus of characteristic functions to obtain a cross-sectional distribution of the probability of deviation from the norm. Characteristic functions are obtained using Fourier transform with obligatory scaling and distribution distributions. It can be argued that their use for the analysis of technological processes greatly simplifies the obtaining of distribution parameters at each of the stages and allows, if necessary, to determine the actual distribution of the probability of deviation from the norm. Studies have shown that when the initial distribution law is restored to

the characteristic function, the order of the values of the difference module varies within $10^{-15} - 10^{-12}$, that is, it can be assumed that the restoration of the law on the characteristic function is accurate. Such results were obtained for distributions, which are described by analytical expressions, model distributions and distributions given statistically.

In this paper, it is proposed to use as a universal stepwise probability distribution density function. The stepwise probability distribution density, which corresponds to a piecewise linear integral distribution, is a convenient and simple approximation for densities of complex form, including distributions for which it is difficult or impossible to find an approximating function.

To determine the parameters of the universal function $f_{cr}(x)$ we represent it in the Maclaren series, and, equating the members of a series with the same in the series of universal and characteristic functions, and adding the condition of normalization, we obtain a system of N linear equations for the calculation of values y_k .

Based on these relationships, we build the models of the basic elements of the technological process. The sources of deviations from the nominal values of the parameters of the technological process are the effects of the external environment, as well as noise and fluctuations of various quantities that occur inside the system. The object of manufacturing is associated with the technological environment of many connections that determine its state in the production process.

In general, the object is characterized by the following parameters: input values (inputs) - $\mathbf{X}^t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; control impacts (management)- $\mathbf{U}^t = (u_1, u_2, \dots, u_k)$; perturbing effects (perturbation)- $\mathbf{Z}^t = (z_1, z_2, \dots, z_s)$; output values (outputs) - $\mathbf{Y}^t = (y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Inputs we call the parameters whose values can be measured, at least in principle, but the possibility of influencing them in this operation is absent.

Assume also that these parameters do not depend on the modes of this technological operation.

To managing impacts, we will refer the parameters that can be directly influenced in accordance with the requirements, which allows you to manage the process.

Disturbing, we call parameters whose values change in a random way in time and which are not available for measurement.

The output includes parameters whose values are due to the process mode. These parameters characterize the state of the object as a result of the total influence of input, control and disturbing parameters.

When calculating the accuracy of the process, it is more convenient to use the equations of production errors in relative quantities with dimensionless elements of matrices of communication. The dimensionless form of the equation is the most general, unrelated to the scale and dimensions of the variables of different physical nature.

When constructing a model of a technological operation, experimentally only the total effect of the components Δ_z on the output parameters Δ_y can be determined, since these internal disturbances are not controlled, and often, even their physical nature is unknown.

In addition to operations with one thread at the input and one output stream in the technological processes, there are often operations with multiple input streams and one at the output (for example, an assembly operation). For such operations, it is characteristic that the input stream is formed by mixing the output streams X_1, X_2, \dots, X_n of the n previous technological operations.

On the function of error distribution is a special influence on measuring operational control, which divides the stream of products into two ("fit" and "lack") and greatly changes the function of error distribution of products, which are applied for further processing.

Consider a control operation with division at the upper bounds of all parameters. On the input of control operations are homogeneous products, which are characterized by n controlled parameters. Relative deviations of the parameters from the nominal are random variables and are given by a random vector with correlated components.

The control operation divides the products according to the given limit values of the errors $a = \|a_1, \dots, a_n\|$. For certainty, we assume that a is a vector of upper boundary values. Due to errors of measurement, separation is not performed accurately.

We emphasize that products that are considered to be suitable for a certain probability may be products whose parameters are beyond the scope of tolerance, since the separation occurs with errors.

In the same way, you can get a function for control operations with division at the lower tolerance limit. To do this, you should change the error vector sign (δ_u) and modify the boundaries of integration.

When controlling the hit value of the controlled parameter in a given interval, the control operation is considered as two successive control operations at one limit.

The third section of the dissertation is devoted to the simulation of the accuracy of technological processes and the development of a package of procedures for the analysis and optimization of technological processes.

In view of the complexity and cumbersome nature of the actual technological processes, in order to simplify their mathematical description and facilitate calculations, one can distinguish a number of typical sequences of execution of technological operations:

- technological operations, which are performed consecutively one after another;

- technological operations performed parallel to each other over time over flows of the same type;

- technological operations performed parallel to each other over time over flows of various types of products.

In a simple, continuous process that consists of R-links, the product passes through each link alternately, undergoing each specific predetermined transformation. Since each link affects the object, it passes through and changes the parameters of the object, and therefore can be transformed and distributions of relative deviations of controlled parameters. Each link is characterized by its error-converting parameters, but they are all considered within the linear model. The feature of the successive TP is that the initial parameters of the technological operation (j) are input for the technological operation (j+1).

The process of the merger is carried out by replacing two successive technological operations with one equivalent and it can be extended to an arbitrary number of successive operations.

A parallel connection of technological operations for the processing of homogeneous products occurs in those cases where the same technological operations are performed in parallel on several technological links with different parameters, when for the flow synchronization it is necessary to accelerate the passage of products through technological operation.

A parallel connection of technological operations to handle flows of heterogeneous products can serve as a model of group technological operation. From the point of view of the analysis of errors, the feature of such a structure of the technological process is that the laws of the distribution of the errors of individual flows are correlated and should be regarded as one multidimensional compatible distribution law.

The characteristic function of such a structure can be found by the formulas for the sequential connection of technological operations, taking into account the block structure of the matrices of communication of individual operations.

For the first technological operation, the matrix equation in block form in accordance with the size of individual error vectors at the output of the operation has the form of product of the square matrix of coupling coefficients and matrix-column, which reflects the impact of the technological operation on the object of processing.

When analyzing complex schemes of technological processes, the formulas obtained make it possible to simplify the calculation by replacing the successive production units by equivalent operations. The definition of the characteristic function reduces to simple operations with matrices.

The main algorithm for calculating the output errors of a TP is the convolution method. This algorithm consists in the fact that at each iteration in the structural scheme of the technological process, the typical structures considered above are replaced by the equivalent of the enlarged TOs and determined by their characteristic functions.

In the fourth section, the comparison of the results of the analysis and optimization of the six-step TP for the production of printed single-layer boards by a combined positive method is considered with the help of the developed prototype of the package of procedures, which uses the simulation of the technological process using the characteristic functions and the system OPTAN-GK. The analysis showed that taking into account the real law of the distribution of deviations allows us to obtain a more accurate forecast of the percentage of the lack, and thus to find a more optimal version of the technological process.

Thus, in the dissertation the scientific and technical task of development of economical time-consuming method of analysis of technological processes of manufacture of radio-electronic devices on the basis of probabilistic-statistical models with the use of characteristic functions is solved. When solving the problem, the following scientific and practical results were obtained:

1. On the basis of the analysis of existing methods of research of technological processes, it was concluded that these methods mainly use point or

interval estimates. Therefore, it is important to develop methods for statistical estimation of TP, which take into account the real distributions of relative deviations of controlled parameters from the nominal value.

2. The method of obtaining analytical expressions and graphs of real distributions based on characteristic functions is developed, which allow to restore on their basis the distribution of relative deviations of the controlled parameter with an error of not more than 10^{-13} .

3. The paper deals with the basic set of operations of the technological process, which consists of typical processing operations. Namely:

- with one input stream and one output stream;
- with multiple input streams and one output stream;
- with one input stream and several output streams.

The base set also includes control operations with the lowering of products and the discarding of products at the upper limit.

4. The analytical expressions are derived on the basis of characteristic functions for the description of the elements of the basic set of technological operations and graphically illustrated the transformation of the "input-output" of the law of distribution of relative deviations of controlled parameters of a number of typical technological operations.

5. The analytical expressions for typical connections of several operations are obtained:

- sequential;
- parallel connection with the same flows at the input;
- parallel connection with different types of input streams.

6. For prediction of statistical indicators for the output of suitable products by the statistics of defects in technological operations, an iterative algorithm for replacing several technological operations with one equivalent has been developed in order to reduce the number of calculations. In accordance with this algorithm,

simplification can be done step by step, including the replacement of the whole process by one equivalent operation.

7. The developed method was used to analyze four typical technological processes in the production of radio-electronic equipment. The obtained results show that the developed models, in contrast to the point and interval estimates, are sensitive to the form of distribution of relative deviations of the controlled parameter, which allows to increase the accuracy of the forecast for 6-10% to estimate the output of the corresponding products.

8. An economical time-consuming method of analysis of technological processes for the manufacture of radio-electronic devices based on probabilistic-statistical models with the use of characteristic functions is developed. The exact quantitative estimation of the gain is complicated by the fact that due to the complexity of mathematical transformations, real distributions are extremely rarely used to simulate technological processes. An expert comparative evaluation shows the gain from the application of the proposed method by 2-3 orders of magnitude.

The offered models and methods of optimization of processes of formation and control of quality are characterized by flexibility and can be used to optimize the production of a wide range of repos, 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.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis are published:

1. Nestor N. I. Optimization of technological processes according to the criteria of quality and minimum production costs by the method of branches and boundaries // Bulletin of the State University "Lviv Polytechnic". 1995. No. 289: Theory and Design of Semiconductor and Radioelectronic Devices. P. 65-69.

2. Motyka I.I., Nestor N.I. Analysis of errors of technological operations using characteristic functions // Bulletin of the State University "Lviv Polytechnic". 1998. No. 327: Computer Design Systems. Theory and practice. P. 100-110.
3. Nestor N. I. Optimization of the sequence of technological operations according to the criteria for the yield of suitable products and the cost of products // Bulletin of the State University "Lviv Polytechnic". 1999. No. 373: Computer Design Systems. Theory and practice. P. 42-46.
4. Nestor N. I. A package of procedures for solving optimization problems by the method of branches and boundaries // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2000. No. 398: Computer Design Systems. Theory and practice. P. 99-104.
5. Motyka I.I., Nestor N.I. Models of control operations for the analysis of the accuracy of technological processes // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2002. No. 444: Computer Design Systems. Theory and practice. P. 57-60.
6. Motyka I. I., Nedostup L. A., Nestor N. I. Standard distribution of probabilities for the analysis of technological processes errors // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2006. No. 564: Computer Systems Design. Theory and practice. P. 79-82.
7. Motyka I. I., Nedostup L. A., Nestor N. I. Library of models of technological operations for the analysis of the accuracy of manufacturing processes // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2008. No. 626: Computer Design Systems. Theory and practice. P. 126-132.
8. Motyka I. I., Nedostup L. A., Nestor N. I. Models for statistical analysis of technological processes // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2009. No. 651: Computer systems design. Theory and practice. P. 78-81.

9. Motyka I. I., Nedostup L. A., Nestor N. I. Modeling of statistical characteristics of technological processes // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2010. No. 685: Computer Design Systems. Theory and practice. P. 55-59.

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, No. 3. P. 5–12. (ISSN 2080-9948, Republic of Poland)

Proceedings that certify an improvement of thesis:

11. Kernytskyy 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., Kernytskyy 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 // Modern problems of radio electronics, telecommunications, computer engineering: materials XI Intern. conf. TCSET2012, Feb 21-24. 2012, Lviv, Slavske, Ukraine. Lviv, 2012. P. 462. (Scopus)

15. Bondariev A. P., Nestor N. I. Application of characteristic functions for the description of the laws of the distribution of errors of combined technological

operations. // Proceedings of the XVI International scientific practice. conf. "Modern Information and Electronic Technologies" (СИЭТ-2015), May 25 - 29, 2015, Ukraine, Odessa. 12-13.

16. Motyka I.I., Nestor N.I. The Method of Analysis of Industrial Errors. // Materials of International NTC "Modern problems of automated development and production of radio-electronic means and training of engineers", Lviv, 1994. P. 14-15.

17. Melen M. V, Kiselychnik M. D, Bobalo Yu. Ya., Yakubenko V.M., Nestor N. I. Research of correlation dependencies of reliability of REA on the level of production quality. // Materials of International NTC "Modern problems of automated development and production of radio-electronic means and training of engineers". February 21-27, Lviv, 1994. p. 14.

18. Nedostup L. A, Bobalo Yu. Ya., Yakubenko VM, Nestor N. I. Models of processes of formation of the quality of REA with allowance for additivity and multiplicative defect production. // Materials of International NTC "Modern problems of automated development and production of radio-electronic means and training of engineers". February 21-27, Lviv, 1994. p. 38.

19. Nestor N. I. The program module for optimization of technological processes by the method of branches and boundaries. // Abstracts of International NTC reports "Experience in the development and application of instrumental and technological CADM microelectronics", February 20-26, 1995, Lviv, 1995. p. 156

20. Nestor N. I. Application of characteristic functions for the analysis of technological processes errors. // «Experience in the development and application of instrumental and technological CAD microelectronics». Abstract supplementary 4th International Sci.-Tech. Conf., Lviv, 1997. P. 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. Bondariev A. P, Nestor N. I. Modeling of the laws of the distribution of errors in technological operations with the use of characteristic functions. // Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies: theses of reports VII International. sci. pract. Conf., September 17-19, 2014, Zaporozhye. - Zaporozhye: ZNTU. P. 264-265.

24. Bondariev A. P, Nestor N. I. Model of technological operation taking into account distribution of parameters of the technological environment. // 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	30
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ	43
1.1. Показники якості радіоелектронних пристроїв	43
1.2. Аналіз особливостей технологічних процесів виготовлення радіоелектронних приладів.	49
1.3. Статистичні методи аналізу точності технологічних процесів	61
1.4. Висновки до першого розділу	63
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ПОХИБОК БАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ	64
2.1. Математичний та фізичний зміст характеристичних функцій у описі технологічних операцій.	64
2.2. Приклади аналізу випадкових величин з використанням апарату характеристичних функцій	65
2.2.1. Характеристичні функції величин, розподіли яких описуються аналітичними виразами	65
2.2.2. Характеристичні функції модельних розподілів	68
2.2.3. Характеристичні функції випадкових величин із розподілами, які неможливо описати аналітично	69
2.3. Моделі базових елементів технологічних процесів.	75
2.3.1. Характеристична функція технологічної операції із одним потокком на вході і одним на виході	75
2.3.2. Технологічна операція із декількома потоками на вході і одним на виході.	83

2.3.3 Технологічна операція з одним потоком на вході і декількома на виході.	85
2.3.4. Характеристичні функції розподілів похибок операцій контролю	85
2.4. Висновки до другого розділу	89

РОЗДІЛ 3. СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ ТИПОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

90

3.1. Моделювання послідовного з'єднання технологічних операцій	90
3.2. Моделювання паралельного з'єднання технологічних операцій	95
3.2.1. Паралельне з'єднання технологічних операцій обробки однорідних виробів	95
3.2.2. Паралельне з'єднання технологічних операцій оброблення потоків різнорідних виробів	96
3.3. Пакет процедур для рішення оптимізаційних задач методом гілок та границь	97
3.3.1. Формулювання задачі оптимізації технологічного процесу	100
3.3.2. Структури даних	101
3.3.3. Графова модель технологічного процесу	105
3.3.4. Опис моделі технологічного процесу.	106
3.3.5. Алгоритм укрупнення технологічних операцій	107
3.3.6. Структуру підсистеми для формування моделі ТП та його аналізу	108
3.4. Висновки до третього розділу	110

РОЗДІЛ 4. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРИКЛАДИ ОПТИМІЗАЦІЇ

111

4.1. Оптимізація послідовності технологічних операцій за критеріями виходу придатних виробів і вартості виготовлення	111
4.1.1. Оптимізація послідовності обробляючих операцій	112

4.1.2. Оптимізація методом гілок та границь	114
4.1.3. Врахування операцій контролю в оптимізації технологічних процесів	115
4.2. Аналіз ТП за допомогою характеристичних функцій.	118
4.3. Порівняльний аналіз результатів аналізу технологічних процесів	124
4.4. Висновки до четвертого розділу	130
ВИСНОВКИ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	134
ДОДАТКИ	153

ВСТУП

Підвищення якості продукції завжди було однією з найважливіших проблем на всіх етапах науково-технічного прогресу суспільства. В умовах ринкової економіки рівень якості є визначальним фактором попиту і прибутковості виробів.

Підвищення якості продукції нерозривно пов'язане з підвищенням ефективності всіх стадій її життєвого циклу - проектування, виробництва і експлуатації. Таким чином, підвищення якості є комплексною проблемою, яка вимагає системного підходу до свого вирішення. Передумовами для цього є широке застосування систем автоматизованого проектування, автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва, автоматизації процесів виробництва, автоматизованих систем контролю якості. Основу всіх цих систем складають сучасні системи обчислювальної техніки [2, 4, 7,8].

Дослідження показують, що в проблемі забезпечення якості продукції дуже важливою (якщо не найважливішою) ланкою є стадія виробництва. Власне, на цій стадії формуються і забезпечуються потрібні властивості, найважливішими з яких є точність показників якості і властивість зберігати задану точність в процесі тривалої експлуатації. [8, 13, 16, 19]

Управління плануванням і економічне стимулювання розвитку якості все більше концентрується на забезпеченні роботи без браку. Ця стратегія є провідною в промислово розвинутих країнах [140]. Основою тут є два головні фактори. По-перше, ця стратегія забезпечує постійний ріст продуктивності і підвищення споживчих властивостей виробів при одночасному зниженні собівартості за рахунок зменшення матеріальних і енергетичних витрат. По-друге, ця стратегія підвищує конкурентну здатність продукції за рахунок підвищення її якості.

Задачі аналізу та оптимізації технологічних процесів виробництва РЕП є актуальними особливо зараз. Коли жорстко стоїть питання

конкуренентоздатності продукції. Цю конкурентну боротьбу виграє виріб, який має найоптимальніше співвідношення ціни та якості.

Робота без браку і якість не є поняттями, які співпадають. Однак, їх потрібно так суміщати, щоб показники якості однозначно визначалися незалежно від того, хто це робить при повторних перевірках. Досягнення цієї мети неможливе без використання методів математичного моделювання і оптимізації виробничих систем. Економічна ефективність, якісні і кількісні показники діючих технологічних систем і тих, які проектуються, у вирішальній мірі визначаються правильністю вибору і точністю підтримання технологічних режимів.

Традиційні методи прийняття виробничих рішень до цього часу ще значною мірою, а інколи і повністю, визначаються досвідом експлуатаційного персоналу і проектувальників. Часто тільки після запуску виробу у виробництво, після експериментальних випробувань закладаються оптимальні технологічні схеми. Це збільшує витрати, затягує терміни впровадження і, в остаточному рахунку, погіршує економічні показники виробу.

Розширення автоматизації проектно-конструкторських та науково-дослідних робіт з застосуванням комп'ютерів дозволяє вже на перших етапах проектування перевірити технічні рішення і, більше того, вибрати найкраще. Маючи результати моделювання про роботу проектованої технологічної системи, розробник може аргументовано закласти в першу чергу проекту повний комплекс обладнання і процесів, обґрунтовано вибрати, випробувавши на моделі, технологічні режими. Надалі на цій же моделі можна відлагоджувати технологічні лінії, що проектуються додатково. Все це в цілому дозволяє підвищити якість проектів, прискорює їх розробку, підвищує економічну віддачу, причому, практично без додаткових капітальних вкладень.

Значно більший і швидший ефект дає застосування методів математичного моделювання для оптимізації діючих виробництв, оскільки проводити оптимізаційні експерименти на працюючому обладнанні достатньо складно, дорого і довго, а часом і небезпечно, а потім вибрані найкращі режими впроваджувати у виробництво. За таких умов, чим адекватнішою є математична модель. Тим вищого економічного ефекту можна досягнути.

Сучасна технологічна система - це сукупність взаємозв'язаних потоків енергії, матеріалів і інформації, яка функціонує як єдине ціле, в якому здійснюється певна послідовність технологічних процесів [128]. Для технологічних систем властиві всі характерні ознаки великих систем:

- певна цілеспрямованість або наявність спільної мети функціонування всієї системи;
- великі розміри як по числу елементів, які складають систему, так і по числу параметрів, які характеризують процес її функціонування;
- складність поведінки системи, яка проявляється у великому числі перехресних взаємозв'язків між її змінними;
- виконання системою в процесі її функціонування деякої складної і багатофакторної цільової функції.

Сучасні технологічні системи - це переважно високоавтоматизовані системи. Здійснюється комплексна автоматизація не тільки окремих технологічних операцій і процесів, але цехів і заводів в цілому. Забезпечення необхідної точності і стабільності автоматизованих технологічних процесів є одним з найважливіших завдань виробництва. Розробка методів аналізу точності виробництва є базою і передумовою для управління ходом технологічного процесу, що особливо важливо в умовах автоматизованого виробництва.

Вимоги сучасного виробництва не задовольняє управління, яке обмежується початковим настроюванням обладнання, піднастроюваннями

або заміною неякісного інструменту. Багато технологічних процесів вимагають застосування сучасних засобів управління, які забезпечують оптимальний хід технологічного процесу навіть при випадкових відхиленнях характеристик матеріалів, параметрів технологічного середовища, зношування інструменту, а також при температурних, силових та інших збуреннях

Для створення таких систем управління необхідний математичний опис технологічного процесу, який розкриває вплив на нього всього різноманіття зовнішніх і внутрішніх факторів. Точність процесу в цілому залежить від різних комбінацій можливих величин кожної із виробничих похибок, що обумовлює необхідність застосування теорій імовірностей та математичної статистики до проблем точності.

Існує ряд підходів до вирішення питання математичного опису технологічних процесів. Ці підходи можна розділити на наступні групи:

- точкові оцінки – коли кожен елемент (н.пр. технологічна операція) оцінюється за якимось одним параметром, наприклад, імовірністю внесення дефекту. На цьому підході базуються ряд робіт професора Недоступа Л. А., професора Бобала Ю.Я. [89,90, 91, 93, 96, 98, 99];

- інтервальні оцінки – даний підхід використовується в роботах Крищука В.М., Шилов Г.М. [145,146, 147];

- опис за допомогою функцій розподілу імовірностей відхилень параметрів від номіналу – найбільш повний опис, але і найменш досліджений через високу складність аналізу. Даний метод є найбільш інформативним в плані моделі, тому, що, маючи наскрізний закон розподілу, можна отримати будь-які необхідні точкові та інтервальні оцінки.

На даний час найпоширенішим методом отримання моделей третьої групи є апроксимація відомих законів розподілу шляхом підбору коефіцієнтів. Прикладом такого підходу можуть слугувати роботи Лазько О.В. [1, 60, 117].

Існує декілька причин, які обумовлюють низьку ступінь впровадження методів статистичного аналізу і оптимізації в практику автоматизованого проектування серед яких як основні можна назвати такі:

- великі витрати часу для виконання статистичних досліджень;
- відсутність методів статистичного аналізу складних структур технологічних процесів виготовлення приладів при довільних законах розподілу похибок їх проміжних параметрів і реальних статистичних зв'язках між ними, крім надзвичайно трудомістких методів статистичних випробувань;
- слабка ступінь відпрацьованості методів статистичної оптимізації;
- відсутність методів статистичного аналізу складних структур технологічних процесів, які мають закони розподілу похибок, що не піддаються апроксимації одним і з відомих законів розподілу.

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». Дисертація виконана, зокрема, в межах держбюджетної науково-дослідної роботи «Розроблення методів забезпечення конкурентоздатності радіоелектронної апаратури шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва за критеріями якості та раціонального використання ресурсів» (2010–2012 рр.), номер держреєстрації 0113U003199.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення РЕП на основі імовірісно-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 (нумерація посилань згідно Додатку Б): [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 (нумерація посилань згідно Додатку Б).

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» (сmt. Славське, 2012 р.), 9-ій, 10-ій, 11-ій Міжнародних НТК «Досвід розробки та застосування приладотехнологічних 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] (нумерація посилань згідно Додатку Б).

Структура і 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.

Перший розділ має оглядовий характер і присвячений порівняльному аналізу методів дослідження точності і надійності технологічних процесів серійного виробництва. З огляду впливає, що в теперішній час найбільшого поширення набули дві групи імовірісно-статистичних методів аналізу технологічних процесів: аналітичний і числовий, який базується на застосуванні методу Монте-Карло.

Деякі автори віддають перевагу числовим методам [8, 37], оскільки на їх думку аналітичний метод імовірнісних розрахунків має порівняно невисоку точність, стає надзвичайно трудомістким при розрахунку відносно складних технологічних процесів. Крім того, як найбільш серйозний недолік вважається припущення, що всі параметри технологічних операцій підкоряються тільки нормальному закону розподілу.

Застосування варіантів методу Монте-Карло є достатньо трудо- і ресурсоємким в зв'язку з необхідністю багаторазових перерахунків по математичній моделі технологічного процесу.

В роботі зроблено висновок, що для аналізу похибок технологічного процесу перспективним є метод характеристичних функцій в поєднанні з числовим методом швидкого перетворення Фур'є. Особливо ефективні алгоритми обчислень можна побудувати тоді, коли лінеаризовані моделі технологічних операцій забезпечують достатню точність.

Розглянуто існуючі підходи до побудови формалізованих структурних моделей технологічних процесів. Власне такі моделі найбільш важливі для аналізу і оптимізації серійного виробництва, оскільки в цьому випадку найчастіше використовуються добре відлагоджені і перевірені типові технологічні операції. Виділено базовий набір моделей технологічних операцій по закономірностях формування похибок технологічного процесу. Розглянуто методи структурної оптимізації технологічного процесу як складної системи.

В другому розділі розроблені метод і алгоритми аналізу похибок технологічного процесу з використанням апарату характеристичних функцій. Хоча метод характеристичних функцій добре пристосований лише для аналізу лінійних систем, це не є сильним обмеженням, оскільки в переважній більшості випадків лінеаризація рівнянь для відносних похибок технологічних операцій не вносить суттєвих похибок в остаточні результати.

Отримані характеристичні функції для базового набору лінеаризованих моделей технологічних операцій: операцій обробки, збирання, контрольно-вимірювальних, настроювання, а також операцій розділення та змішування партій.

При виведенні аналітичних виразів для характеристичних функцій припущення про нормальність законів розподілу відносних похибок використовується лише по відношенню до параметрів технологічного середовища і внутрішніх неконтрольованих збурень, які для відлагоджених технологічних операцій повинні бути нормальними і статистично стійкими. Параметри самого об'єкта виготовлення описуються багатовимірними сумісними законами розподілу, які визначаються структурою технологічного процесу і похибками окремих технологічних операцій.

Виведені формули для еквівалентних перетворень послідовного, паралельного і паралельно-послідовного з'єднань технологічних операцій,

які дають можливість спрощувати структурні схеми технологічних процесів і скоротити об'єм обчислень остаточних характеристик.

У третьому розділі розроблені алгоритми обчислення характеристик якості технологічного процесу на основі методу швидкого перетворення Фур'є. Розглянуто метод прогнозування дефектності і виходу придатних виробів для складних багатостадійних технологічних процесів.

В четвертому розділі 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.

На захист виносяться такі положення:

- методика аналізу похибок технологічних процесів виготовлення РЕП, яка базується на методі характеристичних функцій і дозволяє зняти обмеження на вид розподілів похибок параметрів виробів, режимів та неконтрольованих збурень окремих технологічних операцій, а також дає можливість оцінити статистичні зв'язки між показниками якості продукції;

- моделі базового набору технологічних операцій і їх характеристичні функції, з яких можна формувати моделі широкого класу процесів виготовлення РЕП;

- процедури еквівалентних перетворень простих з'єднань технологічних операцій, які дають змогу спрощувати структурні схеми технологічних процесів і скоротити повний об'єм обчислень при їх аналізі;

- числові алгоритми аналізу складних структур технологічних процесів, які побудовані на основі методів швидкого перетворення Фур'є і забезпечують високу швидкодію програм аналізу;

- метод і алгоритми прогнозування дефектності і виходу придатних виробів, який, на відміну від інших методів, дає змогу враховувати залежність імовірностей виникнення дефектів на різних технологічних операціях.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

1.1. Показники якості радіоелектронних пристроїв

Під якістю продукції розуміють сукупність властивостей продукції які, обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби у відповідності з її призначенням. Кількісні характеристики цих властивостей визначаються показниками якості продукції, і об'єктивно характеризують ступінь придатності продукції задовольняти певні потреби. Номенклатура основних груп показників якості характеризує властивості виробів і містить [2, 13, 46, 49]:

- показники призначення - характеризують властивості продукції, які визначають основні функції, для виконання яких вона призначена, і обумовлюють область її застосування;

- показники надійності - характеризують властивості безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і придатності до збереження;

- ергономічні показники - характеризують систему "людина - виріб" і враховують комплекс властивостей людини, які проявляються у виробничих і побутових процесах;

- естетичні показники - характеризують інформаційну виразність, раціональність форми, цілісність композиції і досконалість виробничого виконання продукції;

- показники технологічності характеризують властивості продукції, які обумовлюють оптимальний розподіл витрат матеріалів, засобів праці і часу при технологічній підготовці виробництва, виготовлення і експлуатації продукції;

- показники транспортабельності - характеризують пристосованість продукції до переміщення в просторі (транспортування), яке не супроводжується її використанням або споживанням;

- показники стандартизації і уніфікації - характеризують насиченість продукції стандартними, уніфікованими і оригінальними частинами, а також рівень уніфікації з іншими виробами;

- патентно-правові показники - характеризують ступінь оновлення технічних рішень, які використані в продукції, їх патентний захист, а також можливість реалізації продукції без перешкод в Україні і за рубежом;

- екологічні показники - характеризують рівень шкідливих впливів на оточуюче середовище, які виникають при експлуатації або споживанні продукції;

- показники безпеки - характеризують особливості продукції, які обумовлюють безпеку обслуговуючого персоналу або осіб, які її використовують.

Стосовно до радіоелектронних пристроїв (РЕП) показники призначення відіграють, як правило, основну роль в оцінці рівня якості, їх переважно використовують як критерії оптимізації при пошуку найкращих рішень в управлінні якістю, однак, при такій оцінці їх необхідно застосовувати сумісно з показниками інших видів [49, 54,57,60].

Неможливо для кожного виду РЕП встановити постійну номенклатуру показників призначення. Однак, в галузевих методиках оцінки рівня якості наводяться найбільш часто вживані показники призначення. Так для радіоелектронної вимірювальної апаратури такими показниками є точність, межі вимірювань, частотний діапазон, вхідний і вихідний імпеданс і т. п [1, 8, 13, 17, 21,23, 30, 37, 57].

Вид показника якості функціонування і його значення визначається метою його застосування. Наприклад, один і той же вимірювальний прилад в певних умовах експлуатації може мати високу якість функціонування при

одній задачі (мета - забезпечення високої точності калібрування вторинних еталонів) і низьку при іншій (мета - забезпечення максимальної продуктивності контрольної операції в технологічному процесі) [13, 49, 63, 67].

Особливим видом показників якості є економічні показники, які характеризують витрати на розробку, виготовлення, експлуатацію або споживання продукції. Розглядати роздільно економічні показники від інших недоцільно або взагалі неможливо [20, 115, 137, 149].

Крім того, при оцінці стабільності показників якості в умовах масового або серійного виробництва застосовують показники однорідності, які характеризують розсіювання фактичних значень певного показника якості у різних одиниць продукції одного виду [75, 77].

При оцінці рівня якості продукції звичайно використовують метод аналогів [46]. При цьому спочатку формулюють мету такої оцінки і вибирають відповідну номенклатуру показників якості. Потім вибирають аналог продукції - "базовий взірець", який має однойменні показники якості, і призначають метод порівняння значень показників. В подальшому значення показників розглядуваної продукції порівнюють з відповідними значеннями показників якості аналога (базовими значеннями). По результатах порівняння приймають рішення про досягнутий рівень якості продукції.

Рівень якості характеризують одним із трьох способів:

- сукупністю відносних показників якості;
- відношенням значення узагальненого показника якості до відповідного значення показника аналога (базового значення);
- віднесенням продукції до певних категорій якості.

Радіоелектронні пристрої характеризуються дуже різноманітними показниками якості і виділити якийсь узагальнений показник, який міг би характеризуватися одним числом, як правило, не вдається, в зв'язку з чим для цього випадку другий спосіб оцінки рівня якості практично непридатний [88, 90, 94].

Для будь-якого способу оцінки рівня якості РЕП необхідно знати вектор визначальних параметрів Y :

$$Y^t = \|y_1, y_2, \dots, y_n\|, \quad (1.1)$$

де y_i - нормовані показники (визначальні параметри приладу);

t - символ транспонування.

Показники якості залежать від конструкції РЕП, технології його виготовлення і параметрів впливів зовнішнього середовища [100, 101, 120, 129].

Під конструкцією РЕП будемо розуміти сукупність елементів з різними фізичними властивостями і формами, які знаходяться в певному електричному (у відповідності з електричною принциповою схемою), просторовому, точнісному і енергетичному взаємозв'язку [45, 113, 143].

Технологічний процес - частина виробничого процесу, яка містить дії по зміні і подальшому визначенню предмету виробництва [47]. Це визначення вказує на зовнішні системні зв'язки технологічного процесу. З однієї сторони, будучи частиною виробничого процесу, ТП зв'язаний із структурою виробництва, з іншої - із структурою і параметрами об'єктів виробництва [129].

Вектор (1.1) характеризує лише деякий ідеалізований виріб з бажаними номінальними параметрами. В дійсності компоненти цього вектора реалізуються з певними похибками, величина яких визначається великою кількістю факторів, і встановлення допустимих меж відхилень параметрів від номінальних є невід'ємною частиною задачі вибору показників якості.

В найбільш загальному вигляді узагальнений вектор показників якості слід розглядати як n -вимірну випадкову функцію одного або декількох незалежних змінних. Як незалежний параметр найчастіше приймається час. Тоді вектор визначальних параметрів матиме вигляд:

$$Y^t(t) = \|y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\|, \quad (1.2)$$

де $y_j(t)$ - випадкові функції часу.

Численні дослідження показали, що процеси зміни параметрів або похибок РЕП є не ергодичними і навіть нестационарними, що надзвичайно ускладнює їх моделювання строгими математичними методами [17, 18, 20, 29].

Така ситуація виникає не тільки (а часто і не стільки) через нездоланні об'єктивні причини, але і в зв'язку з низькою якістю вихідних матеріалів і комплектуючих виробів, слабкою технологічною дисципліною, недостатнім рівнем вхідного і міжопераційного контролю, недостатнім рівнем автоматизації технологічного процесу, неоптимальним вибором його структури і режимів технологічних операцій, неякісними технічними і конструкторськими рішеннями [31, 39, 40, 50, 54, 65, 86].

Вибір математичної моделі для опису параметрів виробу залежить від завдань, які ставляться при моделюванні і завжди є компромісом між вимогами до адекватності і громіздкістю математичного апарату [50]. Так моделі в формі (1.2), незважаючи на їх складність, приходиться застосовувати на етапі експлуатації РЕП, оскільки власне закономірності поведінки параметрів за тривалий час дають можливість визначити періодичність перевірок, час безвідмовної роботи і т. п. [63, 67, 69, 70, 71, 73]

Технологічні процеси серійного і масового виробництва радіоелектронної апаратури характерні тим, що кожна окремо взята операція і весь процес в цілому здійснюються приблизно в одних і тих же виробничих умовах. Тому ці процеси можна розглядати як складні перетворюючі системи з великою кількістю вхідних і вихідних змінних, які мають випадковий характер але з достатньо стабільними характеристиками. Це означає, що для побудови математичних моделей технологічних процесів серійного (і масового) виробництва РЕП можуть бути використані

імовірнісні (теоретичні) і статистичні (експериментальні) методи [117, 118, 141, 143, 144].

Імовірнісні методи передбачають побудову моделей процесу у вигляді рівнянь, які встановлюють зв'язки між законами розподілу, математичними сподіваннями, дисперсіями і практичними полями розсіювання вхідних і вихідних випадкових змінних [99, 112].

Статистичні методи дозволяють при наявності спеціальної апаратури достатньо оперативно провести дослідження процесу в фактичних виробничих умовах з подальшим отриманням його моделі шляхом обробки первинної інформації про стан перетворюючої системи і похибок параметрів. У цьому випадку модель може бути представлена у вигляді рівнянь множинної лінійної або нелінійної регресії, виразів математичних сподівань, дисперсій і т. п., які є статистичними аналогами залежностей, отриманих по результатах теоретичного аналізу [44]. В даний час розроблені ефективні методи побудови таких моделей, які потребують мінімальних об'ємів вихідних статистичних даних [54, 55].

Таким чином, моделі процесів можуть бути побудовані на рівні випадкових величин, а вхідні і вихідні параметри задаватися векторами

$$Y^t = \|Y_1, Y_2, \dots, Y_n\|, \quad (1.3)$$

де Y_i - випадкові змінні.

Слід відмітити, що на проміжних стадіях технологічного процесу вибір сукупності параметрів, їх номінальних значень і допустимих відхилень є окремою і далеко не тривіальною проблемою, оскільки вони лише посередньо зв'язані з визначальними параметрами готового виробу [17, 27, 30, 37, 51, 77].

Проблема раціонального вибору показників якості продукції, тобто параметрів, які характеризують її якість, є однією з найважливіших проблем проектування РЕП і процесів їх виготовлення. Неправильний вибір або

неврахування деяких параметрів веде до великих непродуктивних витрат при виробництві і експлуатації виробів. При цьому наявність надлишкових параметрів приносить також значну шкоду в зв'язку з великими витратами на вимірювання. В деяких технологічних процесах трудомісткість контрольно-вимірювальних операцій досягає 50% загальної трудомісткості виготовлення виробів [130]. Звичайно при виборі параметрів застосовують експертні оцінки або формальні методи зменшення числа параметрів [27, 30, 43, 46, 77, 131, 141].

Питання про встановлення надлишкових параметрів стоїть особливо гостро при оцінці якості функціонування великих систем, в яких загальна кількість параметрів, яка характеризує якість її частин, може досягати декількох тисяч [7, 13, 21, 37, 51, 64, 77].

1.2. Аналіз особливостей технологічних процесів виготовлення радіоелектронних приладів.

Виробничий процес - це сукупність технологічних процесів, які зв'язані між собою матеріальними і інформаційними потоками, і які здійснюються для виробництва кінцевого продукту. Виробничий процес може бути описаний в термінах відношень між основними елементами матеріально-виробничої системи, тобто виконавців в сфері виробництва, технічних засобів, вхідних і вихідних продуктів виробництва. Ці відношення є технологічними операціями [47].

Технологічна операція представляє собою будь-який механічний або фізико-хімічний вплив або перетворення одних продуктів в інші. Сукупність технологічних операцій, які здійснюються на певному технологічному обладнанні, утворює технологічний процес [47].

Розрізняють технологічні операції перетворення або обробки, транспортування і зберігання. Операції обробки (перетворення) зв'язані зі

зміною фізико-хімічних властивостей вихідного продукту. Операції транспортування і зберігання змінюють положення вихідного продукту в просторі і в часі [131].

При описі технологічних процесів виробництва кожену операцію можна представити у виді виробничих ланок, які виконують технологічні операції. Цими ланками можуть бути верстати, стенди для випробовувань, засоби транспорту, склади і т. п. Виробничий процес зв'язаний з просуванням продукту виробництва по ланках у напрямку від входу до виходу. Процес переміщення продукту оцінюється витратами часу на здійснення операції.

Сказане відповідає визначенню матеріального потоку і може характеризуватися кількістю одиниць матеріального потоку за одиницю часу на вході і виході виробничої ланки або інтенсивністю потоку [117, 138].

Якщо для здійснення операції допустиме лише єдине значення інтенсивності матеріального потоку, то вона називається фіксованою. Будь-яку нефіксовану операцію можна розглядати як послідовність зі скінченим числом фіксованих операцій [138, 141].

Важливим випадком є операції, в яких матеріальні потоки на вході і виході виробничої ланки є періодичними функціями часу. Обробка деталей партіями - приклад періодичних операцій. Періодична операція може розглядатися як послідовне повторення одиничних операцій з тривалістю одного періоду. Виробнича ланка - це технологічний агрегат, станок, робот, транспортер, будь-яке технологічне устаткування, на якому виробничий продукт терпить однорідну зміну свого механічного або фізико-механічного стану. Під однорідністю зміни стану продукту розуміється виконання даною виробничою ланкою певної технологічної операції. Іншими словами, виробнича ланка - це сукупність технічних засобів або технологічний агрегат, призначений для проведення щонайменше однієї технологічної операції.

Виробнича ланка може бути спеціалізованою, якщо вона може здійснювати лише одну операцію, і універсальною - в протилежному випадку. Якщо виробнича ланка здійснює тільки одну операцію, вона називається також простою.

Специфіка зміни стану виробничого продукту в ході технологічного процесу дозволяє виділити три групи виробничих ланок:

- обробки або перетворення фізико-хімічних властивостей продукту;
- зберігання;
- перетворення положення продукту в просторі відносно їх розміщення в обробляючих ланках і ланках зберігання або відносно один одного (ланки транспортування) [16, 17, 19, 37, 45, 65, 73].

Виробничі ланки обробки здійснюють технологічні процеси, які розбивають на такі типи:

а) операції трансформації - змінюють властивості вхідних продуктів і виділяють проміжні продукти для наступних операцій (виплавка металу, скла і т. п.);

б) операції видозміни - перетворюють форму або структуру вхідного продукту без його кількісної зміни (литво, відпал, обробка тиском і т. п.);

в) операції включення - додають матеріали до основного продукту, який обробляється (запресовування, напилювання, фарбування і т. п.);

г) операції видалення - зменшують об'єм і масу продукту (обробка різанням, ультразвуком, лазером і т. п.);

д) допоміжні операції (маркування, упаковка і т. п.).

Обробляючі операції відіграють основну роль у формуванні якісних показників РЕП. Виробничі ланки зберігання здійснюють технологічні процеси збереження в незмінному стані деякої кількості виробничих продуктів на протязі деякого часу. Ланки зберігання відіграють важливу роль в балансуванні матеріальних потоків виробничого процесу і часто мало впливають на показники якості виробів. Однак, в окремих випадках

приходиться рахуватися з можливими змінами стану виробничих продуктів (напівфабрикатів). Наприклад, навіть короткочасне зберігання незахищених кремнієвих пластин може суттєво вплинути на параметри мікросхем.

Виробничі ланки транспортування здійснюють технологічні операції, які забезпечують рух матеріальних потоків виробничих продуктів, матеріалів, інструменту і т.п. Частковим випадком ланок транспортування є маніпулятори, поворотні столи, фіксатори положення і т.п.

Технологічні операції збирання також реалізуються на базі засобів транспортування. Очевидно, що точність виконання цих операцій також може впливати на точність параметрів виробів.

З точки зору балансування матеріальних потоків такі три групи виробничих ланок утворюють повну систему. Для моделювання процесу формування показників якості необхідно ввести ще ланки контролю і регулювання.

Контроль - це перевірка відповідності продукції, процесів її створення, застосування, транспортування, зберігання, технологічного обслуговування і ремонту, а також технічної документації встановленим технічним вимогам [88]. Стосовно до виробництва РВЗ контроль - це перевірка відповідності параметрів технологічних процесів, які визначають якість готової продукції, матеріалів, комплектуючих виробів і готових радіовимірювальних приладів технічним вимогам (нормам, встановлених технологічною документацією).

В результаті контролю отримують якісну характеристику параметра, його відповідність або невідповідність нормі ("придатний", "непридатний"). Операція контролю розділює вхідний потік на два і суттєво впливає на закон розподілу контрольованого параметра.

Операції регулювання дозволяють ввести параметри в область допустимих значень, якщо це вдається. Очевидно, що операції регулювання повинні містити як елементи операції контролю. Регулювання також суттєво

мінняє закони розподілу параметрів. Часто регулювання повинні суміщатися із операціями обробки (наприклад лазерна підгонка плівкових резисторів).

Структура технологічного процесу може бути представлена в виді сукупності виробничих ланок, які зв'язані між собою матеріальними потоками. Як правило, ланки обробки чергуються з ланками зберігання, які зв'язані ланками транспортування.

Матеріально-енергетичні процеси відбуваються в реальному часі і відображаються в зміні матеріальних потоків. По характеру зміни матеріальних потоків в часі розрізняють неперервні, дискретні і неперервно-дискретні технологічні процеси.

До неперервних відносяться процеси, в яких матеріальні потоки на вході і виході виробничих ланок неперервні в часі. Параметри, які характеризують неперервні процеси, як правило, суть неперервними фізичними величинами: температура, тиск, витрати речовини або енергії і т.п. Для неперервних технологічних процесів використовують спеціалізоване технологічне устаткування в виді агрегатів, призначених для випуску однорідної продукції. До неперервних процесів відносяться теплові, хімічні, теплоенергетичні і т. п.

Моделі і алгоритми управління неперервними технологічними процесами базуються на розроблених методах теорії автоматичного регулювання і достатньо повно відображені в літературі. [33, 38, 46, 54, 91, 94, 99, 110, 124]

При всьому різноманітті технологічних процесів, які зустрічаються в приладобудуванні, більшість з них на певному відрізку часу можна розглядати як неперервні. Так технологічний процес приєднання гнучких виводів елементів до плати гібридної інтегральної мікросхеми (ГІМС) стосовно цілої плати є дискретним. Однак, якщо розглядати окрему операцію одного приєднання, то на інтервалі часу однієї пайки процес можна розглядати як неперервний [75, 119, 124].

Дискретні технологічні процеси - це такі, в яких матеріальні потоки міняються в часі дискретно. Дискретні технологічні процеси зв'язані з виготовленням окремих виробів або партій виробів. Обробка вхідного продукту звичайно представляє собою послідовність окремих технологічних операцій з фіксованим кінцем і початком. Дискретні технологічні процеси здійснюються, як правило, на універсальному технологічному устаткуванні, яке призначене для випуску неоднорідної продукції. Це обумовлює можливість виконання на одному і тому ж робочому місці декількох видів операцій.

Дискретне виробництво є найбільш характерним видом виробництва в приладобудуванні. Дискретне виробництво має такі характерні ознаки [87]:

- кількість продукції визначається числом з натурального ряду;
- набори допустимих станів предметів праці скінченні. Вироби проходять скінчене число фаз виробничого циклу поштучно (партіями), утворюючи структуровані матеріальні потоки;
- параметри технологічних процесів дискретні (об'єми запусків, випусків, кількість заготовок, комплектуючих);
- технологічні операції дискретні (скінченні набори можливих станів обладнання; фіксовані фази завантаження, розвантаження, позиціонування, виконання операцій; точні адреси всіх зайнятих у виробництві знарядь праці і засобів їх забезпечення);
- наявність одиничних неподільних ресурсів (транспортувальні засоби, столи-супутники, транспортні касети і т.п.);
- інформаційні потоки дискретні.

В дискретному виробництві, як правило, використовуються типові, добре відлагоджені технологічні ланки. Це в деякій мірі пом'якшує проблему побудови моделей технологічних операцій і переносить центр ваги на вибір оптимальних структур технологічного процесу.

Для довільного процесу, включаючи технологічний, можна отримати множину моделей, кожна з яких описує його окремі сторони. Особливістю сучасних ТП є можливість побудови різних моделей, які відповідають різноманіттю поглядів на досліджуваний процес. Кожна з моделей створюється для вирішення певної, конкретної задачі і, в більшості випадків, не може бути використана для вирішення інших задач. Спроба створення повних, інтегральних моделей, в результаті приводить або до відмови від такої постановки задачі, або, якщо вона вирішена, до незручних, а часто і до непридатних для застосування результатів. Інколи взагалі заперечується можливість побудови повної моделі будь - якого процесу або явища [#73]. Очевидно, що кожен з видів моделей технологічного процесу і всю їх сукупність можна розглядати як рівень наукових і технічних знань, нагромаджених у даній області на даний момент. Надалі власне цей рівень будемо мати на увазі, коли буде заходити мова про апріорний об'єм знань про об'єкт, що моделюється.

Процес побудови моделей є неформальним і складним для алгоритмізації, особливо в тих випадках, коли дослідник не має чітко сформульованої мети, якій повинна підкорятися процедура моделювання. Проблемна орієнтація процедури створення моделі дозволяє добиватися не лише отримання моделі, яка максимально враховує вимоги споживачів, а і значною мірою впорядкувати сам процес розробки моделі. На даний час достатньо очевидно виявилися дві тенденції у проведенні робіт по математичному опису технологічних процесів. Перша має за мету отримання гносеологічних моделей, які описують фізико-хімічну картину явищ, які відбуваються у ТП. Друга - передбачає створення математичного опису, який обумовлений побудовою системи управління ТП.

Процес математичного опису неперервних ТП має ряд специфічних особливостей, які зумовлюють необхідність говорити про спеціальну методологію їх дослідження. До ряду специфічних ознак неперервних ТП

слід віднести такі: багатофакторність, погану організацію внутрішньої структури в плані нечіткості проявів причинно-наслідкових зв'язків, розподіленість цільових функцій у часі і просторі, нестационарність властивостей. Ці властивості зумовлюються тим, що предмет праці (вихідна сировина) знаходиться у неперервному контакті із знаряддям праці (технологічним обладнанням).

Необхідність абстрагування від конкретних характеристик ТП, його параметрів, які характеризують умови перебігу, конкретної фізико-хімічної природи зумовлюється задачею створення системи управління. Це приводить до необхідності представлення об'єкта як багатовимірної системи односпрямованого перетворення вхідних управляючих впливів і вхідних збурень у вихідні реакції.

Оскільки характерною особливістю фізичної природи неперервних ТП є погана організація внутрішніх структурних зв'язків в рамках понять причинно-наслідкових співвідношень, то задачу опису неперервних ТП можна розуміти як задачу апроксимації об'єкта неспрямованої дії, тому виникає необхідність організації спеціальних досліджень, які мають за мету синтез топології моделі неперервного ТП.

Виділені особливості неперервних ТП ставлять ще одну вимогу до процедури побудови моделей: вона повинна відповідати принципам системного підходу. Постановка і вирішення задачі визначення математичної моделі значною мірою залежить від дослідника, тому систематизація цілей, задач і принципів побудови моделей ТП є важливою і необхідною методологічною основою успішного її вирішення.

При побудові будь-якої моделі постає питання її адекватності і вибору критерію близькості моделі до об'єкту.

Структура технології може бути описана за допомогою графів, вершини яких відповідають технологічним операціям, а дуги - продуктам, які випускаються і витрачаються в процесі виконання операції. Структури

технологічних схем різних технологічних процесів різноманітні, однак можуть бути вказані типові:

- послідовна (рис.1.1, а), де на кожній операції випускається тільки один продукт, який споживається на наступній операції;

- збіжна (рис. 1.1, б), де на кожній операції випускається один продукт, але споживається декілька, виготовлених на попередніх операціях;

- розбіжна (рис 1.1, в), де на кожній операції споживається один продукт, а випускається декілька (структури такого типу описують процеси сортування);

- структура з реверсом - з матеріальним зворотнім зв'язком, де частково можуть споживатися продукти, які випускаються на наступних операціях (рис. 1.1, г) [112].

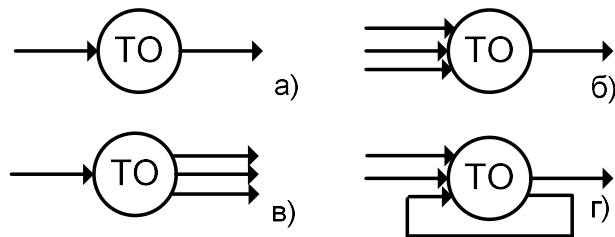


Рис 1.1. Типи технологічних операцій

Модель реальних виробничих процесів може бути описана як однією з типових технологічних схем, так і їх комбінацією. Вершини графа в цьому випадку відповідають технологічним операціям, які визначаються сукупністю технологічних параметрів. Множину параметрів всіх технологічних операцій виробничого процесу кінцевого продукту називають технологічним режимом. Побудова моделей операцій є основним етапом при описі технологічних процесів. Власне в цих моделях виявляється індивідуальна особливість того чи іншого виробництва. Однак модель виробничого процесу в вигляді технологічної мережі не обов'язково відображає реальний рух матеріальних потоків на виробництві, як не відображає і організаційну структуру виробництва, а є лише впорядкованим

набором технологічних операцій. З розгляду мережі не ясно, чи будуть ці операції виконуватися в часі послідовно або паралельно, якщо вони виконуються на одному і тому ж технологічному агрегаті [6, 23].

Системний підхід передбачає можливість застосування єдиних структурних моделей для рішення різних задач моделювання і оптимізації технологічних процесів. Це суттєво спрощує обмін інформаційними потоками між різними системами АСТПВ. Ця теза не суперечить твердженню про необхідність різних моделей для різних задач. Мається на увазі, що переважна більшість проблемно-орієнтованих моделей отримана на основі деякої базової структурної моделі. Це стосується і задач моделювання процесів формування показників якості радіовимірювальних засобів [29].

Математичне моделювання точності технологічних процесів складається з ряду етапів. На першому етапі побудови моделі здійснюється вибір технологічних факторів (вхідних змінних). Вхідні змінні для включення їх в математичну модель повинні вибиратися на основі попереднього теоретичного аналізу, виходячи з мети і завдань дослідження. При виборі факторів до них ставиться ряд вимог:

- технологічні фактори повинні кількісно вимірюватися. Застосування якісних показників суттєво ускладнює врахування впливу таких факторів;
- множина вхідних змінних повинна бути значуща, тобто включати фактори, які сильно впливають на показники якості;
- вихідні фактори не повинні бути сильно корельованими. Сильно корельовані фактори не тільки в якійсь мірі дублюють один одного, але і можуть сильно ускладнити процедуру побудови регресійних моделей. Підкреслимо, що це твердження стосується тільки вхідних змінних технологічного процесу в цілому, а не проміжних змінних, які отримуються як результат перетворень технологічними ланками.

Важливим етапом при побудові математичної моделі технології є вибір для неї форми зв'язку, яка характеризує залежність точності результуючих

параметрів від вхідних факторів. Від правильності цього вибору залежить наскільки побудована модель буде адекватна процесу, який вивчається, тобто чи буде вона відповідати об'єкту дослідження з потрібним ступенем точності.

Прийнята функція повинна відображати найбільш характерні закономірності, властиві даному технологічному процесу. Аналітична залежність, яка покладена в основу математичної моделі, повинна мати по можливості простий вид. Складні функції створюють додаткові, деколи непереборні, труднощі при розрахунку параметрів моделі. Важливо також обмежити кількість постійних параметрів, які входять в формулу. Власне, можливості сучасної обчислювальної техніки в значній мірі знімають ці вимоги при проведенні обчислень, але вони залишаються актуальними з точки зору отримання даних для побудови моделі експериментальним шляхом.

Як і при виборі факторів, як критерій вибору формули зв'язку в першу чергу слід використовувати результати теоретичного аналізу похибок технологічного процесу. В ряді випадків значну допомогу в підборі формули зв'язку може дати аналіз і використання відомих кореляційних моделей, які описують процеси, аналогічні досліджуваному.

При побудові багатофакторних моделей технологічних процесів дослідження форм зв'язку утруднене, і тому в цих випадках природньо звернутися до лінійних залежностей. Лінійні моделі прості і методи аналізу лінійних систем ґрунтовно розроблені. В принципі, будь-яку залежність можна лінеаризувати з певною похибкою у відповідному околі змінних аргументів. Для суто нелінійних залежностей можна застосувати кускову лінеаризацію.

Для лінійної перетворюючої системи на основі принципу суперпозиції кожна з похибок технологічної операції може розглядатись як лінійна комбінація вихідних технологічних факторів:

$$Y = AX + BU + CZ . \quad (1.4)$$

Система рівнянь (1.4) визначає встановлений стан перетворюючої системи, тобто описує статичні властивості технологічного процесу. В формулі (1.4) через X позначений вектор вхідних змінних технологічного процесу, через U і Z - вектори груп факторів технологічної операції, які впливають на вектор вихідних параметрів Y .

Методи аналізу похибок операцій обробки в лінійному наближенні ґрунтовно досліджені в багатьох роботах і в загальному вигляді викладені в монографії [133].

Однак отримані результати можна використати лише для окремих багатофакторних операцій обробки і обчислення математичних сподівань, дисперсій і коефіцієнтів кореляції виробничих похибок. З певними застереженнями можна провести аналіз похибок послідовних технологічних процесів при нормальних законах розподілу впливаючих факторів.

В теорії імовірностей досить широко застосовуються характеристичні функції випадкових величин і векторів [42, 121, 122, 136], які значно спрощують отримання результатів при перетвореннях. В основі спрощення трансформацій законів розподілу випадкових величин і векторів лежать дві основні властивості характеристичних функцій:

- характеристична функція суми незалежних випадкових величин є добутком характеристичних функцій кожної з них;
- числові характеристики випадкового вектора можуть бути визначені з розкладу в ряд Маклорена характеристичних функцій цього вектора. Важливо, що при лінійних перетвореннях випадкових векторів за допомогою характеристичних функцій можна в принципі отримати найбільш повну імовірнісну характеристику результуючого вектора - його закон або густину розподілу.

Це свідчить про актуальність дослідження можливостей застосування апарату характеристичних функцій до дослідження задач точності технологічних процесів.

1.3. Статистичні методи аналізу точності технологічних процесів

Статистичні методи керування якістю продукції володіють порівняно з контролем продукції такою важливою перевагою, як можливість виявлення відхилення від технологічного процесу не тоді, коли вся партія деталей виготовлена, а в процесі (коли можна своєчасно втрутитися в процес і скоректувати його).

Основні сфери застосування статистичних методів управління якістю продукції представлені на рис. 1.2

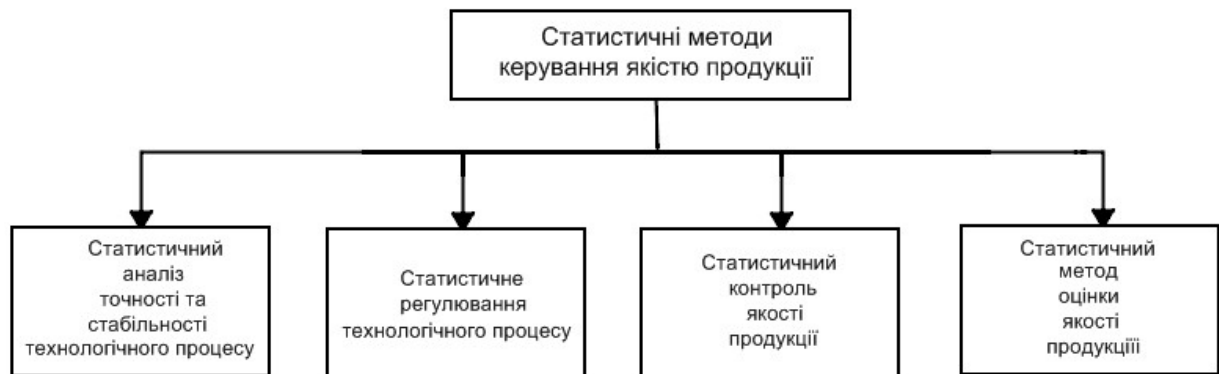


Рис. 1.2. Статистичні методи керування якістю продукції

Статистичний аналіз точності і стабільності технологічного процесу - це встановлення статистичними методами значень показників точності і стабільності технологічного процесу і визначення закономірностей його протікання в часі.

Статистичне регулювання технологічного процесу - це коректування значень параметрів технологічного процесу за наслідками вибіркового контролю контрольованих параметрів, здійснюване для технологічного забезпечення необхідного рівня якості продукції.

Статистичний контроль якості продукції - це контроль, заснований на застосуванні методів математичної статистики для перевірки відповідності якості продукції встановленим вимогам продукції.

Статистичний метод оцінки якості продукції - це метод, при якому значення якості показників якості продукції визначають з використанням правил математичної статистики.

Термін "статистичний контроль" не слід обов'язково пов'язувати з контролем готової продукції. Статистичний контроль може застосовуватися на операціях вхідного контролю, на операціях контролю закупок, при операційному контролі, при контролі готової продукції і так далі, тобто в тих випадках, коли треба вирішити - прийняти або відхилити партію продукції.

Сфера застосування статистичних методів в завданнях керування якістю продукції надзвичайно широка і охоплює весь життєвий цикл продукції (розробку, виробництво, експлуатацію, споживання і так далі).

Статистичні методи аналізу і оцінки якості продукції, статистичні методи регулювання технологічних процесів і статистичні методи приймального контролю якості продукції є такими, що становлять керування якістю продукції.

Одним із способів графічного зображення є гістограма (стовпчикова гістограма), яка відображає стан якості перевіреної партії виробів і допомагає розібратися в стані якості виробів в генеральній сукупності, виявити в ній положення середнього значення і характер розсіювання.

Хоча гістограма дозволяє розпізнати стан якості партії виробів за зовнішнім виглядом розподілу, вона не дає всієї інформації про величину широти, симетрію між правою і лівою сторонами розподілу, наявність або відсутність центру розподілу в кількісному виразі.

Після того, як були з'ясовані форма і широта розподілу на підставі зіставлення з допуском, досліджують, чи можливо по даному технологічному процесу проводити якісні вироби. Іншими словами,

з'являється можливість за наслідками обстеження кількісно оцінити точність технологічних процесів.

1.4. Висновки до першого розділу:

1. Проведено аналіз показників якості та особливостей процесів виготовлення РЕП а також методів їх прогнозування.

2. Проведений аналіз показав, що дискретне виробництво є найбільш характерним видом виробництва в приладобудуванні.

3. Більшість дискретних ТП на певному відрізку часу можна розглядати як неперервні.

4. Структури технологічних схем різних ТП можуть бути зведені до декількох типових.

5. Переважна більшість методів прогнозування якості продукції базується на точкових або інтервальних оцінках імовірності відхилення контрольованого параметра від нормативу без урахування фактичного розподілу цих відхилень.

РОЗДІЛ 2.

ЗАСТОСУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ПОХИБОК БАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

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

2.1. Математичний та фізичний зміст характеристичних функцій у описі технологічних операцій.

Кожна ТО має відхилення від нормативу, які характеризують розподіл ймовірностей виникнення похибки. Більшість сучасних праць спрямовані на те, щоби описати ці відхилення відомими аналітичними виразами розподілів ймовірності виникнення похибки. Якщо вдається апроксимувати фактичний розподіл аналітичним виразом, тоді є можливість перейти до параметричного опису похибок, яке виражається у системній похибці (середнє значення похибки) та у середньому розкиді. Питанням апроксимації фактичних розподілів відомими аналітичними виразами присвячено багато праць [1, 8, 13, 18, 23, 37, 49, 50, 51].

Задачею даної частини роботи є формування наскрізної густини ймовірності відхилення від нормативу у багатокроковому технологічному процесі, який містить технологічні операції різної фізичної природи. Після цього можна задавати границі, які визначають дефекти, та обчислювати

наскрізні характеристики дефектності. Для досягнення цієї мети по кожній ТО вводиться поняття абсолютного та нормованого відхилень від норми. Під нормованим відхиленням розуміємо відношення абсолютного відхилення до максимально-можливого.

Механізм урахування похибок послідовних ТО у результуючому розподілі є досить складним, що і викликало таку велику кількість робіт, пов'язаних з апроксимацією. В даній 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.

2.2. Приклади аналізу випадкових величин з використанням апарату характеристичних функцій

Виходячи з властивостей характеристичних функцій (додаток А), можна стверджувати, що використання їх для аналізу технологічних процесів значно спрощує отримання параметрів розподілу на кожному з етапів і дозволяє при необхідності визначити фактичний розподіл імовірності відхилення від нормативу [26].

2.2.1. Характеристичні функції величин, розподіли яких описуються аналітичними виразами

Часто реальні розподіли можна замінити відомими, які мають аналітичний вираз. Але і в цьому випадку виникають складнощі коли необхідно комбінувати і об'єднувати вибірки.

Розглянемо найчастіше використовувані закони розподілів.

Нормальний закон розподілу виражається формулою:

$$P_k = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_k-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.1)$$

На рис. 2.1 представлено графіки нормального закону розподілу з параметрами $\mu=0$ і $\sigma=0.3$ (а), його характеристична функція (б) і відновлений по характеристичній функції закон розподілу (в).

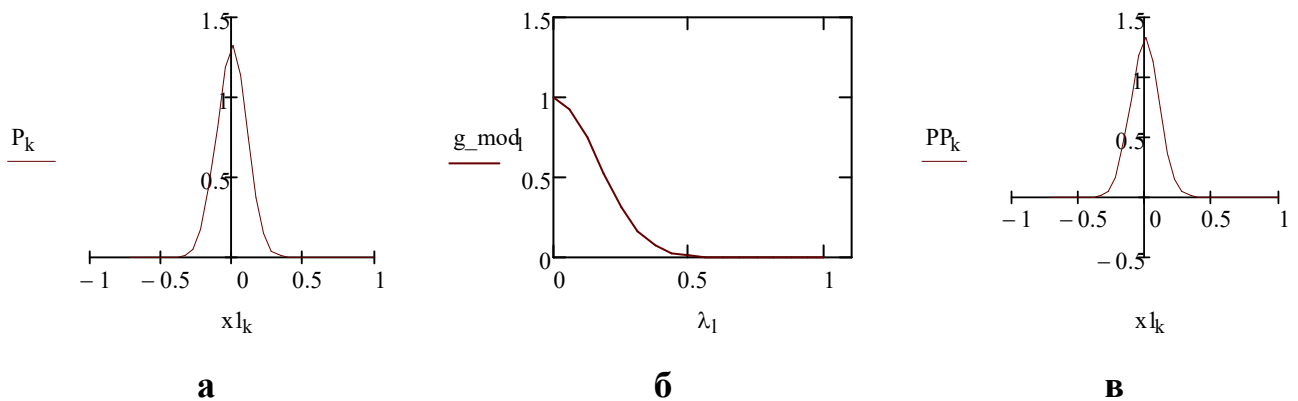


Рис. 2.1. Нормальний закон розподілу з параметрами $\mu=0$ і $\sigma=0.3$ (а-графік розподілу; б-графік характеристичної функції; в-графік розподілу, відновлений)

Як видно з рисунка, початковий і відновлений по характеристичній функції закони практично співпадають. В цьому випадку середнє значення модуля різниці між значеннями вхідного та відновленого законів розподілу становить 5.27×10^{-13} , а значення модуля різниці знаходиться в інтервалі від 6.698×10^{-15} до 2.19×10^{-12} . Враховуючи, що порядок значень коливається в межах $10^{-15} - 10^{-12}$, тобто є дуже малим, то такою різницею можна знехтувати і вважати, що відновлення закону по характеристичній функції є точним.

Аналогічні розрахунки були здійснені для нормального закону з параметрами $\mu=0.2$ і $\sigma=0.3$ (середнє значення модуля різниці між значеннями вхідного та відновленого законів розподілу становить 6.288×10^{-13} , а значення модуля різниці знаходиться в інтервал від 7.98×10^{-15} до 2.115×10^{-12}).

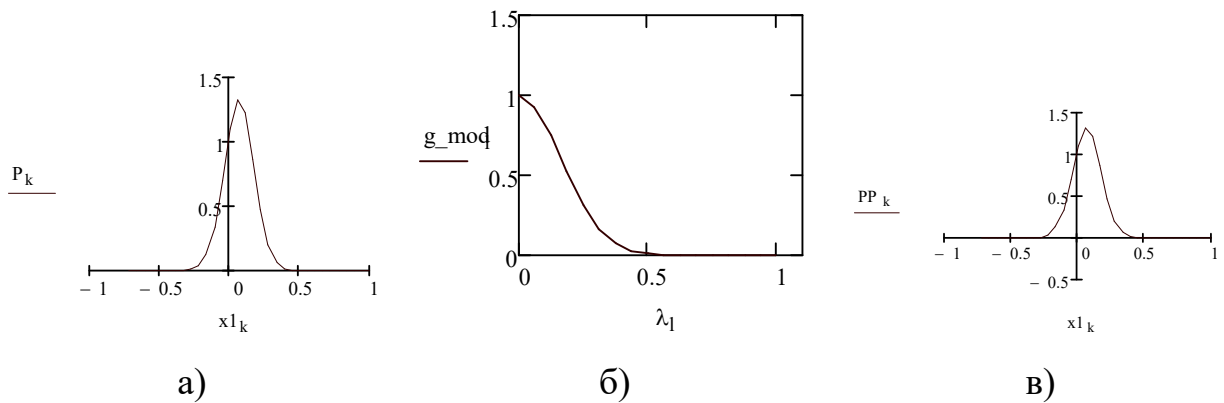


Рис. 2.2. Нормальний закон розподілу з параметрами $\mu=0.2$ і $\sigma=0.3$ (а-графік розподілу; б-графік характеристичної функції; в-графік розподілу, відновлений)

У випадках, коли не існує відхилень значень параметра в сторону зменшення, часто в якості апроксимуючої функціях використовують показників (експоненційний) закон розподілу:

$$P_k = \frac{1}{b} e^{-\frac{x_k - a}{b}}. \quad (2.2)$$

Розглянемо експоненційний закон розподілу з параметрами $a=0.5$ $b=0.4$ (рис.2.3) середнє значення модуля різниці між значеннями вхідного та відновленого законів розподілу становить 5.92×10^{-13} , а значення модуля різниці знаходиться в інтервал від 1.27×10^{-14} до 1.68×10^{-12} .

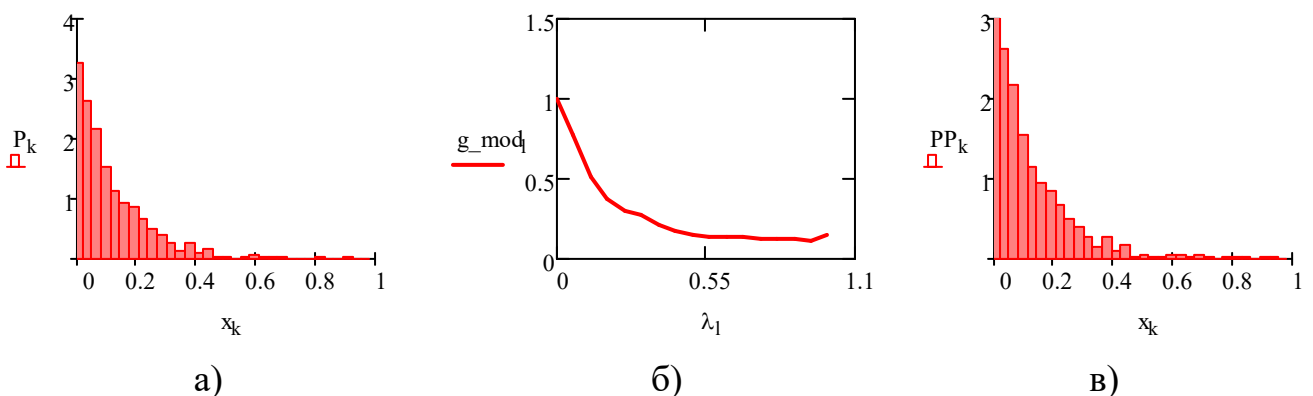


Рис. 2.3. Експоненційний розподіл з параметрами $a=0.5$ $b=0.4$ (а-графік розподілу; б-графік характеристичної функції; в-графік розподілу, відновлений)

Як видно з представлених на рис 2.3 графіків і значень різниці між вхідним та відновленим розподілами, як і у випадку нормального закону, похибка при відновленні є достатньо малою, щоби нею можна було знехтувати.

2.2.2. Характеристичні функції модельних розподілів

Ще одним способом наближення до фактичних розподілів імовірностей є представлення їх за допомогою рядів Грама-Шарльє або Еджворта.

$$P_k = f(x_k) - \frac{A}{3!} f^{(3)}(x_k) + \frac{E}{4!} f^{(4)}(x_k) + \dots$$

де

(2.3)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

При застосуванні запропонованого методу отримуємо наступне. На рис.2.5. представлено графіки закону розподілу з параметрами $\mu=1$, $\sigma=0.8$, $A=-1$, $E=-0.3$ (а), його характеристична функція (б) і відновлений по характеристичній функції закон розподілу (в).

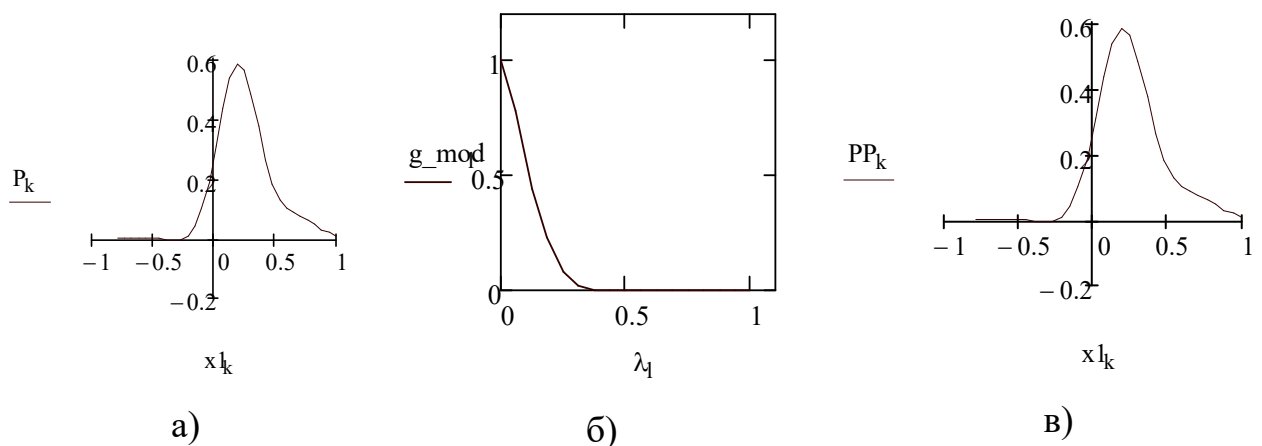


Рис. 2.5. Закон розподілу, представлений розкладом в ряд Грама-Шарльє (а-графік розподілу; б-графік характеристичної функції; в-графік розподілу, відновлений)

Середнє значення модуля різниці між значеннями вхідного та відновленого законів розподілу становить 2.384×10^{-13} , а значення модуля різниці знаходиться в інтервал від 6.473×10^{-15} до 9.517×10^{-13} . Як і в попередніх випадках значення різниці між початковим та відновленим законами розподілу знаходяться в проміжку від 10^{-13} до 10^{-15} .

2.2.3. Характеристичні функції випадкових величин із розподілами, які неможливо описати аналітично

Досить часто виникають ситуації, коли реальний закон розподілу важко замінити відомим аналітичним виразом. Жодні з відомих методів не дозволяють на пряму оперувати з такими розподілами. Але, побудувавши характеристичну функцію на основі ступінчатого розподілу, можна здійснювати необхідні перетворення. На рис. 2.6. приведено приклад застосування наведеного вище алгоритму побудови характеристичної функції та відновлення по ній початкової форми для розподілу, який неможливо замінити аналітичним виразом.

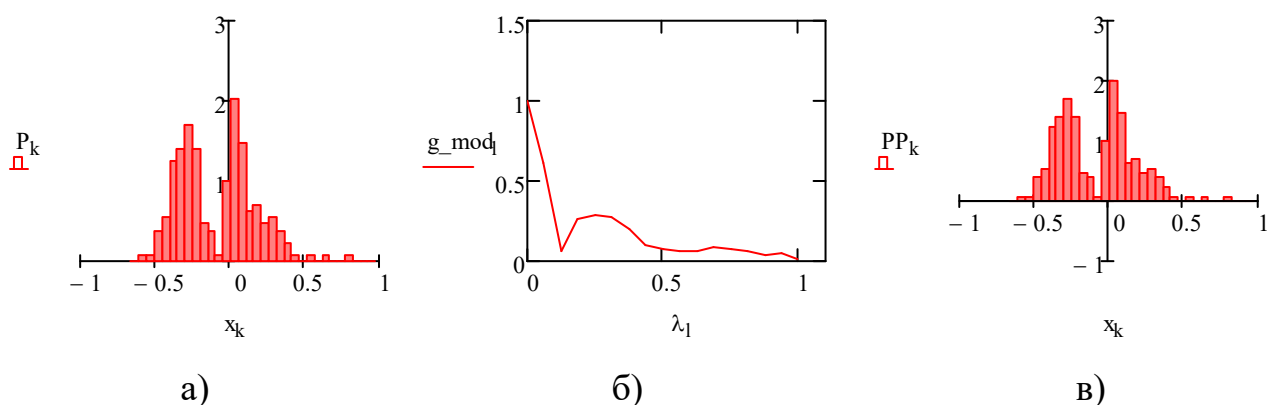


Рис. 2.6. Закону розподілу, представлений стовпчиковою діаграмою. (а-діаграма розподілу; б-графік характеристичної функції; в-діаграма розподілу, відновлена)

Середнє значення модуля різниці між значеннями вхідного та відновленого законів розподілу становить 8.349×10^{-13} , а значення модуля різниці знаходиться в інтервал від 3.331×10^{-15} до 2.663×10^{-12} .

Таким чином застосування апарату характеристичних функцій дає можливість визначити статистичні характеристики будь-яких технологічних процесів без застосування наближених (апроксимаційних) методів. Як видно з наведених вище прикладів, точність відновлення початкового розподілу з характеристичної функції є достатньо високою, а операції з ними, виходячи з властивостей (додаток А) достатньо простими. Усе це робить можливим спрощення роботи з статистичними даними технологічних процесів, зберігаючи при цьому всю інформацію про розподіл значень параметра.

Аналіз похибок технологічних процесів із застосуванням характеристичних функцій, як будь-які методи інтегральних перетворень, є ефективним в тих випадках, коли остаточний результат вдається отримати в аналітичній формі. Для послідовних ланок обробляючих операцій такі перетворення можна здійснити порівняно просто [80]. Однак, операції розділення по певних ознаках приводять до необхідності проводити неодноразово пряме та обернене перетворення Фур'є функцій розподілу ймовірностей, які в аналітичній формі виконати не вдається. Такими є, наприклад, моделі поопераційного контролю [79, 85].

Наближені числові методи перетворень, включаючи швидке перетворення Фур'є, можуть приводити до порушення властивості нормованості функцій розподілу ймовірностей, що при багаторазових перетвореннях може призвести до непередбачуваних наслідків, наприклад, отримати імовірність виходу придатних виробів більшу одиниці. Тому при кожному перетворенні бажано перевіряти і відновлювати умову нормування для чого потрібне щонайменше ще одне інтегрування густини розподілу. Одним із можливих варіантів подолання цієї проблеми є заміна всього різноманіття розподілів, які виникають в процесі аналізу похибок, одним

універсальним розподілом, для якого можна розробити прості і ефективні алгоритми прямого та оберненого перетворення Фур'є.

В цій роботі ми пропонуємо використовувати як універсальну ступінчасту функцію густини розподілу ймовірностей [84]. Ступінчаста густина розподілу ймовірностей, яка відповідає кусково-лінійному інтегральному розподілу, є зручною і простою апроксимацією для густин складної форми. Крім того, ступінчаста густина використовується для представлення в моделі вхідних даних у вигляді експериментально знятих гістограм. Далі ми отримаємо вирази для характеристичних функцій такого розподілу в одно- і багатовимірному випадках, а також наведемо розв'язання оберненої задачі – по даній характеристичній функції знайти параметри стандартної функції густини розподілу.

Ступінчаста густина розподілу випадкової величини наведена на рис.2.7.

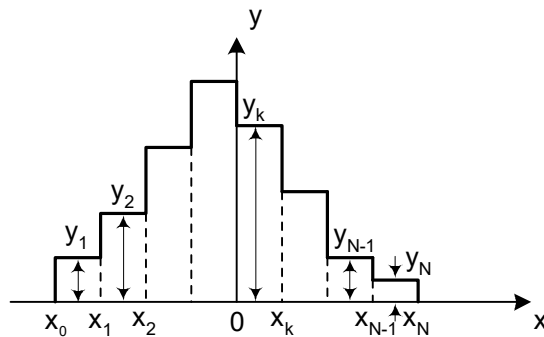


Рис. 2.7. Ступінчаста функція густини розподілу.

Крок по координаті x приймаємо рівномірним і рівним h . Тоді $x_k = x_0 + hk$ ($k=1,2,\dots,N$). Якщо дана функція густини розподілу $f(x)$, то значення ординат стандартної функції визначаються таким чином:

$$y_0 = \frac{1}{h} \int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx, \quad y_k = \frac{1}{h} \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx, \quad y_N = \frac{1}{h} \int_{x_{N-1}}^{\infty} f(x) dx. \quad (2.4)$$

Характеристична функція для такого розподілу визначається із наступних співвідношень:

$$g_{cm}(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\lambda x} dx = \sum_{k=1}^N y_k \int_{x_{k-1}}^{x_k} e^{-i\lambda x} dx = \frac{i}{\lambda} \sum_{k=1}^N y_k (e^{-i\lambda x_k} - e^{-i\lambda x_{k-1}}). \quad (2.5)$$

По аналогії із одновимірним випадком введемо універсальну функцію густини розподілу випадкового n -вимірного вектора. Крок по координатах приймемо однаковим і рівним h . Введемо позначення:

x_1, \dots, x_n - координати простору випадкових змінних; N_j - кількість дискрет по координаті x_j ; x_{0_1}, \dots, x_{0_n} - початкові координати функції густини розподілу; $x_{k_j} = x_{0_j} + k_j h$, ($k_j = 0, \dots, N_j$); $y_{k_1 \dots k_n}$ - висота елемента функції густини розподілу із координатами кутка x_{k_1}, \dots, x_{k_n} .

Характеристична функція визначається із виразів:

$$\begin{aligned} g_{cm}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n)} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = \\ &= \sum_{k_1=1}^{N_1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} y_{k_1 \dots k_n} \int_{x_{k_1-1}}^{x_{k_1}} \dots \int_{x_{k_n-1}}^{x_{k_n}} e^{i(\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n)} dx_1 \dots dx_n = \\ &= \sum_{k_1=1}^{N_1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} y_{k_1 \dots k_n} \int_{x_{k_1-1}}^{x_{k_1}} \dots \int_{x_{k_n-1}}^{x_{k_n}} e^{i\lambda_1 x_1} \times \dots \times e^{i\lambda_n x_n} dx_1 \dots dx_n. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Застосовуючи повторне інтегрування, отримаємо:

$$g_{CT}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = (-i)^n \sum_{k_1=1}^{N_1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} y_{k_1 \dots k_n} \prod_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} (e^{i\lambda_j x_{k_j}} - e^{i\lambda_j x_{k_j-1}}). \quad (2.7)$$

Тепер обчислимо параметри універсальної функції за даною характеристичною. Нехай дана характеристична функція $g(\lambda)$. Визначимо параметри універсальної функції $f_{CT}(x)$. Для цього скористаємося

властивістю, що коли випадкова величина X має скінчені моменти до порядку m включно, то характеристична функція може бути представлена рядом Маклорена:

$$g(\lambda) = 1 + \sum_{r=1}^m \frac{i^r \alpha_r}{r!} \lambda^r + R_m. \quad (2.8)$$

Прирівнюючи члени при однакових степенях λ в рядах універсальної і характеристичної функцій отримаємо потрібну кількість рівнянь для обчислення параметрів стандартної функції.

Попередньо виберемо значення h, N, x_0 . Знайдемо початкові моменти універсальної функції розподілу:

$$\alpha_{стr} = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f_c(x) dx = \sum_{k=1}^N y_k \int_{x_{k-1}}^{x_k} x^r dx = \sum_{k=1}^N \frac{y_k}{r+1} (x_k^{r+1} - x_{k-1}^{r+1}). \quad (2.9)$$

Моменти випадкової величини визначаються через її характеристичну функцію за формулою [84]:

$$\alpha_r = i^{-r} \left[\frac{d^r}{d\lambda^r} g(\lambda) \right]_{\lambda=0}. \quad (2.10)$$

Далі прирівняємо моменти до $(N-1)$ -го порядків універсальної і характеристичної функцій, долучимо умову нормування густини розподілу і отримаємо систему N лінійних рівнянь для обчислення значень y_k :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^N \frac{y_k}{r+1} (x_k^{r+1} - x_{k-1}^{r+1}) = i^{-r} \left[\frac{d^r}{d\lambda^r} g(\lambda) \right]_{\lambda=0}, \quad r = 1, 2, \dots, N-1. \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{k=1}^N y_k = 1, \end{array} \right. \quad (2.11)$$

За аналогією отримаємо систему рівнянь для обчислення параметрів багатовимірної універсальної функції розподілу $f_{ст}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за даною характеристичною $g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$. Виберемо значення $h, x_{0_1}, \dots, x_{0_n}$,

$N_j, (j=1,2,\dots,n)$. Початкові моменти універсальної функції розподілу визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \alpha_{cm\eta_1\dots\eta_n} &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_1^{\eta_1} \dots x_n^{\eta_n} f_{cm}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = \\ &= \sum_{k_1=1}^{N_1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} y_{k_1\dots k_n} \prod_{j=1}^n \frac{1}{\eta_j + 1} (x_j^{\eta_j} - x_j^{\eta_j+1}). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Вираз для обчислення моментів випадкового вектора через його характеристичну функцію має вид [84]:

$$\alpha_{\eta_1\dots\eta_n} = i^{-v} \left[\frac{\partial^v g(\lambda_1, \dots, \lambda_n)}{\partial \lambda_1^{\eta_1} \dots \partial \lambda_n^{\eta_n}} \right]_{\lambda_1=\dots=\lambda_n=0} \quad (\eta_1 + \dots + \eta_n = v). \quad (2.13)$$

Універсальна функція густини розподілу має $N = N_1 \times \dots \times N_n$ невідомих значень $y_{k_1 \dots k_n}$. Прирівнюючи $N-1$ моментів універсальної функції до моментів, отриманих з виразу (2.13), і долучаючи рівняння нормування густини розподілу отримаємо систему рівнянь для обчислення значень $y_{k_1 \dots k_n}$:

$$\left\{ \begin{aligned} &\sum_{k_1=1}^{N_1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n} y_{k_1 \dots k_n} \prod_{j=1}^n \frac{1}{\eta_j + 1} (x_j^{\eta_j} - x_j^{\eta_j+1}) = \\ &= i^{-v} \left[\frac{\partial^v g(\lambda_1, \dots, \lambda_n)}{\partial \lambda_1^{\eta_1} \dots \partial \lambda_n^{\eta_n}} \right]_{\lambda_1=\dots=\lambda_n=0} \quad (\eta_1 + \dots + \eta_n = v) \\ &\dots \dots \dots \\ &h^n \sum_{k_1=1}^{N_1-1} \dots \sum_{k_n=1}^{N_n-1} y_{k_1 \dots k_n} \cdot \end{aligned} \right. \quad (2.14)$$

2.3. Моделі базових елементів технологічних процесів.

Технологічні системи функціонують під впливом великої кількості випадкових факторів. Джерелами відхилень від номінальних значень параметрів технологічного процесу є впливи зовнішнього середовища, а також шуми і флуктуації різних величин, які виникають всередині системи. Об'єкт виготовлення пов'язаний із технологічним середовищем безліччю зв'язків, які визначають його стан в процесі виробництва.

Під технологічним середовищем будемо розуміти штучно створюване оточуюче середовище, яке забезпечує правильне проведення технологічного процесу і отримання виробу необхідної якості. Наприклад, в мікроелектроніці до складових технологічних середовищ відносять: технологічні гази (азот, аргон, кисень, водень, стиснене повітря), деіонізовану воду, атмосферу в виробничих приміщеннях і боксах (в так званих "чистих" виробничих приміщеннях і на робочих місцях). Речовини, які використовуються як технологічне середовище, повинні бути хімічно і механічно чистими, а їх параметри повинні бути строго нормованими. Не дивлячись на дуже строгі вимоги, забезпечити ідеальну очистку речовин практично неможливо і це призводить до неконтрольованих відхилень параметрів виготовлених виробів.

2.3.1. Характеристична функція технологічної операції із одним потоком на вході і одним на виході

Прикладом такої технологічної операції є технологічна операція обробки потоку однорідних виробів. Об'єкти обробки утворюють один потік на вході і виході ТО.

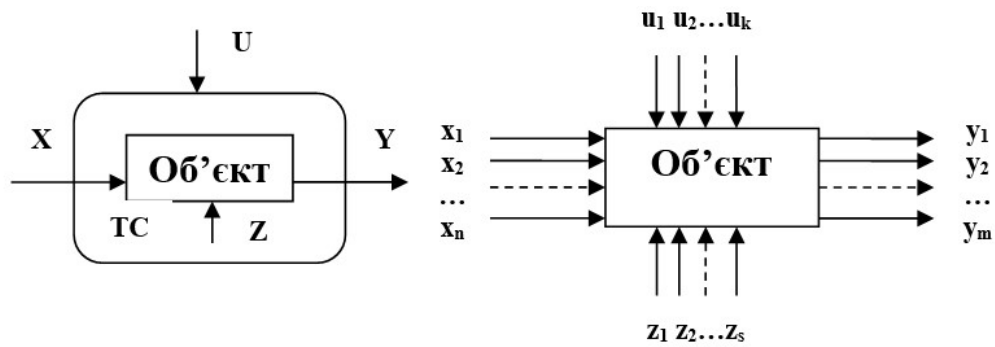


Рис. 2.8. Схема ТО і її зв'язки з оточуючим середовищем
(ТС- технологічне середовище)

В загальному вигляді схема ТО і її зв'язки з оточуючим середовищем зображена на рис. 2.8 [128]. Сукупність параметрів середовища, які діють на об'єкт обробки, поділяють на групи в залежності від характеру і частки їх участі в процесі. В загальному випадку об'єкт характеризують такі параметри:

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

Вхідними назвемо параметри, значення яких можуть бути виміряні, хоча б в принципі, але можливість впливу на них в даній операції відсутня. Припустимо також, що ці параметри не залежать від режимів даної технологічної операції. Вхідними параметрами є, наприклад, контрольовані параметри кремнієвої пластини, фольгованого текстоліту з нанесеним фоторезистивним шаром і т.п. Кількісно ці параметри можуть бути визначені, але не підлягають зміні, оскільки вони визначаються попередніми операціями обробки.

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

керувати процесом. Управляючим параметром може бути, наприклад, регульований струм випаровувача вакуумної установки для напилення.

Збурюючими назовемо параметри, значення яких випадковим чином міняються в часі і які недоступні для вимірювання. Такими можуть бути, наприклад, вміст домішок в газовому середовищі, концентрація травника, а також інші збурення.

До вихідних належать параметри, значення яких зумовлені режимом процесу. Ці параметри характеризують стан об'єкта як результат сумарного впливу вхідних, управляючих і збурюючих параметрів. Їх ще називають параметрами стану.

Для окремої технологічної операції вхідні і вихідні параметри є проміжними (розміри, товщина плівки, утвореної методом напилювання, поверхневий опір плівки і т. п.), які в остаточному рахунку визначають показники якості приладу. Які параметри включати в ці вектори можна визначити на основі аналізу їх вкладу в значення показників якості.

Вектори Y , X , U , Z в загальному випадку є випадковими і їх компоненти корельовані. Компоненти вихідного вектора Y є випадковими величинами і визначаються із співвідношень:

$$Y_r = \varphi_r(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{Z}), \quad r = 1, 2, \dots, n. \quad (2.15)$$

Будемо вважати, що в першому наближенні ці функції з достатнім ступенем точності можна лінеаризувати в області можливих значень векторів-аргументів. Тоді можна записати:

$$Y_r = \sum_{p=1}^n \alpha_{rp} X_p + \sum_{p=1}^k \beta_{rp} U_p + \sum_{p=1}^s \gamma_{rp} Z_p. \quad (2.16)$$

Лінеаризація може бути виконана різними способами. Найпростішим і найбільш поширеним способом лінеаризації функцій є заміна їх такими лінійними функціями, які мають ті ж значення перших похідних по усіх аргументах при деяких середніх значеннях, що і дані функції. Як середні

значення аргументів при цьому звичайно беруть математичне сподівання випадкових величин-аргументів. Застосовуючи цей спосіб лінеаризації, замінимо точні функціональні залежності (2.15) наближеними лінійними залежностями.

Введемо позначення:

$$\mathbf{M}_x^t = \left\| m_{x_1}, \dots, m_{x_n} \right\|; \quad \mathbf{M}_u^t = \left\| m_{u_1}, \dots, m_{u_k} \right\|; \quad \mathbf{M}_z^t = \left\| m_{z_1}, \dots, m_{z_s} \right\|;$$

$$\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z) = \varphi_r(m_{x_1}, \dots, m_{x_n}, m_{u_1}, \dots, m_{u_k}, m_{z_1}, \dots, m_{z_s}) \quad (2.17)$$

Тоді лінійні залежності (2.17) будуть мати вигляд:

$$Y_r = \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z) + \sum_{p=1}^k \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{x_p}} (X_p - m_{x_p}) +$$

$$+ \sum_{p=1}^k \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{u_p}} (U_p - m_{u_p}) + \sum_{p=1}^k \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{z_p}} (Z_p - m_{z_p})$$

$$(\quad r = 1, \dots, m) \quad (2.18)$$

Порівнюючи формули (2.16) і (2.18), знаходимо значення коефіцієнтів α_{rp} , β_{rp} і γ_{rp} :

$$\alpha_{rp} = \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{x_p}}, \quad (p = 1, \dots, n), \quad (2.19)$$

$$\beta_{rp} = \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{u_p}}, \quad (p = 1, \dots, k),$$

$$\gamma_{rp} = \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{z_p}}, \quad (p = 1, \dots, s),$$

$$\varepsilon_r = \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z) - \sum_{p=1}^n \alpha_{rp} m_{x_p} - \sum_{p=1}^k \beta_{rp} m_{u_p} - \sum_{p=1}^s \gamma_{rp} m_{z_p}, \quad (r = 1, \dots, m).$$

Таким чином, залежність між випадковим вектором стану Y і векторами X , U , Z можна записати в вигляді:

$$Y = AX + BU + \Gamma Z + \Theta, \quad (2.20)$$

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

Θ - не випадковий вектор розміру m .

В блочній формі рівняння набуває вигляду:

$$Y = \begin{bmatrix} A & B & \Gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ U \\ Z \end{bmatrix} + \Theta \quad (2.21)$$

При розрахунку точності технологічного процесу зручніше користуватися рівняннями виробничих похибок у відносних величинах з безрозмірними елементами матриць зв'язку. Безрозмірна форма рівняння є найбільш загальною, не зв'язаною з масштабами і розмірностями величин різної фізичної природи. Вводячи в розгляд відносні випадкові похибки

$$\begin{aligned} \delta_{x_p} &= \frac{X_p - x_{Hp}}{x_{Hp}}, & \delta_{u_p} &= \frac{U_p - u_{Hp}}{u_{Hp}}, \\ \delta_{y_p} &= \frac{Y_p - y_{Hp}}{y_{Hp}}, & \delta_{z_p} &= \frac{Z_p - z_{Hp}}{z_{Hp}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

приведемо рівняння (2.18) до такого вигляду:

$$\begin{aligned} \delta_{y_r} &= \sum_{p=1}^n \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{x_p}} \cdot \frac{m_{x_p}}{\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)} \cdot \delta_{x_p} + \\ &+ \sum_{p=1}^k \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{u_p}} \cdot \frac{m_{u_p}}{\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)} \cdot \delta_{u_p} + \\ &+ \sum_{p=1}^s \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{z_p}} \cdot \frac{m_{z_p}}{\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)} \cdot \delta_{z_p}, \end{aligned} \quad (r = 1, 2, \dots, m) \quad (2.23)$$

В матричній формі рівняння набувають вигляду:

$$\Delta_y = \begin{bmatrix} A & B & C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_u \\ \Delta_z \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

де:

$$\begin{aligned} \Delta_y^t &= \|\delta_{y_1}, \dots, \delta_{y_m}\|, & \Delta_x^t &= \|\delta_{x_1}, \dots, \delta_{x_n}\|, \\ \Delta_u^t &= \|\delta_{u_1}, \dots, \delta_{u_k}\|, & \Delta_z^t &= \|\delta_{z_1}, \dots, \delta_{z_s}\|, \\ a_{rp} &= \sum_{p=1}^n \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{x_p}} \cdot \frac{m_{x_p}}{\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}, & (2.25) \\ b_{rp} &= \sum_{p=1}^k \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{u_p}} \cdot \frac{m_{u_p}}{\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}, \\ c_{rp} &= \sum_{p=1}^s \frac{\partial \varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}{\partial m_{z_p}} \cdot \frac{m_{z_p}}{\varphi_r(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_u, \mathbf{M}_z)}. \\ & (r = 1, \dots, m) \end{aligned}$$

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 (2.24) доцільно переписати в такій формі:

$$\Delta_y = \|\mathbf{A} \quad \mathbf{B} \quad \mathbf{E}\| \times \begin{Bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_u \\ \mathbf{S} \end{Bmatrix}, \quad (2.26)$$

де: \mathbf{S} - m -вимірний вектор сумарного впливу внутрішніх збурень;

\mathbf{E} - одинична матриця з розмірами $(m \times m)$.

Знайдемо характеристичну функцію для похибок вихідних параметрів, які визначаються по рівнянню (2.25).

Попередньо зауважимо, що випадковий вектор \mathbf{X} не залежить від векторів \mathbf{U} і \mathbf{S} . Компоненти цього вектора, взагалі кажучи, немає підстав вважати незалежними. Тому компоненти x_p і x_q ($q \neq p$) будемо вважати корельованими.

В загальному випадку випадкові вектори U і S , а також їх компоненти корельовані. Однак без зменшення загальності подальшого аналізу їх можна вважати некорельованими, оскільки лінійним перетворенням їх можна привести до випадкових векторів з некорельованими складовими [122]. Така процедура може бути застосована при обробці експериментальних даних для побудови моделі технологічної операції. Більше того, компоненти векторів можна приймати розподіленими по нормальному закону. Для налаштованої типової технологічної операції таке припущення достатньо обґрунтоване. Будь-які лінійні перетворення векторів з нормально розподіленими компонентами, в тому числі і ті, які виконуються з метою усунення кореляції, залишають закон розподілу нормальним, міняючи тільки його кореляційну матрицю.

Позначимо через $\mathbf{g}_x(\lambda)$, $\mathbf{g}_y(\lambda)$, $\mathbf{g}_u(\lambda)$, $\mathbf{g}_s(\lambda)$ характеристичні функції векторів $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_u$ і S відповідно. Тоді, виходячи з незалежності цих векторів, характеристичну функцію $\mathbf{g}_y(\lambda)$, виходячи з рівняння (2.15.), можна записати у вигляді:

$$\mathbf{g}_y(\lambda) = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \lambda) \mathbf{g}_u(\mathbf{B}^t \lambda) \mathbf{g}_s(\lambda) \quad (2.27)$$

Компонента $\mathbf{g}_x(\lambda)$ визначається попередніми технологічними операціями. Її структура може бути відновлена повним проходом по технологічних ланках від входу до даної операції.

Дві інші складові визначаються виходячи з виразу для характеристичної функції випадкового вектора з некорельованими нормально розподіленими компонентами [122].

$$\mathbf{g}_u(\lambda) = e^{i(\mathbf{u}, \mathbf{m}_u) - \frac{1}{2}(\mathbf{K}_u \lambda, \lambda)} \quad , \quad (2.28)$$

$$\mathbf{g}_s(\lambda) = e^{i(\lambda, \mathbf{m}_s) - \frac{1}{2}(\mathbf{K}_s \lambda, \lambda)} \quad . \quad (2.29)$$

Надалі будемо вважати, що математичні сподівання похибок m_u і m_s дорівнюють нулю. Тоді вирази (2.28), (2.29) спрощуються і набувають вигляду:

$$\mathbf{g}_u(\boldsymbol{\lambda}) = e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_u \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda})}, \quad (2.30)$$

$$\mathbf{g}_s(\boldsymbol{\lambda}) = e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_s \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda})}. \quad (2.31)$$

Підставляючи вирази (2.30) і (2.31) у формулу (2.27), отримуємо:

$$\mathbf{g}_y(\boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \boldsymbol{\lambda}) e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_u \mathbf{B}^t \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{B}^t \boldsymbol{\lambda})} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_s \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda})}. \quad (2.32)$$

Розглянемо скалярні добутки:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= (\mathbf{K}_u \mathbf{B}^t, \mathbf{B}^t) = (\mathbf{B}^t)^t \mathbf{K}_u \mathbf{B}^t = {}^t \mathbf{B} \mathbf{K}_u \mathbf{B}^t, \\ \mathbf{J}_2 &= (\mathbf{K}_s,) = (\mathbf{K}_s)^t = {}^t \mathbf{K}_s. \end{aligned} \quad \mathbf{A} \quad (2.33)$$

Тоді після підстановки в рівняння (2.32) і елементарних перетворень отримаємо:

$$\mathbf{g}_y(\boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \boldsymbol{\lambda}) e^{-\frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}^t (\mathbf{B} \mathbf{K}_u \mathbf{B}^t + \mathbf{K}_s) \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \boldsymbol{\lambda}) e^{-\frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}^t \mathbf{K}_0 \boldsymbol{\lambda}}. \quad (2.34)$$

Матриця \mathbf{K}_0 - симетрична і по фізичному змісту - це кореляційна матриця сумісного впливу векторів U і S на похибки вихідних параметрів технологічних операцій.

Позначимо

$$\mathbf{g}_0(\boldsymbol{\lambda}) = e^{-\frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}^t \mathbf{K}_0 \boldsymbol{\lambda}} = e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_0 \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda})}. \quad (2.35)$$

Тоді для обробляючої технологічної операції отримуємо характеристичну функцію у вигляді:

$$\mathbf{g}_y(\boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{g}_x(\mathbf{A}^t \boldsymbol{\lambda}) \mathbf{g}_0(\boldsymbol{\lambda}). \quad (2.36)$$

Розглянемо в якості обробляючої технологічної операції операцію отримання рисунку друкованої схеми.

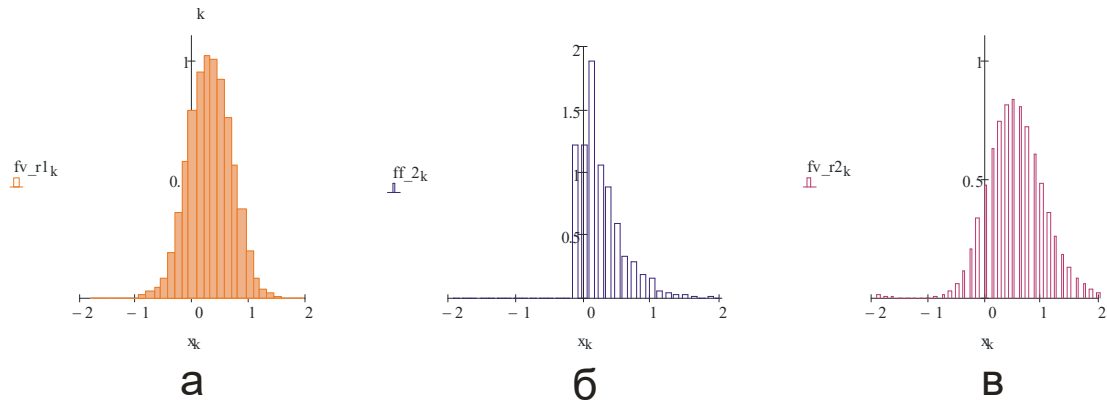


Рис. 2.9. Ступінчаті функції розподілу відносних відхилень ТО отримання
рисунок друкованої схеми.

На рис.2.9а показано ступінчасту функцію розподілу відносних відхилень контрольованого параметра заготовки на вході ТО, рис.2.9б - ступінчата функція розподілу сумісного впливу на об'єкт керуючих та збурюючих параметрів ТО, рис.2.9в - ступінчата функція розподілу відносного відхилення контрольованого параметра на виході ТО.

2.3.2. Технологічна операція із декількома потоками на вході і одним на виході

Типовим прикладом такої технологічної операції є операція збирання. Для таких операцій характерним є те, що вхідний потік X_1, X_2, \dots, X_n формується змішуванням вихідних потоків n попередніх технологічних операцій. У даному 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 $X = \sum_{i=1}^n X_i$ характеристична функція прийме вид

$$g_x(\lambda) = \prod_{i=1}^n g_{x_i}(A_i^i \lambda). \quad (2.37)$$

Підставивши отриманий вираз у (2.36), отримаємо вираз характеристичної функції, яка описує параметри на виході технологічної операції.

$$g_y(\lambda) = g_0(\lambda) \prod_{i=1}^n g_{x_i}(A_i' \lambda). \quad (2.38)$$

В якості прикладу розглянемо технологічну операцію встановлення резисторів на плату.

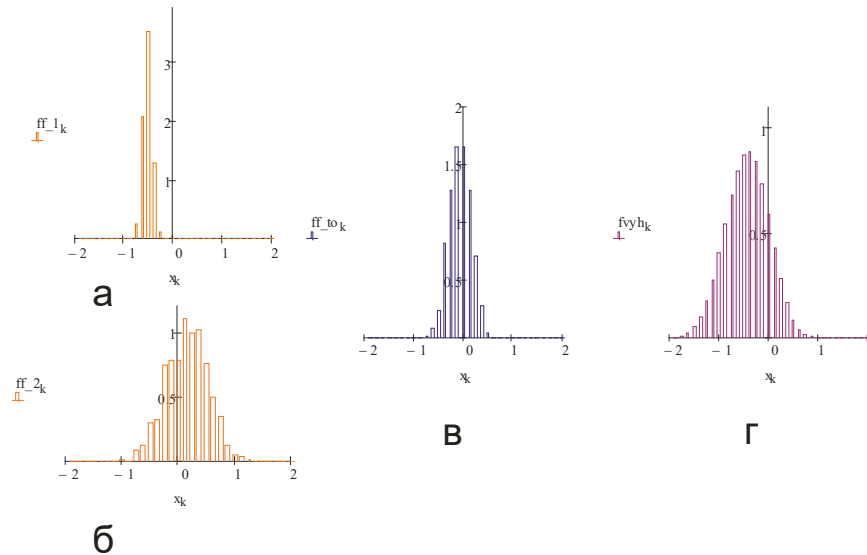


Рис. 2.10. Ступінчасті функції розподілу відносних відхилень ТО встановлення резисторів на плату.

На рис.2.10а наведено ступінчасту функцію розподілу відносних відхилень номіналів резисторів, рис.2.10б - ступінчасту функцію розподілу відносних відхилень контрольованого параметра плати з нанесеним струмопровідним рисунком, рис.2.10в - ступінчата функція розподілу відносного відхилення сумісного впливу на об'єкт керуючих та збурюючих параметрів ТО, рис.2.10г - ступінчата функція розподілу відносного відхилення контрольованого параметра на виході ТО [84].

2.3.3. Технологічна операція із одним потоком на вході і декількома на виході.

Такого роду операції характерні при груповій обробці декількох виробів на одній заготовці з наступним розділенням заготовки. Оскільки усі вироби, що складають потоки на виході технологічної операції, обробляються одночасно, і розділ на потоки відбувається випадковим чином, то для

кожного з часткових потоків буде властивим закон такий самий закон розподілу відносних відхилень контрольованого параметра, як і для сумарного потоку, але з врахуванням вагового коефіцієнта. Ваговий коефіцієнт визначається із співвідношення:

$$\alpha = \frac{N_i}{N}, \quad (2.39)$$

де N_i – кількість виробів у i -тому частковому потоці; N – кількість виробів сумарного потоку. Для вагових коефіцієнтів повинна виконуватися умова:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1. \quad (2.40)$$

Враховуючи, що $Y = \sum_{i=1}^n (\alpha_i Y_i)$, та співвідношення (2.36), отримаємо характеристичну функцію для кожного з часткових потоків:

$$g_{y_i}(\lambda) = \alpha_i g_y(\lambda) = \alpha_i g_0(\lambda) g_x(A' \lambda). \quad (2.41)$$

2.3.4. Характеристичні функції розподілів похибок операцій контролю

В переважній більшості випадків аналіз точності технологічних процесів здійснюється при сильних спрощеннях, які націлені на полегшення обчислень, але, в той же час, призводять до суттєвого зниження достовірності результатів. Часто обмежуються одно- або двовимірними законами розподілу, припущенням про нормальність функцій розподілу на входах окремих технологічних операцій і т.п.

Висока швидкодія, великі обсяги оперативної та зовнішньої пам'яті сучасних комп'ютерів дають принципіальну можливість будувати алгоритми аналізу похибок шляхом обчислення багатовимірних функцій розподілу похибок в окремих перерізах технологічного процесу. В цьому випадку вхідною інформацією є параметри законів розподілу похибок на входах всього технологічного процесу (параметри матеріалів, комплектуючих, контрольовані фактори технологічних операцій і т.п.), які є статистично

стійкими і добре вивченими. Обчислені в перерізах багатовимірні функції розподілу похибок зберігають всю необхідну інформацію включно із кореляційними залежностями між факторами.

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

При реалізації алгоритмів аналізу похибок технологічних процесів зручно використовувати апарат характеристичних функцій [л1]. Нижче отримані вирази для характеристичних функцій деяких операцій вимірювального контролю [3, 23, 85].

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 суть випадковими величинами і задаються випадковим вектором із корельованими компонентами

$$\delta_x = \|\delta_{x_1}, \dots, \delta_{x_n}\|. \quad (2.42)$$

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

$$g_x(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(\lambda_1 x_1, \dots, \lambda_n x_n)} w(x_1, \dots, x_n) \times \\ \times dx_1 \dots dx_n = g_x(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(\lambda, \mathbf{x})} w_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2.43)$$

В останньому виразі інтеграл слід розуміти як багатовимірний, а (λ, \mathbf{x}) як скалярний добуток векторів λ і \mathbf{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_u розподілені по нормальному закону з нульовим математичним сподіванням і задаються сумісною густиною розподілу [122]:

$$w_u(u) = \frac{1}{\sqrt{2^n \pi^n |K_u|}} e^{-\frac{1}{2}(K_u^{-1}u, u)}, \quad (2.44)$$

де K_u - кореляційна матриця вектора u ,

$|K_u|$ - визначник кореляційної матриці.

Характеристична функція вектора похибок вимірювань має вигляд:

$$g_u(\lambda) = e^{-\frac{1}{2}(K_u \lambda, \lambda)}. \quad (2.45)$$

Введемо випадковий вектор результату вимірювань $\eta = \delta_x + \delta_u$; визначимо його густину розподілу $w_s(s)$.

Якщо вектори δ_x і δ_u незалежні, то характеристична функція вектора η визначається з виразу

$$g_s(\lambda) = g_x(\lambda)g_u(\lambda) = g_s(\lambda)e^{-\frac{1}{2}(K_s \lambda, \lambda)}. \quad (2.46)$$

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

$$w_t(t) = \begin{cases} \frac{w_s(t)}{c} & \mathbf{t} \leq \mathbf{a} \\ 0 & \mathbf{t} > \mathbf{a} \end{cases}, \quad (2.47)$$

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 в скороченому записі відповідно має вид

$$g_t(\lambda) = \int_{-\infty}^a e^{i(\lambda, t)} w_s(t) dt \quad (2.48)$$

Видаляючи з вектора t похибки вимірювань, отримаємо випадковий вектор вихідних параметрів виробу, який поступає на подальшу обробку після операції контролю.

Характеристичною функцією різниці $t - \delta_k$ буде:

$$g_y(y) = g_t(\lambda) g_u(-\lambda) = e^{\frac{1}{2}(K_u, \lambda, \lambda)} \int_0^a e^{i(\lambda, t)} w_s(t) dt \quad (2.49)$$

Підкреслимо, що в потоці виробів, які вважаються придатними з певною ймовірністю можуть бути вироби, параметри яких виходять за межі допуску, оскільки розділення відбувається з похибками [3, 79].

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

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

$$g_s(\lambda) = g_x(\lambda) g_u(\lambda) = g_s(\lambda) e^{-\frac{1}{2}(K_s, \lambda, \lambda)}, \quad (2.50)$$

$$w_t(\mathbf{t}) = \begin{cases} \frac{w_s(\mathbf{t})}{c} & \mathbf{t} > \mathbf{a} \\ 0 & 0 \leq \mathbf{t} \leq \mathbf{a} \end{cases}, \quad (2.51)$$

де:

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

Характеристична функція в скороченому записі відповідно має вид

$$g_t(\lambda) = \int_a^{\infty} e^{i(\lambda, t)} w_s(t) dt. \quad (2.52)$$

При контролі на попадання значення контрольованого параметра в заданий інтервал контрольна операція розглядається як дві послідовні контрольні операції по одній межі [3, 79].

2.4. Висновки до другого розділу

У розділі 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.

Розглянуто математичний та фізичний зміст і особливості характеристичних функцій при їх застосуванні у описі технологічних операцій, зокрема технологічних операцій із декількома потоками на вході і одним на виході, із одним потоком на вході і декількома на виході. Представлено характеристичні функції розподілів похибок операцій контролю.

РОЗДІЛ 3.

СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ ТИПОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Технологічні процеси виробництва радіоелектронних пристроїв є достатньо різноманітними і складними по своїй структурі, яка визначається типом технологічного процесу, обладнанням та матеріалами, які використовуються.

Ці процеси є достатньо складними та громіздкими за своєю структурою, що ускладнює їх математичний опис, аналіз та оптимізацію. Зважаючи на складність та громіздкість реальних технологічних процесів, 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.

Далі приведено вивід виразів, які дозволяють отримати розподіли відносних відхилень параметрів від нормативу на виході фрагмента, якщо відомі такі розподіли на його вході [83].

3.1. Моделювання послідовного з'єднання технологічних операцій

Розглянемо простий послідовний технологічний процес, який складається з r ланок. Виріб по чергово проходить кожну ланку, зазнаючи на кожній певних наперед визначених трансформацій. Оскільки кожна ланка впливає на об'єкт, то при проходженні її змінюються і параметри об'єкта, а отже можуть трансформуватися і розподіли відносних відхилень

контрольованих параметрів. Кожна ланка характеризується своїми параметрами перетворення похибок, але всі вони розглядаються в рамках лінійної моделі. Особливістю послідовного ТП є те, що вихідні параметри TO_j є вхідними для TO_{j+1} .

Виділимо з процесу дві суміжні ланки TO_j і TO_{j+1} (рис 3.1).

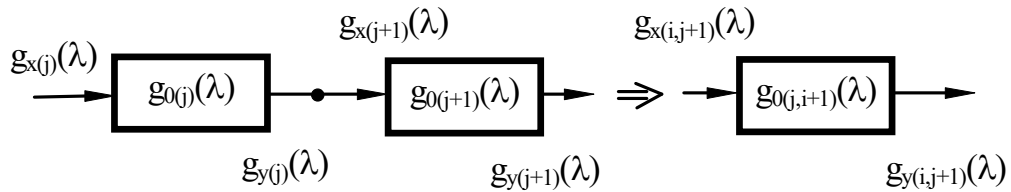


Рис. 3.1. Послідовне з'єднання операцій оброблення.

Характеристична функція операції TO_j згідно з рівнянням (2.36) має вигляд:

$$g_{y(j)}(\lambda) = g_{x(j)}(A_{(j)}^t \lambda) g_{0(j)}(\lambda). \quad (3.1)$$

У даному виразі $g_{y(j)}(\lambda)$ – характеристична функція відносного відхилення від нормативу на виході j -ї TO ; $A_{(j)}^t$ – транспонована матриця коефіцієнтів зв'язку вхідних і вихідних параметрів; $g_{x(j)}(A_{(j)}^t \lambda)$ характеристична функція, яка відображає відносні відхилення вхідного параметра від нормативу; $g_{0(j)}(\lambda)$ характеристична функція, яка відображає вплив керуючих та збурюючих параметрів j -ї TO на об'єкт обробки.

Для послідовного поєднання TO -й характерним є те. Що характеристична функція на виході j -ї TO є вхідною для $(j+1)$ -ї. Тобто справедливим є вираз:

$$g_{x(j+1)}(\lambda) = g_{y(j)}(\lambda) \quad (3.2)$$

Запишемо характеристичну функцію на виході операції TO_{j+1} . Із співвідношень (3.1 і 3.2) отримаємо:

$$\begin{aligned}
g_{y(j+1)}(\lambda) &= g_{x(j)}(\mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda) g_{0(j+1)}(\lambda) = \\
&= g_{x(j)}(\mathbf{A}_{(j)}^t \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda) g_{0(j)}(\mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda) g_{0(j+1)}(\lambda).
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

де \mathbf{A} - прямокутні матриці зв'язку відповідних розмірів. Враховуючи вираз (2.35) характеристичної функції сумісного впливу управляючих та збурюючих впливів на параметри об'єкта оброблення, із виразу (3.3) отримаємо:

$$\begin{aligned}
g_{y(j+1)}(\lambda) &= g_{x(j)}(\mathbf{A}_{(j)}^t \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda) \times \\
&\times e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_{(j)} \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda, \lambda \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda)} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_{(j+1)} \lambda, \lambda)}.
\end{aligned}
\tag{3.4}$$

Де \mathbf{K} – кореляційні матриці сумісного впливу керуючих та збурюючих впливів. Знову розкриємо вираз для скалярних добутків

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_1 &= (\mathbf{K}_{(j)} \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda, \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda) = (\mathbf{K}_{(j)} \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda)^t \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda = \\
&= \lambda^t \mathbf{A}_{(j+1)} \mathbf{K}_{(j)} \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda, \\
\mathbf{J}_2 &= (\mathbf{K}_{(j+1)} \lambda, \lambda) = (\mathbf{K}_{(j+1)} \lambda)^t \lambda = \lambda^t \mathbf{K}_{(j+1)} \lambda.
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

Після підстановки (3.5) у вираз (3.4) отримаємо вираз, що пов'язує характеристичні функції на вході j -ї та виході $(j+1)$ -ї технологічних операцій:

$$\begin{aligned}
g_{y(j+1)}(\lambda) &= g_{x(j)}(\mathbf{A}_{(j)}^t \mathbf{A}_{(j+1)}^t \lambda) e^{-\frac{1}{2} \lambda^t (\mathbf{A}_{(j+1)} \mathbf{K}_{(j)} \mathbf{A}_{(j+1)}^t + \mathbf{K}_{(j+1)})} = \\
&= g_{x(j)}(\mathbf{A}_{(j,j+1)}^t \lambda) e^{-\frac{1}{2} \lambda^t \mathbf{K}_{(j,j+1)} \lambda} = g_{x(j)}(\mathbf{A}_{(j,j+1)}^t \lambda) g_{0(j,i+1)}(\lambda)
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

Звідси видно, що дві послідовні обробні операції можна замінити однією еквівалентною з такими параметрами

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{(j,j+1)} &= \mathbf{A}_{(j+1)} \mathbf{A}_{(j)} \\ \mathbf{K}_{(j,j+1)} &= \mathbf{A}_{(j+1)} \mathbf{K}_{(j+1)} \mathbf{A}_{(j+1)}^t + \mathbf{K}_{(j+1)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Процес об'єднання можна продовжити на довільну кількість послідовних операцій. Тоді для параметрів отримуємо рекурентні формули:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{(j,j+r)} &= \mathbf{A}_{(j+r)} \mathbf{A}_{(j+r-1)} = \prod_{p=j+r}^j \mathbf{A}_p \\ \mathbf{K}_{(j,j+r)} &= \mathbf{A}_{(j+r)} \mathbf{K}_{(j+r-1)} \mathbf{A}_{(j+r)}^t + \mathbf{K}_{(j+r)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

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

$$\begin{aligned} g_{y(1,r)}(\lambda) &= g_{x(1)}(\mathbf{A}_{(1,r)}^t \lambda) g_{0(1,r)}(\lambda) = \\ &= e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_{(0)} \mathbf{A}_{(1,r)}^t \lambda \mathbf{A}_{(1,r)} \lambda)} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{K}_{(1,r)} \lambda, \lambda)}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де K_0 - кореляційна матриця вхідних параметрів; r - кількість послідовних обробних операцій [83].

Розглянемо фрагмент ТП виготовлення друкованих плат, який складається з трьох послідовно з'єднаних операцій (виготовлення заготовки, отримання рисунку струмопровідних доріжок, свердлування монтажних отворів). За допомогою співвідношень, отриманих у розділі 2, розглядаючи кожну операцію як операцію з одним потоком на вході і одним потоком на виході, отримуємо результат, зображений на рис. 3.2 де рис. 3.2а – закон розподілу відносних відхилень на вході першої ТО, а рис.3.2б, рис.3.2в, рис.3.2г – закони розподілу відносних відхилень на виході кожної з ТО. Розподіл, зображений на рис.3.2а також є вихідним для фрагмента, що розглядається.

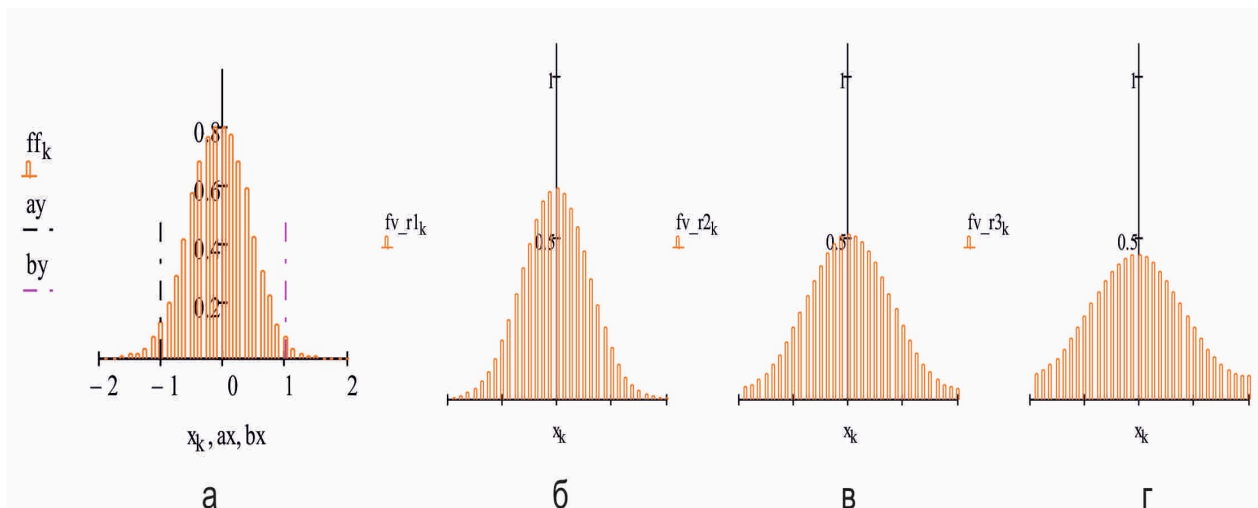


Рис. 3.2. Трансформація закону розподілу відносних відхилень при моделюванні поопераційно

На рис.3.3 зображено результати аналізу цього ж фрагмента на основі співвідношень (3.9).

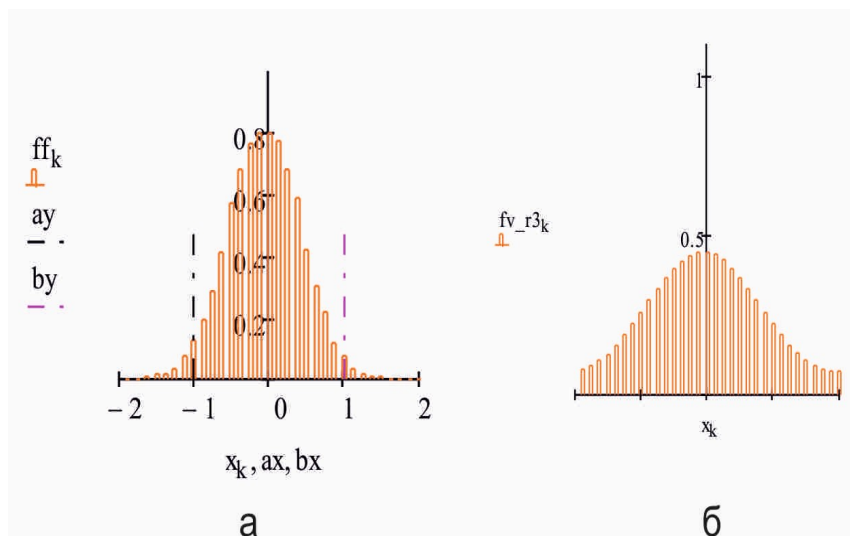


Рис. 3.3 Трансформація закону розподілу відносних відхилень при заміні трьох послідовних ТО однією еквівалентною (укрупненою)

Як видно з рисунків розподіли, зображені на рис. 3.2г та рис. 3.3б є ідентичними. Отже можна зробити висновок про адекватність заміни трьох послідовних ТО однією укрупненою.

3.2. Моделювання паралельного з'єднання технологічних операцій

3.2.1. Паралельне з'єднання технологічних операцій обробки однорідних виробів.

Таке з'єднання (рис. 3.3) виникає в тих випадках, коли однакові технологічні операції виконуються паралельно на декількох технологічних ланках з різними параметрами. Дана ситуація виникає, коли для синхронізації потоку необхідно прискорити проходження виробів через ТО.

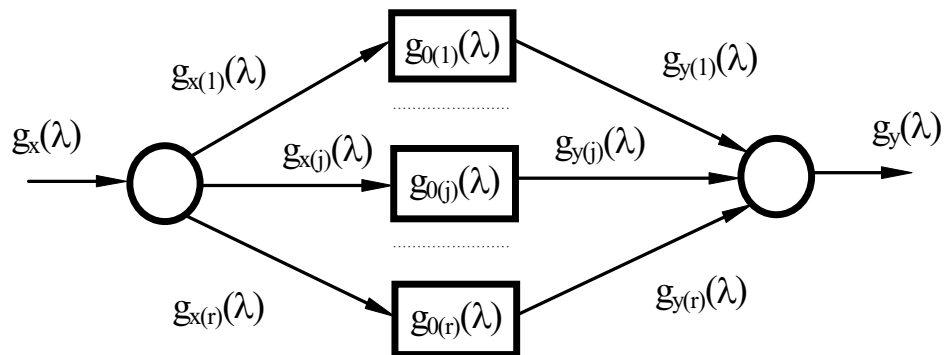


Рис. 3.3. Паралельне з'єднання операцій оброблення.

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

$$\alpha_i = \frac{N_i}{N}. \quad (3.10)$$

Значення N_i залежить від пропускну здатності обладнання ланки.

Для оброблення всього потоку повинна виконуватися умова:

$$\sum_{i=1}^t \alpha_i = 1. \quad (3.11)$$

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 відрізнятись. Ця різниця зумовлена тим, що кожна ланка характеризується своїми, властивими лише їй значеннями параметрів впливу і своєю функцією їх розподілу.

Тому для кожного вхідного часткового потоку можна прийняти співвідношення

$$g_{x(j)}(\lambda) = g_x(\lambda),$$

а для кожного вихідного часткового потоку отримаємо:

$$g_{y(j)}(\lambda) = g_x(A_j^t \lambda) g_{0(j)}(\lambda). \quad (3.12)$$

При змішуванні вихідних потоків характеристична функція сумарного потоку набирає вигляду:

$$g_y(\lambda) = \sum_{j=1}^t \alpha_j g_{y(j)}(\lambda). \quad (3.13)$$

Підставляючи вирази (2.34) і (3.12) в (3.13), отримуємо:

$$g_y(\lambda) = \sum_{j=1}^t \alpha_j g_x(A_j^t \lambda) e^{-\frac{1}{2} \lambda^t K_{0(j)} \lambda} \quad (3.14)$$

Розглянемо ТО свердлування монтажних отворів, яка з метою синхронізації потоку виробів виконується на двох установках. На рис. 3.4 розподіли відносних відхилень партії заготовок, яка заходить на свердлування (рис. 3.4а), розподіли відносних відхилень впливаючих параметрів, які характеризують установок що виконують операцію свердлування (рис. 3.4б) і розподіл відносних відхилень на виході операції свердлування після об'єднання потоків (рис. 3.4в).

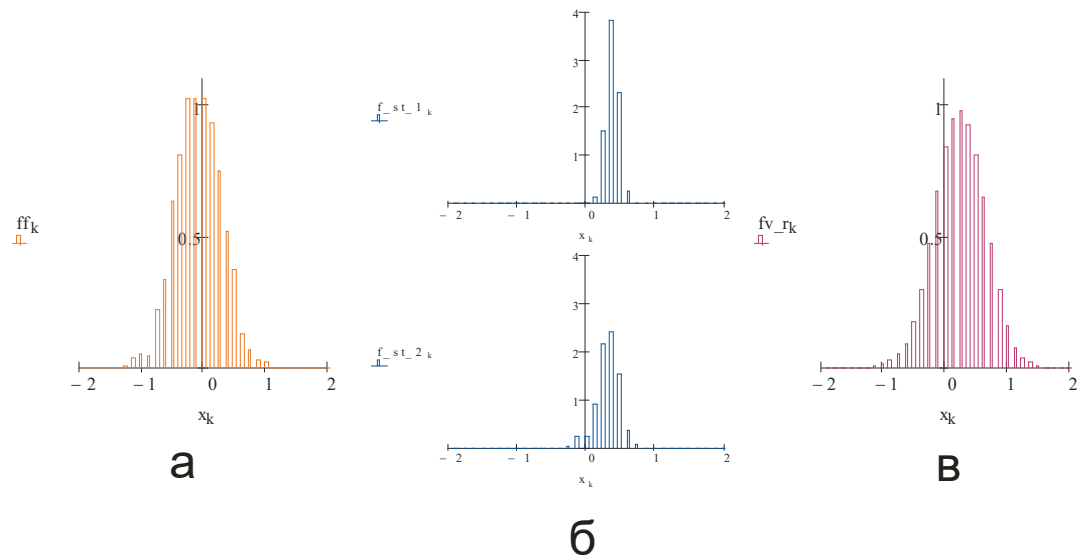


Рис. 3.4. Розподіли відносних відхилень партії заготовок на вході ТО (а) впливаючих параметрів установок (б) і на виході ТО (в).

Кожна з установок характеризується своїм розподілом відносного відхилення сумісного впливу на об'єкт керуючих та збурюючих параметрів (рис. 3.4б) і пропускну здатністю. Вхідний потік розділяється залежно від пропускну здатності (у даному випадку у співвідношенні 60% і 40%). Згідно співвідношення (3.12) отримаємо характеристичну функцію, відновлений з якої розподіл, має вигляд зображений на рис. 3.4в. Аналогічний результат отримуємо і при аналізі, коли моделювання здійснюється поопераційно

3.2.2. Паралельне з'єднання технологічних операцій оброблення потоків різнорідних виробів.

Така структура може служити моделлю групової технологічної операції (розділювальне штампування з одночасним виготовленням різних деталей, пресування різних виробів в багатопозиційній прес-формі, напилювання резисторів, формування дифузійних шарів мікросхеми тощо). З погляду аналізу похибок особливістю такої структури технологічного процесу є те, що закони розподілу похибок окремих потоків корельовані і їх слід розглядати як один багатовимірний сумісний закон розподілу.

Як приклад, на рис. 3.5 зображено один з 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 ви штампованих деталей). Третя операція - операція оброблення всього потоку (наприклад, операція збирання).

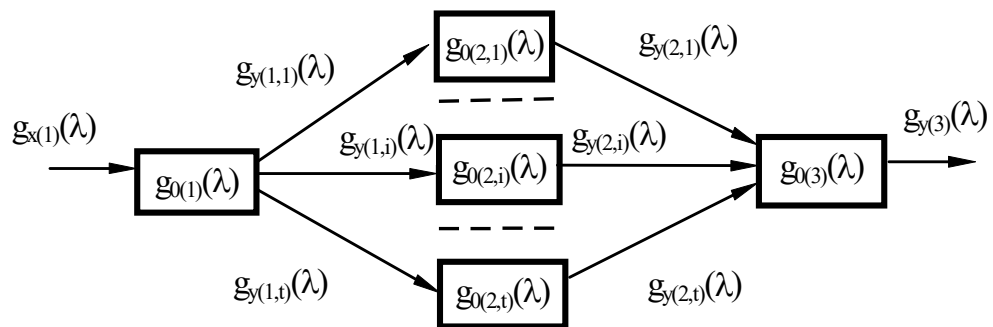


Рис. 3.5. Паралельна структура технологічної ланки з обробкою різнорідних потоків.

Характеристичну функцію такої структури можна знайти за формулами (3.7), (3.8) для послідовного з'єднання технологічних операцій з урахуванням блочної структури матриць зв'язку окремих операцій.

Для першої технологічної операції матричне рівняння (2.26) у блочній формі відповідно до розмірів окремих векторів похибок на виході операції має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{y_1(1)} \\ \dots \\ \Delta_{y_i(1)} \\ \dots \\ \Delta_{y_t(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1(1)} & B_{1(1)} & E_{1(1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{i(1)} & B_{i(1)} & E_{i(1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{t(1)} & B_{t(1)} & E_{t(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_{x(1)} \\ \Delta_{u(1)} \\ S(1) \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

отже:

$$\mathbf{A}_{(1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1(1)} \\ \dots \\ \mathbf{A}_{1(1)} \\ \dots \\ \mathbf{A}_{1(1)} \end{pmatrix}, \mathbf{B}_{(1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{1(1)} \\ \dots \\ \mathbf{B}_{1(1)} \\ \dots \\ \mathbf{B}_{1(1)} \end{pmatrix}, \mathbf{E}_{(1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_{1(1)} \\ \dots \\ \mathbf{E}_{1(1)} \\ \dots \\ \mathbf{E}_{1(1)} \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

Для групи операцій паралельного оброблення аналогічні матриці зв'язку мають вигляд:

$$\mathbf{A}_{(2)} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1(2)} & \dots & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}_{i(2)} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}_{t(2)} \end{pmatrix}, \quad (3.18)$$

де: $\mathbf{A}_{i(2)}$ – прямокутні матриці \mathbf{A} окремих операцій; $\mathbf{0}$ -нульові матриці відповідних розмірів.

Матриці \mathbf{B} і \mathbf{E} мають таку ж структуру з точністю до позначень і розмірів окремих блоків.

Для третьої технологічної операції блочну структуру має тільки матриця \mathbf{A} :

$$\mathbf{A}_{(3)} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1(3)} & \dots & \mathbf{A}_{i(3)} & \dots & \mathbf{A}_{t(3)} \end{pmatrix}. \quad (3.20)$$

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 з матрицями. Самі функції розподілу похибок визначають оберненим перетворенням Фур'є. Якщо можна обмежитися числовими характеристиками, то їх обчислюють безпосередньо за характеристичною функцією [122].

3.3. Пакет процедур для рішення оптимізаційних задач методом гілок та границь

3.3.1. Формулювання задачі оптимізації технологічного процесу

Метод гілок та границь є відомим часто вживаним способом чисельного розв'язування комбінаторних задач, у тому числі і NP-повних. Цей метод є варіантом пошуку із поверненням. В загальному випадку ми припускаємо, що розв'язок задачі є вектором (s_1, s_2, \dots) скінченої, але невизначеної довжини, який не порушує певні обмеження. Кожне s_i є елементом скінченої лінійно впорядкованої множини S_i . Таким чином при вичерпному пошуку повинні розглядатися елементи множини $S_1 \times S_2 \times \dots \times S_i$ для $i=0, 1, 2, \dots$ в якості можливих рішень. Метод гілок та границь базується на припущенні, що кожне рішення зв'язане з деякою вартістю, і, що потрібно знайти оптимальне рішення (рішення з мінімальною вартістю). Для застосування методу гілок та границь вартість повинна бути чітко визначена для часткових розв'язків. Крім того, для всіх часткових розв'язків $(s_1, s_2, \dots, s_{k-1})$ і для всіх розширень $(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_k)$ ми повинні мати

$$\text{cost}(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}) \leq \text{cost}(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_k) \quad (3.21)$$

Якщо вартість має таку властивість, то ми можемо відкинути часткове рішення $(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_k)$ якщо його вартість більша або рівна вартості раніше обчислених рішень [104, 105].

Дуже часто накладаються ще додаткові обмеження, які зв'язані функціональною залежністю із шуканим рішенням. Такі обмеження, як правило, прискорюють рішення задачі, оскільки сприяють відсіканню підмножин варіантів, які їх порушують. Задачу, особливості реалізації якої ми будемо розглядати далі, сформулюємо таким чином:

знайти мінімум вартості

$$\min cost(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_k) \leq cost(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}), \quad (3.22)$$

при обмеженнях

$$y = f(s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_k). \quad (3.23)$$

Одна із таких задач описана в роботі [103, 106] при програмуванні якої і було розроблене достатньо універсальне ядро для застосування в різноманітних алгоритмах розв'язку оптимізаційних задач за методом гілок та границь.

3.3.2. Структури даних.

При рішенні задач за методом гілок та границь найбільше ресурсів оперативної пам'яті та процесорного часу витрачається на формування дерева рішень і навігації по ньому. Тому при програмній реалізації особливу увагу треба звернути на оптимізацію власне цієї частини. Дерево рішень може бути представлено різними способами серед яких найчастіше вживаються такі [105]: у формі багатозв'язаного списку, послідовне представлення, у вигляді бінарного дерева.

Перша форма представлення є природною і в тому є її основна перевага. Недоліком є те, що вершини дерева рішень мають різні степені які до того ж міняються в ході розв'язання задачі. Це вимагає резервувати під вершину елемент із кількістю полів по максимально можливій степені, що приводить до надлишкових витрат оперативної пам'яті і знижує універсальність процедур оперування з деревом, або вимушує оперувати із елементами зі змінною кількістю полів, що, в першу чергу, суттєво ускладнює процедури динамічного використання оперативної пам'яті при змінах дерева рішень.

Послідовне представлення дерева в пам'яті може використовуватися лише при постійності або рідкій мінливості структури дерева і для рішення задач за методом гілок та границь цей метод представлення практично непридатний.

Спрощення внутрішнього представлення бінарного дерева впливає із того, що кожний елемент зв'язаного списку, який відповідає бінарному дереву, може містити лише два вказівники для адресування інших елементів списку. Це означає, що для представлення бінарного дерева достатньо двозв'язаного списку. Будь-яке m -арне дерево може бути перетворене у бінарне. Перетворення дерева рішень у бінарне показано на рис. 3.6. Це перетворення відрізняється від наведеного в [105] і краще відображає специфіку дерева рішень оскільки дуги спрямовані направо зв'язують вершини, які відповідають розгалуженням на підзадачі одного рівня, а дуги спрямовані донизу зв'язують суміжні рівні розгалуження.

Перехід від дерева рішень до його бінарного еквівалента не тільки полегшує аналіз логічної структури, але також спрощує внутрішнє представлення. Для відображення бінарного дерева в пам'яті комп'ютера у вигляді зв'язаного списку кожен елемент списку може містити лише три поля, в одному з яких зберігаються дані, які відповідають елементу, а в двох інших полях - вказівники на наступний елемент в одному рівні і на елемент в наступному (нижчому) рівні.

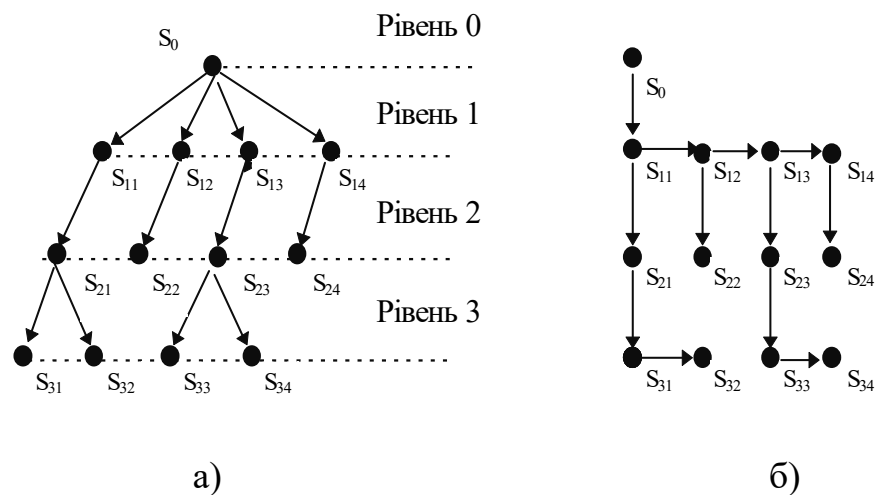


Рис.3.6. Перетворення дерева рішень у еквівалентне бінарне дерево

Конкретна реалізація елементів спискової структури дерева рішень наведена на рис. 3.7. Четверте поле в елементі відведене для ідентифікатора

вершини. Як ідентифікатор використовується код, який містить два числа заповані в одне слово - номер рівня і номер сина в рівні. Очевидно, що такий ідентифікатор не обов'язково унікальний, але оскільки до кожної вершини існує тільки один шлях, то така неоднозначність колізій не викликає.

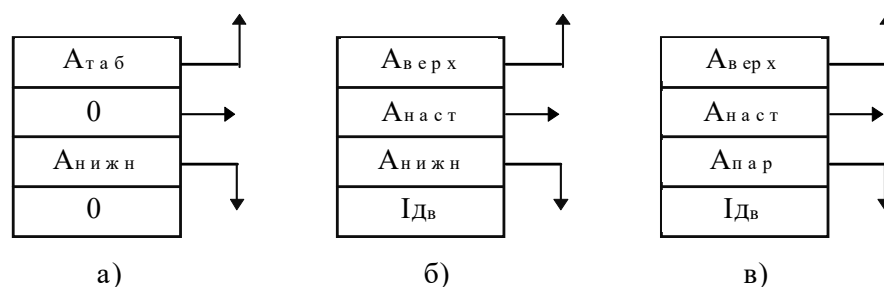


Рис. 3.7. Елементи списку дерева рішень

а) 0-вершина; б) проміжна вершина; в) висяча вершина

На рис. 3.7 прийнято наступні позначення: $A_{таб}$ - посилання на таблицю опису дерева; $A_{верх}$ - посилання на елемент вищого рівня (батька); $A_{нижн}$ - посилання на елемент нижчого рівня (сина); $A_{пар}$ - посилання на таблицю параметрів вершини; $I_{дв}$ - ідентифікатор вершини. Кожний останній син відмічається від'ємною адресою $A_{наст}$, а сама адреса є посиланням на першого сина. Висяча вершина має від'ємну адресу-посилання $A_{верх}$ на батька. Таким чином, спискова структура дозволяє рухатися по дереву вниз-вгору-наліво-направо, від будь-якої вершини дерева. Це дає можливість вибрати оптимальну стратегію обходу дерева рішень в кожному конкретному алгоритмі.

Кожна висяча вершина має посилання на блок параметрів, який для даного часткового рішення містить вартість, значення параметра на який накладається обмеження, а також нижні оцінки цих параметрів для розширень цього рішення. Проміжні вершини таких посилань не мають.

В процесі розв'язання задачі часткові рішення звичайно розширюються шляхом розгалуження висячих вершин із мінімальною оцінкою вартості. Для

прискорення пошуку вершини - претендента на подальше продовження часткового рішення всієї вершини прошиваються окремим списком. Кожен елемент цього списку аналогічний елементу дерева рішень і містить чотири поля: посилання на висячу вершину, посилання на наступний елемент списку, посилання на попередній елемент і ідентифікатор висячої вершини. На рис.3.8 наведено приклад представлення бінарного дерева рішень з рис.3.6 і списку висячих вершин. Позначення елементів списку такі ж як на рис.3.6. Елементи списку висячих вершин ідентифікуються іменами елементів дерева, на які вони посилаються. Вільні стрілки є посиланнями на блоки параметрів висячих вершин (T_d , T_v - таблиці дерева і списку висячих вершин відповідно).

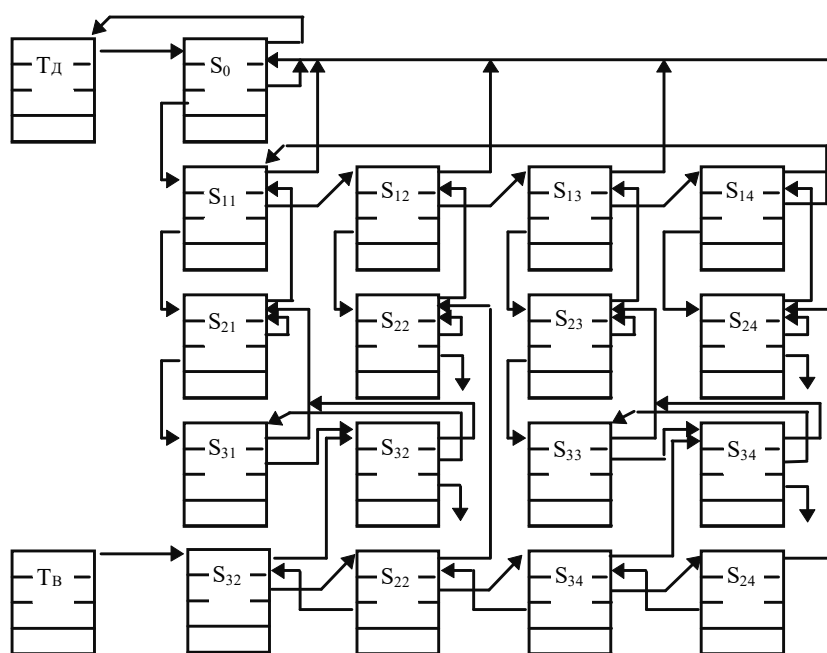


Рис. 3.8. Приклад представлення дерева рішень і списку висячих вершин

Всі списки розміщуються в одному масиві, який заповнюється динамічно.

Кожен список має свою таблицю опису з п'яти полів в яких послідовно розміщені такі дані: вказівник на перший елемент списку, кількість

елементів, робочі дані, адреса останнього долученого елемента, вказівник на елемент з яким перед тим проводилися якісь дії.

В таблиці опису дерева рішень замість робочих даних вказується максимальна кількість рівнів.

3.3.3. Графова модель технологічного процесу.

Одним із можливих способів представлення технологічних процесів є представлення за допомогою графової моделі. Вершинами графа є технологічні операції, дуги відображають зв'язки між технологічними операціями. В результаті модель отримується у вигляді орієнтованого графа.

Для спрощення опису структури технологічного процесу на отриманому графі вводяться проміжні вузли, які дозволяють описати місце кожної технологічної операції в загальній структурі з чітким встановленням входів і виходів технологічної операції.

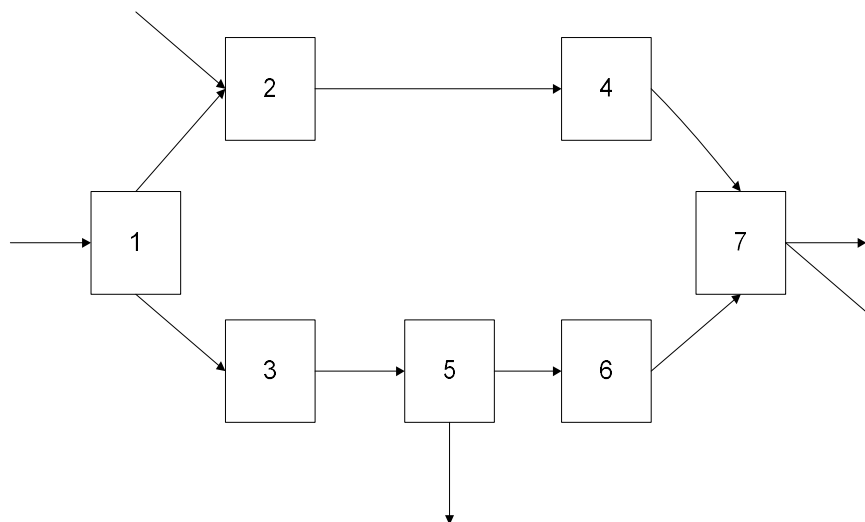


Рис. 3.9. Аналітична модель ТП

На рис. 3.9. наведено простий приклад аналітичної моделі. На основі рис. 3.9. побудована графова модель процесу, яка відображена на рис. 3.10.

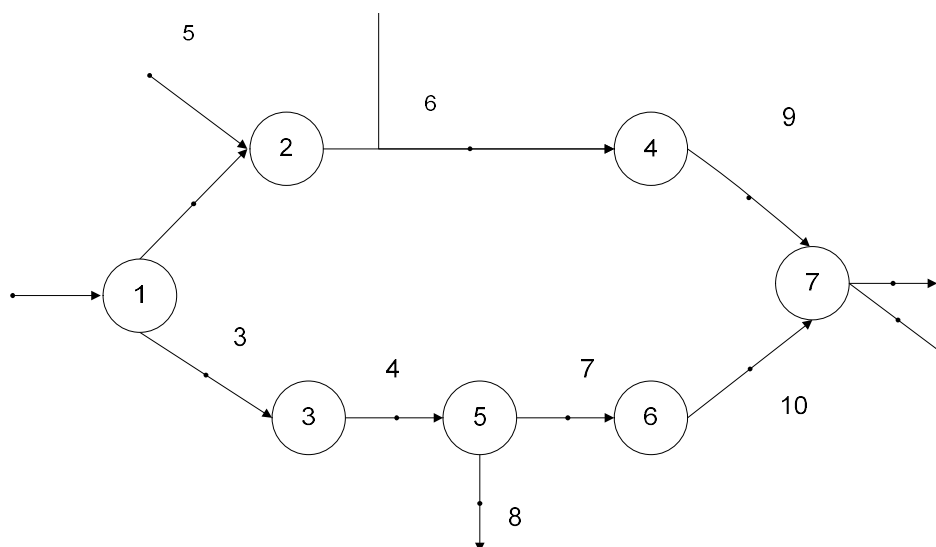


Рис. 3.10. Графова модель ТП

3.3.4. Опис моделі технологічного процесу.

Модель ТП може бути описана за допомогою графічних засобів, що звичайно є більш бажаним. Однак розробка графічної оболонки вимагає досить багато часу і в даній роботі не розглядається. Зупинимось на текстовому описі моделі ТП в загальному вигляді.

Опис моделі складається із послідовності стрічок такого виду:

<ідентифікатор ТО на структурній схемі> _ <вузли присднання>
<ім'я моделі ТО> _ <список параметрів>

По імені моделі стає доступним її опис в бібліотеці системи. В дещо спрощеному вигляді трансляція такої стрічки переводить опис у внутрішнє представлення, яке досить спрощено має такий вигляд рис. 3.11.

Код моделі
Всього зовнішніх вузлів 4
Вхідних вузлів 2
Вихідних вузлів 3
Таблиця номерів вузлів приєднання
2
3
4
6
7
9
10
Параметри операцій

Рис. 3.11. Внутрішнє представлення елемента включеного в структуру

3.3.5. Алгоритм укрупнення технологічних операцій.

Основним алгоритмом обчислення вихідних похибок технологічного процесу є метод згортки. З цією метою на графовій моделі виділяються вхідні вузли технологічного процесу. Далі від вхідних вузлів обчислюються характеристичні функції, які приєднані до вихідних. Далі обчислюються характеристичні функції операцій, які приєднані до наступного перерізу графа.

Даний алгоритм полягає в тому, що на кожній ітерації в структурній схемі технологічного процесу виділяються типові структури, розглянуті вище, замінюються еквівалентними укрупненими технологічними операціями і визначаються для них характеристичні функції.

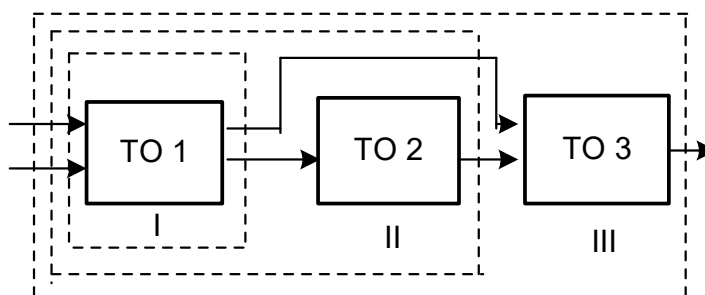


Рис. 3.12. Процес заміни трьох технологічних ланок однією еквівалентною.

На рис. 3.12 ілюструються три послідовні операції об'єднання технологічних ланок і заміни їх еквівалентними, Така процедура може бути продовжена далі, поки весь технологічний процес не буде приведений до однієї еквівалентної технологічної ланки [10].

3.3.6. Структура підсистеми для формування моделі ТП та його аналізу.

Структуру підсистеми для формування моделі технологічного процесу та його аналізу приведено на рис. 3.12.

Управляюча програма представляє собою головне меню з системою меню, яке дозволяє вводити і керувати інформацією.

Управляюча програма на наступному ієрархічному рівні зв'язана з чотирма модулями.

Модуль поповнення бібліотеки орієнтований на побудову аналітичної моделі технологічної операції, тобто на основі теоретичної залежності вхідних і вихідних параметрів технологічної операції знаходиться лінеаризована функція перетворення відносних похибок входу у відповідні відносні похибки вхідних параметрів.

Модуль 3 (Модуль статичної обробки) призначений для отримання аналогічних моделей по результатах статистичних експериментів. Цей модуль в основному містить програми статистичної обробки даних.

Вказані модулі є автономними і служать для поповнення бібліотек. Їх результати записуються в бібліотеці моделей.

Модуль 4 служить для підготовки даних для конкретної моделі технологічного процесу. Попередній опис моделі може здійснюватись в графічній оболонці і в текстовому редакторі.

Це підвищує зручність використання програми, і дає можливість економити час на роботу по підготовці даних.

На перших етапах створення системи можна скористатися спрощеним способом підготовки даних – текстовим редактором.

І графічний і текстовий редактори дають результат в уніфікованому і внутрішньому представленні тому реалізація цих редакторів може проводитись паралельно або у будь-якій послідовності.

Основним модулем реалізації є модуль 5.

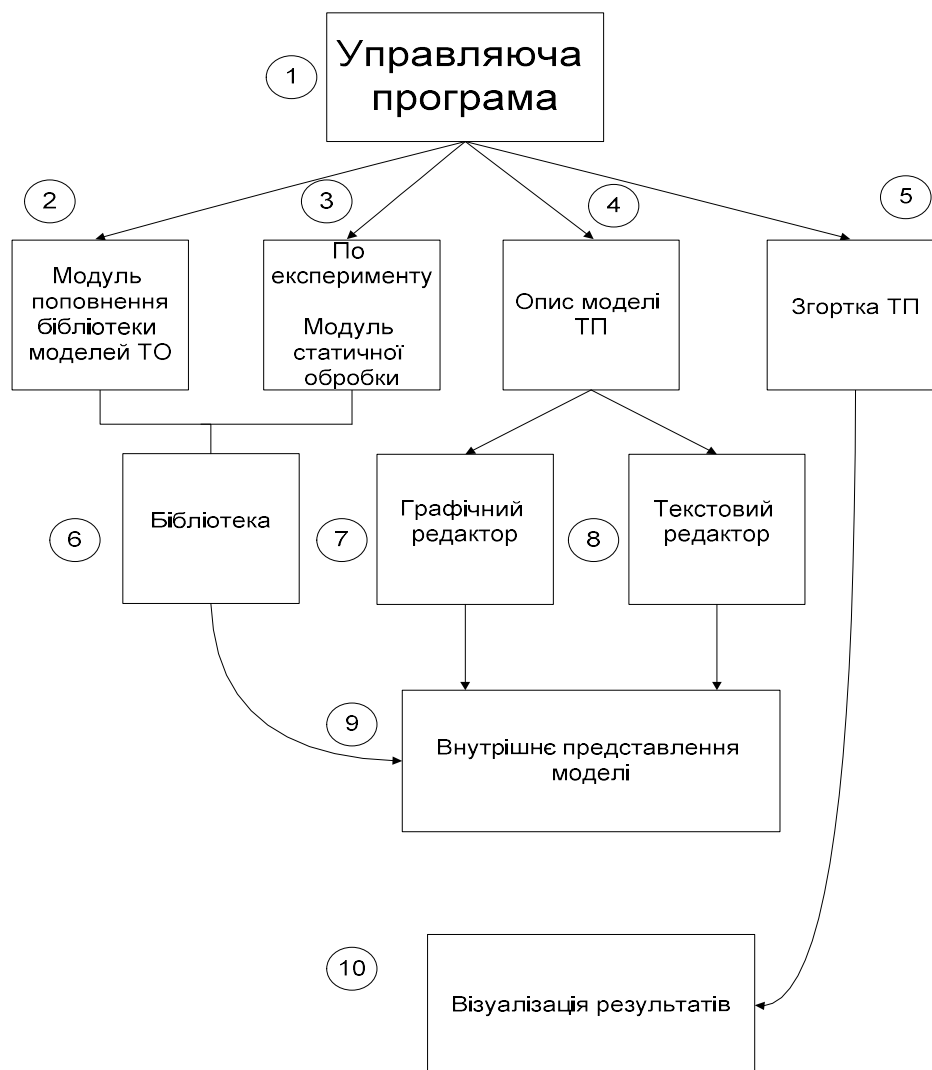


Рис. 3.12. Структура підсистеми

Підсистема обробки статистичного аналізу передбачає можливість згортання технологічного процесу до моделі однієї технологічної операції.

В процесі розробки даної підсистеми береться до уваги, що для проведення статистичного аналізу ми можемо створювати бібліотеку моделей шляхом поновлення даних, описуючи вхідні та вихідні відносні похибки кожної з операцій технологічного процесу та у випадку неможливості здійснення такого опису, отримання експериментальних даних. Опис моделі здійснюється за допомогою як текстової так і графічної інформації.

Внутрішнє представлення мережі являє собою блок у склад якого входить інформація про кількість входів і виходів у моделі. Причому розглядається інформація про з'єднання цього модуля з іншими та наявність у вузлах моделі певних відносних похибок того чи іншого параметру які впливають відповідним чином на параметри іншого модуля. Зміна цих відносних похибок відповідним чином впливає на якість продукції певного технологічного процесу [11, 103].

3.4. Висновки до третього розділу

1. При значній різноманітності і складності схем ТП, в них можна виділити ряд типових структур.

2. Для кожної типової структури отримано вирази, які дозволяють розглядати таку структуру як укрупнену технологічну операцію.

3. Розглянутий підхід уможливорює спрощення моделювання та аналізу ТП шляхом згортання впритул до приведення ТП до однієї технологічної ланки.

4. Запропоновано структуру підсистеми моделювання та оптимізації ТП.

РОЗДІЛ 4.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРИКЛАДИ ОПТИМІЗАЦІЇ

У попередніх розділах дисертації описаний математичний апарат аналізу імовірнісних характеристик технологічних операцій із врахуванням зовнішніх випадкових впливів та внутрішніх випадкових нестабільностей. На відміну від відомих методів аналізу, описаний метод застосовує математичний апарат характеристичних функцій та дає можливість урахування не тільки статистичних характеристик похибок технологічних операцій, але і фактичних законів розподілу ймовірностей цих похибок. Наведені у попередніх розділах типові приклади об'єднання декількох операцій не дають повного уявлення про перебіг повного ТП. Тому цей розділ присвячено аналізу конкретного (хоча і спрощеного) ТП виготовлення друкованих плат, а також порівняльного аналізу результатів оптимізації такого процесу [105].

4.1. Оптимізація послідовності технологічних операцій за критеріями виходу придатних виробів і вартості виготовлення

Сучасне серійне і масове виробництво проектується на основі типових технологічних процесів, які містять добре відпрацьовані технологічні операції і переходи, але, як правило, мають декілька варіантів реалізації. Власне вибір із цих можливих варіантів та їх поєднання в єдиному технологічному процесі для досягнення потрібних властивостей виробу і становить основну суть проектування технологій. При цьому структура процесу повинна бути оптимальною за певними критеріями.

Як критерії оптимізації при проектуванні технологічних маршрутів часто приймають відсоток виходу придатних і вартість виготовлення виробу. Причому, при формулюванні однокритеріальних задач оптимізації один із цих параметрів входить у критеріальну функцію, а інший - у обмеження.

Складність технологічних процесів, велика кількість різних технологічних операцій та їх багатоваріантність обумовлює високу розмірність задачі оптимального вибору структури технологічного процесу, в зв'язку з чим актуальним є створення комп'ютерних алгоритмів рішення цієї задачі

4.1.1. Оптимізація послідовності обробляючих операцій

Розглянемо технологічний процес, який складається з n послідовних обробляючих операцій. Будемо вважати, що кожна технологічна операція може бути реалізована m різними варіантами. Багатоваріантність може виникати в зв'язку із наявністю альтернативних способів обробки (отримання резисторів термічним або іонно-плазмовим напиленням, нарощування окисної плівки на кремнії в сухій або вологій атмосфері і т.п.) або із можливістю проведення однієї і тієї ж технологічної операції при різних значеннях режимних параметрів.

Припустимо, що для кожного варіанту технологічної операції відомі імовірність виходу придатних виробів і вартість обробки, які визначаються відповідно матрицями: $P = \| p_{ij} \|$, $C = \| c_{ij} \|$, ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$).

Кількість рядків матриць визначається по операції із максимальним числом варіантів. Для технологічних операцій з меншою кількістю варіантів відповідні стовбці матриць доповнюються такими значеннями, які гарантують неможливість включення цих варіантів у технологічний процес (p_{ij} - близьке до нуля, c_{ij} - достатньо велике число).

Тоді для зафіксованої послідовності технологічних операцій результуюча імовірність виходу придатних і сумарна вартість обробки виробів визначиться з виразів:

$$p = \prod_{i=1}^n \bar{p}_{ij}, \quad c = \sum_{i=1}^n \bar{c}_{ij}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4.1)$$

де $\bar{p}_{ij}, \bar{c}_{ij}$ – імовірності виходу придатних виробів і вартості вибраних варіантів технологічних операцій.

Визначимо часткову ентропію технологічного процесу як суму часткових ентропій окремих технологічних операцій:

$$h = -\ln p = \sum_{i=1}^n \bar{h}_{ij}, \quad h_{ij} = -\ln \bar{p}_{ij}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4.2)$$

Введемо матрицю змінних $\mathbf{X} = \|x_{ij}\|$, $(i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m})$.

Змінна $x_{ij} = 0$, якщо j -й варіант i -тої операції не включений у технологічний процес при оптимізації, і $x_{ij} = 1$, якщо даний варіант включено. У будь-якому стовбчику матриці може бути лише одна одиниця, оскільки у технологічний процес може бути включено лише один варіант технологічної операції.

Задачу мінімізації ентропії технологічного процесу при обмеженні на сумарну вартість усього процесу сформулюємо у такому вигляді:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} x_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \leq c_{\max}, \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4.3)$$

де c_{\max} - максимально допустима вартість виготовлення.

Аналогічно формулюється задача мінімізації вартості виготовлення при обмеженні на сумарну ентропію усього процесу:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} x_{ij} \leq h_{\max}, \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4.4)$$

$$h_{\max} = -\ln p_{\min}.$$

де p_{\min} - мінімально допустима імовірність виходу придатних виробів.

Подібна задача синтезу інформаційної системи сформульована в роботі [104].

4.1.2. Оптимізація методом гілок та границь

Розв'язки задач (4.3) і (4.4) можна отримати методом гілок та границь [105], який стосовно до даних постановок полягає в спрямованому просуванні “в глибину” по дереву рішень. Розгалуження дерева рішень здійснюється послідовною фіксацією варіантів технологічних операцій. Вершини першого рівня отримуємо почерговою фіксацією варіантів першої технологічної операції, вершини другого рівня - почерговою фіксацією варіантів другої, і т.д.

Оцінки для кожної вершини обчислюємо за формулами:

$$a_{kl} = \bar{a}_{kl} + \hat{a}_{kl} = \sum_{i=1}^k \bar{h}_{ij} + \sum_{i=k+1}^n \min_j(h_{ij}), \quad (4.5)$$

$$b_{kl} = \bar{b}_{kl} + \hat{b}_{kl} = \sum_{i=1}^k \bar{c}_{ij} + \sum_{i=k+1}^n \min_j(c_{ij}), \quad (4.6)$$

де: k - номер рівня вершини у дереві рішень; l - номер варіанту k -ї технологічної операції; i - номер позиції технологічної операції у технологічному процесі; \bar{a}_{kl} - сума часткових ентропій зафіксованих варіантів технологічних операцій у шляху до даної вершини; \hat{a}_{kl} - мінімальна оцінка часткової ентропії незафіксованої частини варіантів технологічних операцій; \bar{h}_{ij} - часткові ентропії зафіксованих варіантів технологічних операцій; $\min_j(h_{ij})$ -- мінімальні елементи у відповідних стовбцях матриці часткових ентропій.

Співпадіння індексів різних вершин значення не має, оскільки, до різних вершин ведуть різні шляхи. У формулі (4.6) для обчислення оцінки вартості виготовлення позначення аналогічні.

Розглянемо послідовність розв'язку задачі мінімізації сумарної вартості виготовлення (4.4) при обмеженні на імовірність виходу придатних.

1. Присвоюємо $k = 1 = 0$, $\bar{a}_0 = \bar{b}_0 = 0$. Обчислюємо оцінки

$$\hat{a}_0 = \sum_{i=1}^n \min_j (h_{ij}) \quad \hat{b}_0 = \sum_{i=1}^n \min_j (c_{ij}).$$

Якщо оцінка часткової ентропії перевищує допустиму, то розв'язку не існує і задача завершується. Інакше переходимо до розгалуження дерева рішень.

2. Вибираємо номер рівня вершини і збільшуємо його на одиницю ($k=k+1$). Включаємо m нових вершин у список кінцевих вершин дерева рішень. Оцінку для кожної нової вершини знаходимо по оцінках розгалужуваної вершини. Компонентам оцінок при цьому присвоюються нові значення:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{k1} &= \bar{a}_{k-1} + h_{k1} \quad , \quad \hat{a}_{k1} = \hat{a}_{k-1} - \min_j (h_{kj}) \quad , \\ \bar{b}_{k1} &= \bar{b}_{k-1} + c_{k1} \quad , \quad \hat{b}_{k1} = \hat{b}_{k-1} - \min_j (c_{kj}). \end{aligned}$$

Оцінки \bar{a}_{k1} нових вершин порівнюються із максимально допустимою частковою ентропією. Вершини, для яких обмеження порушується, вилучаються зі списку кінцевих.

3. Зі списку кінцевих вершин вибираємо вершину з мінімальною оцінкою вартості. Якщо номер рівня вершини рівний m , то розв'язок знайдено і зворотнім просуванням від вершини до кореня дерева рішень визначається послідовність варіантів технологічних операцій у технологічному процесі. Інакше процес розгалуження дерева продовжується із пункту 2.

4.1.3. Оптимізація послідовності технологічних операцій з контролем

Розглянемо тепер задачу оптимального вибору послідовності технологічних операцій і розміщення контрольних операцій по послідовному технологічному процесу і покажемо, що шляхом внесення

порівняно простих змін її можна розв'язувати розглянутим вище алгоритмом.

Будемо вважати, що кожен варіант технологічної операції має ще один – суміщені операції оброблення і контролю. Припустимо що дефектні вироби не відновлюються, контроль розділяє потік виробів на придатні та дефектні точно і ця властивість для даної технологічної операції не залежить від розміщення контрольних постів по технологічному процесу. Імовірність виходу придатних виробів для варіанту технологічної операції з контролем така ж як для варіанту без контролю, але, оскільки, дефектні вироби відбраковуються і не поступають на наступні етапи обробки зменшується вартість на наступних операціях на один придатний виріб.

Введемо матрицю вартостей технологічної операції з контролем:

$$K = \| \| k_{ij} \| \| = \| \| c_{ij} + c_{kij} \| \|, \quad (i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}).$$

Тут c_{kij} – вартість контролю варіанту технологічної операції.

Припустимо, що деяка зафіксована послідовність технологічних операцій містить q операцій з контролем. Визначимо математичне сподівання вартості оброблення виробу на відрізьку після t -ї операції з контролем до наступної - $(t+1)$ -ї операції з контролем включно. Позиції, які займають ці операції у технологічному процесі позначимо відповідно через s_t і s_{t+1} . Імовірність виходу придатних виробів після t -ої операції з контролем рівна:

$$\bar{p}_{s_t} = \prod_{i=1}^{s_t} \bar{p}_{ij}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4.7)$$

Оскільки на наступні технологічні операції поступають тільки придатні вироби, то математичне сподівання вартості оброблення після t -ої до наступної - $(t+1)$ -тої операції з контролем включно визначається за формулою:

$$\bar{c}_{(t,t+1]} = \bar{p}_{s_t} \left(\sum_{i=s_t+1}^{s_{t+1}} \bar{c}_{ij} + \bar{k}_{ij} \right) \quad (4.8)$$

Для послідовності технологічних операцій від входу до першої операції з контролем слід прийняти: $t = 0$, $s_0 = 0$, $\bar{p}_0 = 1$.

Для спрощення будемо вважати також, що весь технологічний процес завжди закінчується операцією з контролем. Тоді для всього технологічного процесу характеристики виходу придатних виробів визначаються за виразами (4.1) і (4.2), а математичне сподівання вартості оброблення одного придатного виробу за формулою:

$$c = \sum_{t=0}^{q-1} \bar{c}_{(t,t+1]} = \sum_{t=0}^{q-1} \bar{p}_{s_t} \left(\sum_{i=s_t+1}^{s_{t+1}} \bar{c}_{ij} + \bar{k}_{ij} \right), \quad s_0 = 0, \quad \bar{p}_0 = 1, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4.9)$$

Оцінку ентропії для кожної вершини обчислюємо за формулою (4.2). Складніше обчислюється оцінка вартості. Прийmemo, що на шляху до даної вершини у дереві рішень зафіксовано k операцій з яких r - операції з контролем ($r \leq k$). Тоді, з урахуванням (4.9) вартість зафіксованої частини технологічного процесу визначиться як сума вартостей до r -ої операції з контролем і операцій оброблення після неї до k -ої:

$$\bar{b}_{kl} = \sum_{t=0}^{r-1} \bar{c}_{(t,t+1]} + \bar{p}_{s_r} \sum_{i=s_r+1}^k \bar{c}_{ij} = \sum_{t=0}^{r-1} \bar{p}_{s_t} \left(\sum_{i=s_t+1}^{s_{t+1}} \bar{c}_{ij} + \bar{k}_{ij} \right) + \bar{p}_{s_r} \sum_{i=s_r+1}^k \bar{c}_{ij}. \quad (4.10)$$

Як мінімальну оцінку вартості незафіксованої частини технологічного процесу прийmemo нульове значення, тобто $\hat{b}_{kl} = 0$.

Розглянемо послідовність розв'язку задачі мінімізації сумарної вартості виготовлення (4.8) при обмеженні на імовірність виходу придатних.

1. Присвоюємо $k = 1 = 0$, $\bar{a}_0 = \bar{b}_0 = 0$, $p_0 = r_0 = 1$. Обчислюємо оцінку

$\hat{a}_0 = \sum_{i=1}^n \min_j (h_{ij})$. Якщо оцінка часткової ентропії перевищує допустиму, то

розв'язку не існує і задача завершується. Інакше переходимо до розгалуження дерева рішень.

2. Вибираємо номер рівня вершини і збільшуємо його на одиницю ($k=k+1$). Включаємо $2m$ нових вершин у список кінцевих. Оцінки для кожної нової вершини знаходимо по оцінках вершини, що розгалужується. Компонентам оцінок при цьому присвоюються нові значення:

$$\bar{a}_{k1} = \bar{a}_{k-1} + h_{k1} \quad , \quad \hat{a}_{k1} = \hat{a}_{k-1} - \min_j(h_{kj}) \quad ,$$

для вершин, які відповідають обробляючим операціям ($l \leq m$)

$$\bar{b}_{k1} = \bar{b}_{k-1} + p_{k-1} c_{k1}, \quad r_k = r_{k-1} p_{ij}, \quad p_k = p_{k-1}$$

для вершин, які відповідають обробляючим операціям з контролем ($l > m$)

$$\bar{b}_{k1} = \bar{b}_{k-1} + p_{k-1} k_{k1}, \quad r_k = r_{k-1} p_{k1}, \quad p_k = r_k, .$$

Оцінки \bar{a}_{k1} нових вершин порівнюються із максимально допустимою частковою ентропією. Вершини, для яких обмеження порушується, вилучаються зі списку кінцевих.

3. Зі списку кінцевих вершин вибираємо вершину з мінімальною оцінкою вартості. Якщо номер рівня вершини рівний n , то розв'язок знайдено і зворотнім просуванням від вершини до кореня дерева рішень визначається послідовність варіантів технологічних операцій у технологічному процесі. Інакше процес розгалуження дерева продовжується з пункту 2.

4.2. Аналіз ТП за допомогою характеристичних функцій.

У цьому підрозділі наведено приклад застосування типових процедур об'єднання опису технологічних операцій, наведеного в розділі 3 у технологічний процес.

Об'єктом моделювання є технологічний процес виготовлення друкованих плат комбінованим позитивним методом. Цей технологічний процес складається з наступних укрупнених технологічних операцій:

- виготовлення заготовки і виконання базових отворів;
- підготовка поверхні та отримання рисунка друкованої схеми;
- свердлування монтажних отворів;
- хімічне міднення та гальванічне нарощування провідників;
- травлення фольги;
- обробка друкованих плат по контуру та нанесення захисного покриття.

Укрупнені технологічні операції (макрооперації) складаються з більш дрібних, наприклад позиціонування свердла, механічна та хімічна очистки поверхні тощо. Але з точки зору опису технологічного процесу, кожна з технологічних операцій характеризується своїм розподілом відносних похибок виконання, які зумовлені особливостями природи самої технологічної операції та індивідуальними характеристиками устаткування, на якому вона виконується.

Для першої технологічної операції виготовлення заготовки і виконання базових отворів найбільш характерним розподілом відносних похибок виконання є нормальний розподіл з нульовим або близьким до нуля математичним очікуванням. Заготовки нарізають на спеціальному станку, який дозволяє виготовити заготовки двох типів 305x450 мм— мала групова заготовка і 457x610 мм — велика заготовка. Для процесу, що розглядається, розподіл, який описує технологічну операцію, зображений на рис. 4.1а. Для моделювання розподілу був прийнятий не його аналітичний опис, а генерування випадкових чисел із розподілу, наближеного до нормального тож середнє значення похибки є наближеним до нульового. Для оцінки імовірності введення дефекту був розрахований інтеграл розподілу імовірностей у межах $(-\infty; -1)$ та $(1; +\infty)$, оскільки межа ± 1 вважається

границею допуску. За прийнятих припущень імовірність введення дефекту становить 0.011, що узгоджено із параметрами технологічної операції, прийнятої для порівняльного аналізу у наступному підрозділі.

Після цього заготовки поступають на другу макроТО підготовки поверхні та отримання рисунка друкованої схеми. На цій технологічній операції відбувається очистка та активація заготовок. Пізніше проводиться нанесення на плату шару фоторезисту, його експонування і видалення незасвічених ділянок. Особливістю видалення незасвічених ділянок фоторезисту є те, що може відбуватися неповне видалення, але неможливе більш як повне видалення. Дефектами на цій технологічній операції можуть бути перемички між доріжками та розриви доріжок, які є менш імовірними. У математичному описі розподілу імовірності похибок ці особливості проявляються у суттєвій несиметричності розподілу. Розподіл, який описує технологічну операцію, зображений на рис. 4.1б та показує імовірність введення дефекту, що становить 0.051. Для даної технологічної операції характерною є відсутність від'ємних відносних похибок виконання, яка відображена у несиметричності розподілу.

Далі заготовки групуються в пакети від однієї до трьох однакових заготовок і листів алюмінієвої фольги, і поступають у свердлувальний станок, який може обробляти чотири пакети доразу по відповідних програмах і виготовляти до 12 плат за один цикл. Заміна сверл відбувається автоматично з спеціального магазину, місткістю 6000 сверл або фрез. Виникнення дефектів на цьому етапі зумовлюється похибками позиціонування і заточки свердла. Для варіанту технологічної операції, що розглядається, характерний нормальний розподіл з математичним очікуванням -0.01 , що зумовлено індивідуальними особливостями устаткування, та імовірністю внесення дефекту 0.03. Даний розподіл представлено на рис. 4.1в і особливості цього розподілу з математичної

точки зору відповідають особливостям розподілу на першій технологічній операції (рис. 4.1а).

На етапі хімічного міднення та гальванічного нарощування провідників плата очищається і поступає на ділянку хімічної гальванізації, де струмопровідний шар нарощується до 25 мікрон. Після цього на плату гальванічним методом осаджується металорезистивний шар, який формується свинцево-оловяним припоєм. Для цієї операції також характерні розподіли відносних похибок без від'ємних значень. Похибки, в основному, зумовлюються незначними коливаннями концентрації електроліту. Розподіл похибок зображено на рис. 4.1г. Аналогічно до розподілу рис. 4.1б, цей розподіл є суттєво несиметричний і володіє імовірністю внесення дефекту 0.07.

На етапі травлення фольги відбувається видалення фоторезисту, травлення міді, яка не покрита металорезистом і видалення самого металорезисту. Похибки, що виникають на цьому етапі можуть виникати в основному через підтравлювання струмопровідних доріжок. Розподіл похибок зображено на рис. 4.1д. Через дискретність регулювання концентрації травного розчину можна спостерігати суттєву багатомодальність розподілу імовірності похибки операції. Крім того, розподіл має суттєво несиметричний характер. Імовірність внесення дефекту, тобто виходу за межі встановлених допусків, становить 0.049.

На останній технологічній операції обробки друкованих плат по контуру та нанесення захисного покриття на плату наносять паяльну маску і методом гарячого лудження покриваються контактні площадки. Останнім кроком цієї технологічної операції є нанесення маркування шовкотрафаретним методом. На даній технологічній операції похибки, в основному, зумовлені похибками у позиціонуванні маски. Розподіл похибок зображено на рис. 4.1е і його загальні риси з точки зору математичного опису відповідають розподілам похибок на першій та третій технологічних

операціях. Відмінність полягає у ненульовому середньому значенні, зумовленому фізичними особливостями даної технологічної операції. Імовірність внесення дефекту становить 0.02.

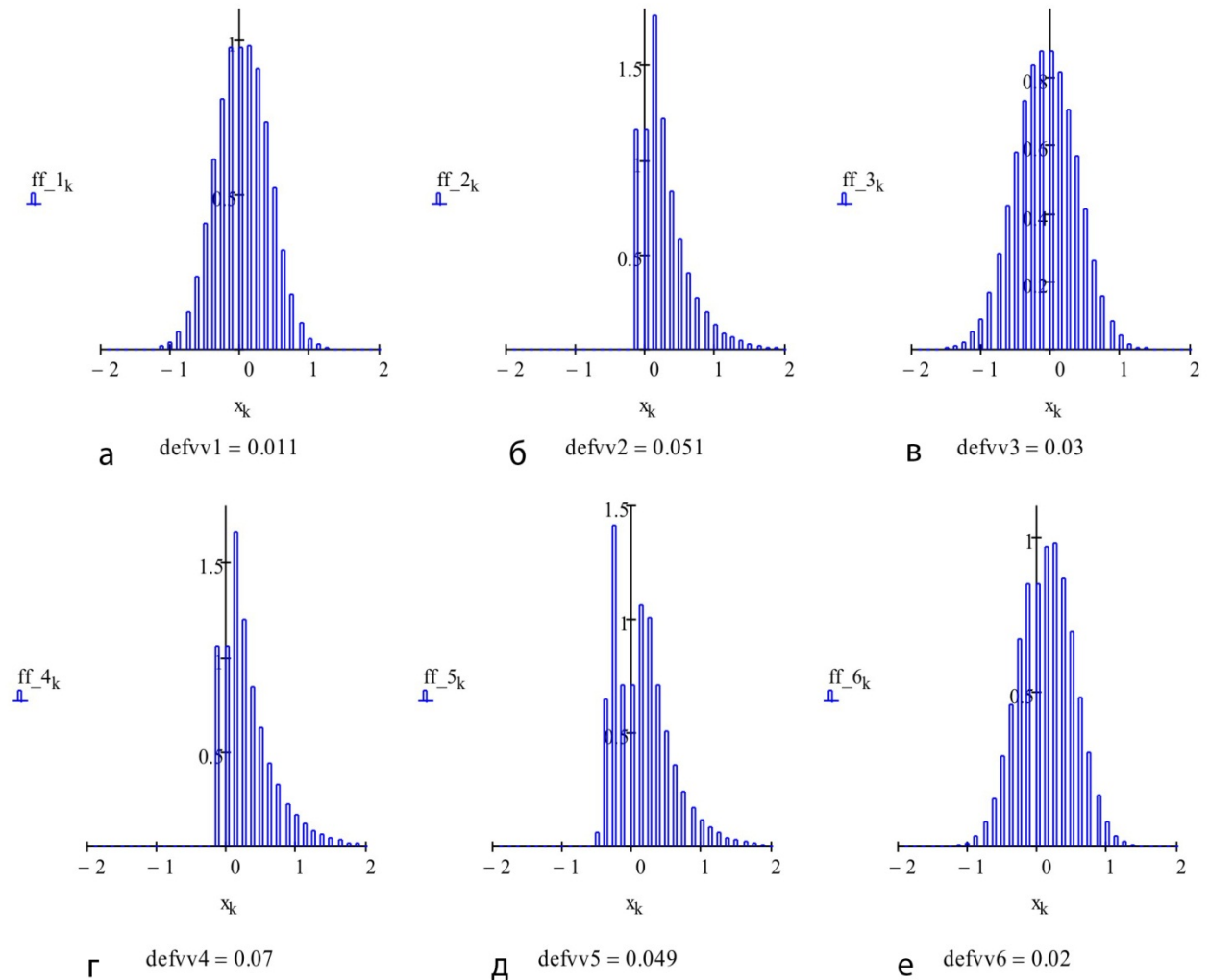


Рис. 4.1. Розподіли відносних похибок виконання технологічних операцій

Розглянемо даний процес виробництва друкованих плат з точки зору впливу технологічних операцій на закон розподілу відносних похибок у партії, яка проходить даний процес. Контроль здійснюється після кожної технологічної операції і імовірності правильного контролю k -го параметру виробу, сформованого на k -му кроці технологічного процесу приймаються рівними одиниці. Партія матеріалів, які заходять на обробку має розподіл відносних відхилень параметрів від нормативу, зображений на рис.4.2 з

нульовим середнім значенням та імовірністю дефекту 5% і наближено відповідає нормальному закону розподілу.

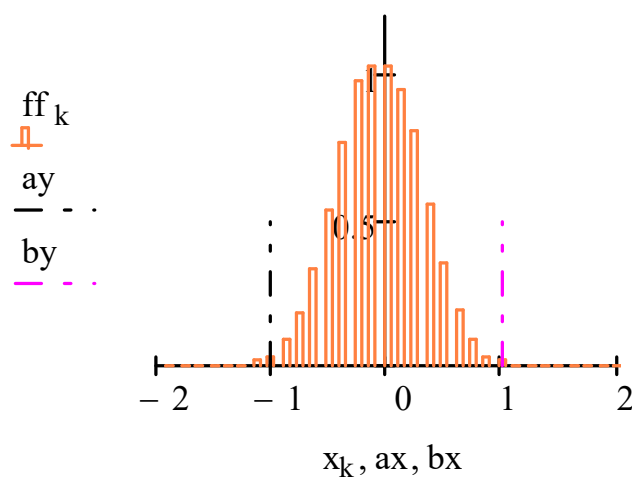


Рис. 4.2. Розподіл відносних відхилень параметрів партії матеріалів від нормативу

Проаналізувавши даний процес за допомогою моделей на основі характеристичних функцій, отримаємо результат, відображений на рис. 4.3. З рисунку видно що під впливом законів розподілу відносних похибок виконання технологічних операцій і здійснення контролю закон розподілу відносних відхилень параметрів виробів, що утворюють партію, значно видозмінюється і вже після першої технологічної операції не відповідає нормальному. Контрольні операції здійснюють «обрізку» закону розподілу, що ще більше віддаляє реальний закон розподілу від нормального. Візуально незначні відхилення на зображеннях законів розподілу відображають досить суттєві зміни у статистичних характеристиках дефектності партії, що проходить обробку у технологічному процесі.

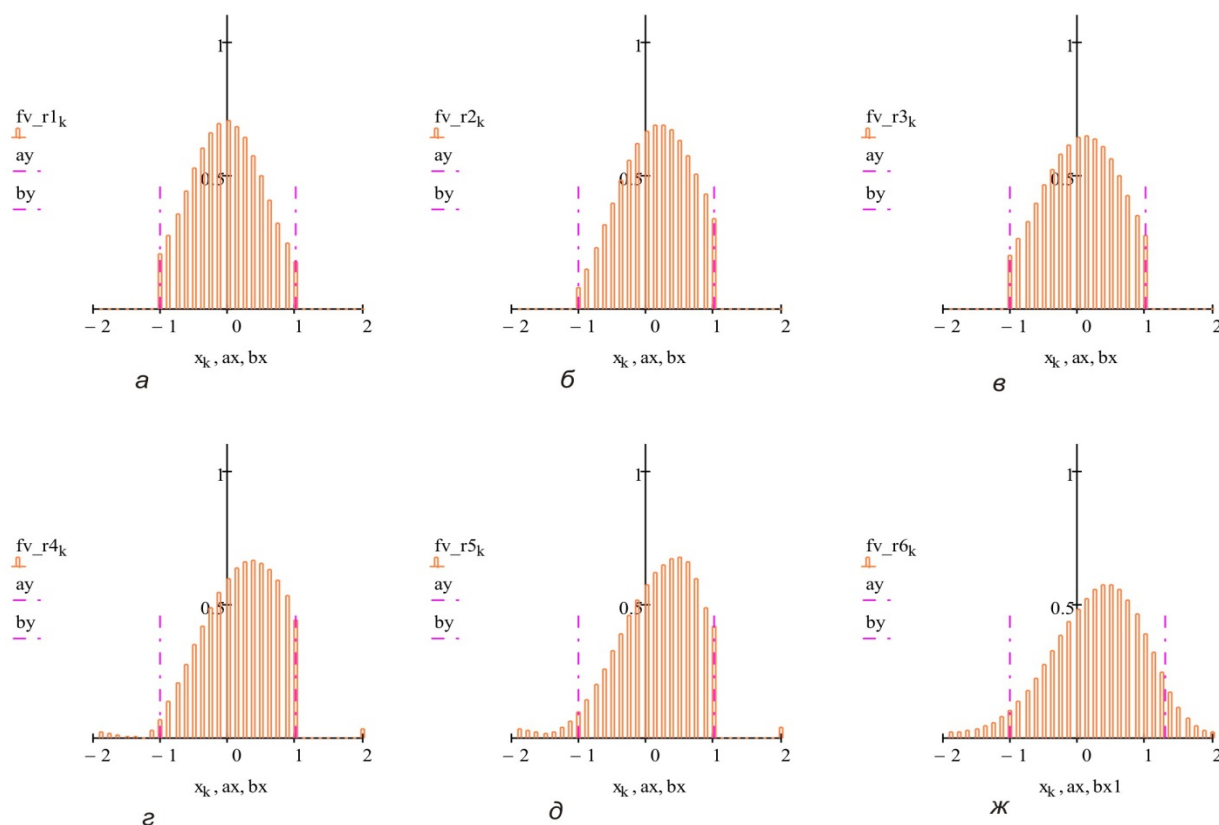


Рис.4.3. Розподіли відносних відхилень виробів на виході технологічних операцій.

Як видно з рисунка, найбільший вплив на розподіл відносних відхилень у партії виробів здійснюють операції, закон розподілу відносних похибок яких відрізняється від нормального, при чому чим більша ця різниця, тим більших деформацій зазнає розподіл відносних відхилень у партії виробів.

4.3. Порівняльний аналіз результатів аналізу технологічного процесу.

Порівняльною базою є програмний комплекс **ОПТАН-ГК**, який дає можливість виконувати такі дії:

- вводити дані щодо технологічного процесу (формувані модель);
- завантажувати раніше створену модель;
- змінювати введені або завантажені дані (редагувати модель);
- перевіряти несуперечливість введених даних (валідізація);

- налаштовувати параметри трьох методів оптимізації глибини контролю
- покрокового, золотого перетину, Хука-Дживса (для користувачів, обізнаних з математичними методами);
- виконувати оптимізацію глибини контролю трьома методами;
- спостерігати результати оптимізації у вигляді таблиць, гістограм та графіків;
- зберігати введені або відредаговані вхідні дані (моделі);
- зберігати результати оптимізації глибини контролю у вигляді таблиць, гістограм та графіків.

Вхідні дані для програми (моделі) розділені на три групи.

1. Іменна частина. Містить назву моделі (технологічного процесу), кількість технологічних операцій технологічного процесу, їх номери та назви.

2. Імовірнісні показники технологічного процесу. Кожна технологічна операція характеризується імовірністю внесення дефекту, імовірністю правильності контролю за результатами контролю якості виконання відповідних технологічних операцій, імовірністю правильного контролю k -го параметру виробу, сформованого на k -му кроці технологічного процесу. Вхідні матеріали характеризуються імовірністю наявності дефектів у матеріалах, комплектуючих, напівфабрикатах і т. ін. на стадії вхідного контролю та імовірністю правильного контролю дефектів на етапі вхідного контролю.

3. Витратні показники ТП.

Якщо партія матеріалів, які заходять на обробку має розподіл відносних відхилень параметрів від нормативу, зображений на рис.4.2 і імовірність дефекту 5%, то, проаналізувавши технологічний процес за допомогою системи **ОПТАН-ГК**, отримаємо, що на його виході процент браку буде

приблизно 7.3%. При використанні для аналізу цього ж технологічного процесу моделей на базі характеристичних функцій виході отримуємо прогнозований рівень браку близько 7.8%, що приблизно співпадає з результатами, отриманими за допомогою системи **ОПТАН-ГК**.

Розглянемо чотири партії матеріалів для описаного вище технологічного процесу. Усі партії характеризуються однаковою імовірністю дефекту (5%) і розподілами відносних відхилень від нормативу, зображеними на рис.4.4.

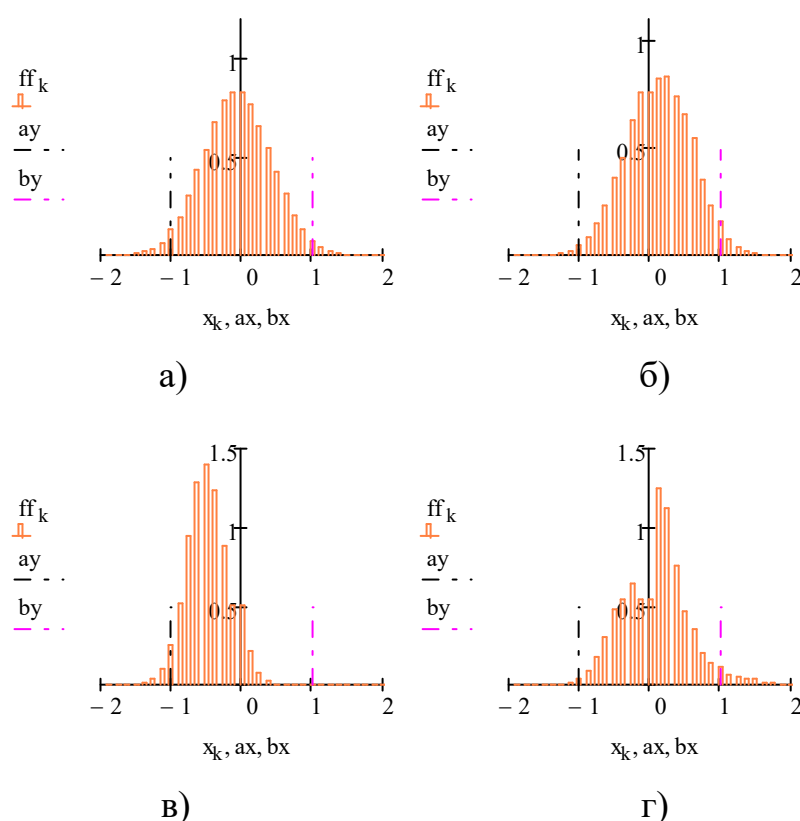


Рис.4.4. Розподіли відхилень параметрів партій матеріалів від нормативу

Проаналізувавши технологічний процес за допомогою системи **ОПТАН-ГК**, отримаємо в прогнозі, ті ж самі 7.36 відсотки браку на виході технологічного процесу для кожної з партій. Але, якщо проаналізувати його за допомогою моделей на основі характеристичних функцій, отримаємо що у випадку 4.4а прогнозований відсоток браку на виході технологічного

процесу буде становити 7.2%, у випадку 4.4в – 7.8% (що приблизно співпадає з оцінкою за допомогою системи **ОПТАН-ГК**), а у випадку 4.4б - 9.7% та у випадку 4.4г – 10% (що перевищує прогноз, зроблений на основі точкових оцінок). Бачимо, що у випадку 4.4в прогнозований відсоток браку найменший.

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що врахування реального закону розподілу відхилень дозволяє отримати більш точний прогноз проценту браку.

Також, якщо стоїть задача зниження собівартості виробів при незмінності структури самого технологічного процесу, можна спробувати вирішити її за рахунок зниження вартості вхідних матеріалів. Як видно з наведеного вище прикладу аналізу технологічного процесу при різних формах закону розподілу відносних відхилень у вхідній партії матеріалів (рис.4.4), рішення задачі зниження вартості може бути знайдене, якщо процес аналізується із врахуванням закону розподілу, тобто коли використовуються моделі на основі характеристичних функцій. При врахуванні лише імовірності дефекту, як це реалізовано в системі **ОПТАН-ГК**, вирішення даної задачі неможливе.

Також за допомогою даної моделі технологічного процесу можна проводити оптимізацію при проектуванні нових технологічних процесів на базі типових технологічних операцій.

При проектуванні технологічного процесу однією із задач є задача вибору оптимального варіанту. Найпоширенішими є два варіанти формулювання задачі оптимізації:

- мінімум затрат при умові, що рівень браку не перевищує деяке задане значення;
- мінімум браку при умові, що рівень затрат не перевищує деяке задане значення;

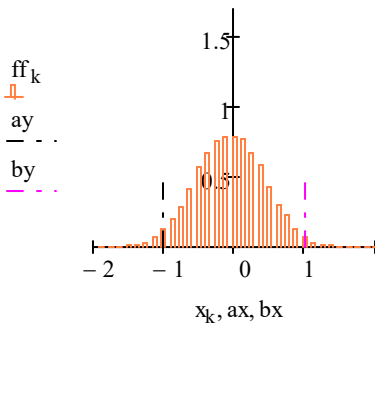
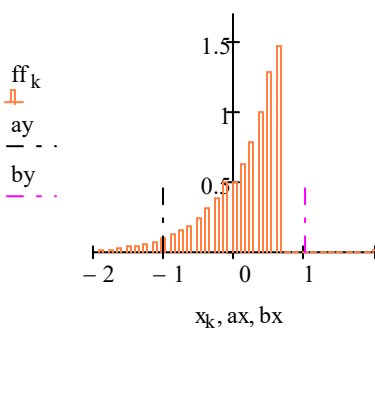
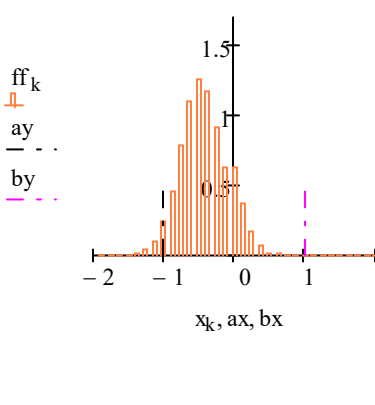
Варіанти реалізації технологічних операцій для вирішення задачі оптимізації з використанням моделей на базі характеристичних функцій можуть формуватися за рахунок різного значення глибини контролю або варіантів виконання технологічних операцій на обладнанні з різним рівнем імовірності внесення дефекту.

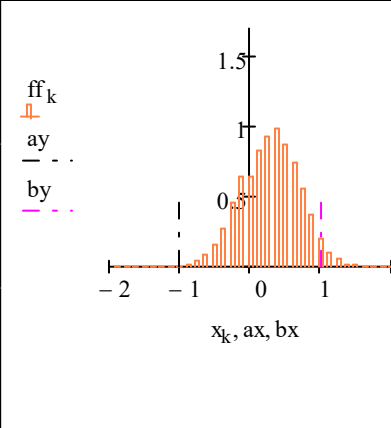
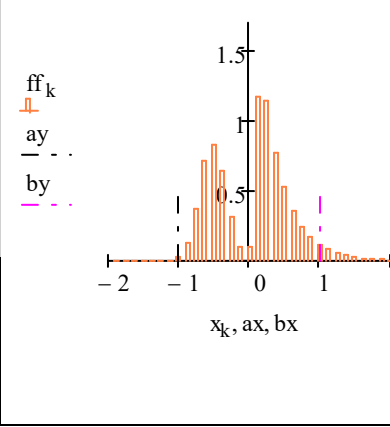
У таблиці 4.1. наведений порівняльний аналіз прогнозу дефектності виробничого процесу комплексом **ОПТАН-ГК** та аналізу того самого процесу з використанням моделей на базі характеристичних функцій. Початковими умовами було прийнято імовірність браку у вхідній партії заготовок $P_0=5\%$. Розглянемо п'ять партій заготовок для виготовлення друкованих плат, у яких імовірність брак 5%, але за рахунок різних розподілів відносних відхилень від номіналу вони володіють різною вартістю. За результатами аналізу програмним комплексом **ОПТАН-ГК** можна зробити висновок: щоби здешевити собівартість виробу, достатньо взяти найдешевшу партію заготовок. Але, якщо проаналізувати цю ситуацію за допомогою моделей на базі характеристичних функцій, то видно, що форма розподілу суттєво впливає результуючу дефектність партії виробів. Результати цього аналізу приведено в таблиці 4.1

Програмний комплекс **ОПТАН-ГК**, який використовує точкові оцінки, є нечутливим до джерела виникнення браку із-за форми розподілу відносних відхилень контрольованого параметра вхідних заготовок від номіналу. Натомість застосування моделей на базі характеристичних функцій показує, що за однакової імовірності дефектності вхідної партії різні розподіли похибок у ній призводять до розкиду кінцевого виходу непридатних від 7.7% до 15.2%. Точкова оцінка, залежно від методу оптимізації, показує розкид від 8.8% до 9.1% для кожної партії заготовок.

Таблиця 4.1.

Порівняльний аналіз оцінки дефектності ТП

Розподіл відносних відхилень і відсоток браку у вхідній партії	Імовірність виходу непридатних		
	ХФ	ОПТАН-ГК	
		метод	Значення дефектності
	0.077	Покрокова оптимізація	0,090703
		Золоте січення	0,088489
		Метод Хука-Джівса	0,088635
	0.116	Покрокова оптимізація	0,090703
		Золоте січення	0,088489
		Метод Хука-Джівса	0,088635
	0.123	Покрокова оптимізація	0,090703
		Золоте січення	0,088489
		Метод Хука-Джівса	0,088635

	0.152	Покрокова оптимізація	0,090703
		Золоте січення	0,088489
		Метод Хука-Джівса	0,088635
	0.147	Покрокова оптимізація	0,090703
		Золоте січення	0,088489
		Метод Хука-Джівса	0,088635

Як видно з таблиці, при аналізі технологічного процесу за допомогою характеристичних функцій коли партії вхідних матеріалів характеризуються однаковим відсотком браку, але мають різні розподіли відносних відхилень параметрів від нормативу, то прогноз імовірності виходу непридатних є різним для кожної партії.

Таким чином проведений порівняльний аналіз показав: по перше - адекватність розроблених моделей (оскільки прогноз виходу непридатних добре корельований з результатами відомого методу), а по друге – більшу гнучкість запропонованого методу, який має можливість враховувати фактичні розподіли ймовірностей відносних відхилень від нормативних параметрів.

4.4. Висновки до четвертого розділу.

1. Описано стратегію оптимізації ТП.
2. За допомогою розробленого методу проаналізовано ТП виготовлення друкованих плат комбінованим позитивним методом і відслідковано

еволюцію закону розподілу відносних відхилень від нормативу у партії виробів на кожному кроці ТП від закону розподілу відносних відхилень у вхідній партії матеріалів до закону розподілу відносних відхилень у партії готової продукції на виході ТП.

3. Проведено порівняння результатів аналізу та оптимізації ТП за допомогою характеристичних функцій та точкових оцінок. Проведений аналіз показав, що врахування реальних законів розподілу відносних відхилень дає більш точний прогноз відсотка браку, ніж аналіз на основі точкових оцінок. Порівняння здійснювалося з програмним комплексом ОПТАН-ГК.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання розроблення економного за витратами часу методу аналізу технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв на основі ймовірнісно-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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Complex Modeling of Electronic Devices Production Systems Quality Maintenance / L.Nedostup, Y. Bobalo, M. Kiselychnyk, O. Lazko // Proc. VI-th International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering” / L.Nedostup, Y. Bobalo, M. Kiselychnyk, O. Lazko., 2004. – С. 225.
2. Hairulliza M. J. Quality Control Implementation in Manufacturing Companies: Motivating Factors and Challenges [Електронний ресурс] / M. J. Hairulliza, J. Ruzzakiah, G. Devendran // Applications and Experiences of Quality Control. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.intechopen.com/books/applications-and-experiences-of-quality-control/quality-control-implementation-in-manufacturing-companies-motivating-factors-and-challenges>.
3. Igor Motyka, Natalia Nestor Models of control operations with the division of the limits of parameters -- Досвід розробки та застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. CADSM 2011, 23-25 лют. 2011, Львів-Поляна, Україна. – Л.: ПП «Вежа і Ко», 2011. - С. 417-418.
4. Jirapattarasilp K. Quality Management in Electrical-Electronics SMEs / Komson Jirapattarasilp. // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008 Vol II IMECS 2008, 19-21 March, 2008, Hong Kong. – 2008. – С. 23–27.
5. Kernitskiy A., Motyka I., Nedostup L., Nestor N.I. Basic set of models for statistical analysis of technological processes -- Proceedins of the XVI International Ukrainian-Polish Conference “CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Problems. 13-14 жовтня 2008, Lviv, Ukraine - Видавництво НУЛП – Львів – 2008. - с.98-99.

6. Kernitskiy A., Motyka I. Nestor N.I. Models for analysis of accuracy of technological processes. -- Proc. of the IX-th International conference CADSM 2007. "The experience of designig and Application of CAD System in Microelectronics", 20-24 лютого 2007, Поляна, Україна.- Видавництво НУЛП – Львів, 2007 - с. 303-304.
7. Komson J. Quality Management in Electrical-Electronics SMEs / J. Komson, I. Member. // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008 Vol II IMECS 2008. – 19. – С. 3–6.
8. Liu Z. Proactive product quality control: An integrated product and process control approach to MIMO systems. / Z. Liu, J. Xiao, Y. Huang. // Chemical Engineering Journal. – 2009. – №149. – С. 435–446.
9. Motyka I., Nedostup L., Nestor N.I. Models of technological processes for statistical analysis -- XVII Polish – Ukrainian Conftrence on "CAD in Machinry Design – Imlementacion and Educfcional Problems. Krasiczyn, October 9-10, 2009
10. Motyka, I., Volodymyr, K., Kernytskyu, A., Nestor N.I. Recursive algorithm of statistical analysis of technological process applying characteristic functions -- Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics - Proceedings of the 10th International Conference, CADSM 2009
11. Natalia Nestor 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. TCSET'2012, 21-24 лют. 2012, Львів-Славське, Україна / Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. – С. 462.*

12. Nestor N. Advantages of the use of characteristic functions for the statistical analysis of technological processes / N. Nestor, A. Bondariev. // Machine Dynamics Research. – 2017. – С. 5–12.
13. Quality Forecasting Tool for Electronics Manufacturing / E. Juuso, T. Jokinen, J. Ylikunnari, J. Leiviskä. – Oulu: University of Oulu Department of Process Engineering Control Engineering Laboratory, 2000. – 40 с. – (Report A No 12, March 2000).
14. Абрамов О.В., Бернацкий Ф.И., Здор В.В. Параметрическая коррекция систем управления. - М.: , 1982. - с. @1.
15. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении./ Под ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова/ М.: Машиностроение, 1986. - 256 с.
16. Автоматизированное управление технологическими процессами./ Под ред. В.Б. Яковлева. / Н. С.Зотов, О. В. Назаров, Б. В. Петелин, В. Б. Яковлев. – Л.: Изд-во Л.ского ун-та, 1988. – 224 с.
17. Автоматизированный тестовый контроль производства БИС / С. С.Булгаков, Д. Б. Десятов, С. А. Еремин, В. В. Сысоев. – М.: Радио и связь, 1992. – 192 с.
18. Атопшев Ю. С., Ушкар М. Н. Методика проектирования помехоустойчивых высокоскоростных монтажных плат // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). — СПб.: Реноме, 2011. — С. 11-16.
19. Батков А. М. Современные методы проектирования систем автоматического управления / А. М. Батков, И. А. Богуславский, И. Е. Казаков и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 703 с.
20. Безопасность и надежность технических систем / [Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов та ін.]. – М.: Логос, 2004. – 376 с.

21. Беляев Ю. К. Вероятностные методы выборочного контроля / Ю. К. Беляев. – М.: Наука, 1975. – 407 с.
22. Беляков Ю. Н. Методы статистических расчетов микросхем на ЭВМ. / Ю. Н. Беляков, Ф. А. Курмаев, Б. В. Баталов. – М.: Радио и связь, 1985. – 232 с.
23. Бобало Ю. Я. Моделювання та керування процесами формування та контролю якості радіоелектронної апаратури / Ю. Я. Бобало. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №2. – С. 38.
24. 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. - Одеса, 2015. - С.12-13
25. Бондарев А.П., Нестор Н. І. Модель технологічної операції із урахуванням розподілів параметрів технологічного середовища -- 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
26. 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, 2014. – С. 264-265.
27. Браверман Э. М. Методы экстремальной группировки параметров и задача выделения существенных факторов / Э. М. Браверман. // Автомат. и телемех.. – 1970. – №1. – С. 123–132. #68.

28. Бронюкайтис Р. К. Оценка безотказности радиоэлектронных измерительных приборов по постепенным отказам / Р. К. Бронюкайтис, Б. Ш. Аранавичюс. // Оценка безотказности радиоэлектронных измерительных приборов по постепенным отказам. – 1978. – №7. – С. 3–8.
29. Бронюкайтис Р. К. Системный подход к анализу и обеспечению надежности радиоизмерительных приборов / Р. К. Бронюкайтис. // Метрология. – 1977. – №2. – С. 14–18.
30. Булкин М.А., Дубицкий Л.Г. Информативность и приоритетность параметров при оценке качества продукции. Электронная техника. Сер 8. Управление качеством и стандартизация. 1972, вып. 5.
31. Буловский П. И. Проектирование и оптимизация технологических процессов и систем сборки РЭА / П. И. Буловский, В. П. Ларин, А. В. Павлова. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
32. Бурмистров В. П. Обеспечение качества неразъемных соединений и полуфабрикатов / В. П. Бурмистров. – Л.: Машиностроение, 1985. – 223 с. #64. @53
33. Валеев Э. Я. О прогнозировании надежности полупроводниковых приборов по импульсным шумам / Э. Я. Валеев, В. А. Лоссовский. // Надежность и контроль качества. – 1979. – №8. – С. 24–32.
34. Васьків Г. М. Алгоритм визначення імовірнісних показників сумарної дефектності багатокрокових технологічних процесів / Г. М. 1. Васьків, Н. І. Нестор // Збірник праць співробітників та випускників радіотехнічного факультету Львівського політехнічного інституту, присвячений 40-річчю заснування факультету / Г. М. 1. Васьків, Н. І. Нестор. – Львів, 1992.
35. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: 1958. – 464 с.

36. Власов В. Е. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры / В. Е. Власов, В. П. Захаров, А. И. Коробов. – М.: Радио и связь, 1987. – 160 с.
37. Высочина О. С. Моделирование производственных процессов на промышленном предприятии при помощи системы имитационного моделирования ARENA / О. С. Высочина, В. Н. Данич, В. П. Пархоменко. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2012. – №1. – С. 82–85.
38. Гаскаров Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозгалевски. – М.: Советское радио, 1974. – 224 с.
39. Гафт С. Стратегия контроля качества при переходе к бессвинцовым технологиям / С. Гафт, Е. Матов. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – №5. – С. 24–27.
40. Геликман Б. Ю. Вопросы качества радиодеталей / Б. Ю. Геликман, Г. А. Горячева, В. В. Стальбовский. – М.: Советское радио, 1980. – 328 с.
41. Глазунов Л. П. Проектирование технических систем диагностики / Л. П. Глазунов, А. Н. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.
42. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М.: Наука, 1965. – 400с.
43. Двоенко С. Д. Неиерархический дивизимный алгоритм группировки / С. Д. Двоенко. // Автомат. и телемех.. – 1999. – №9. – С. 47–57.
44. Демиденко Е. В. Линейные и нелинейные регрессии / Е. В. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
45. Донец А. М. Автоматизированный анализ и оптимизация конструкций и технологии РЭА / А. М. Донец, Я. Е. Львович, В. Н. Фролов. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с..

46. Дружинин Г. В. Методы оценки и прогнозирования качества / Г. В. Дружинин. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
47. ДСТУ 2470-94. Надійність техніки. Системи технологічні. Терміни та визначення
48. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем / Л. Г. Евланов. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
49. Ефимов В. В., Барт Т. В. Статистические методы в управлении качеством продукции: учебное пособие./ В. В. Ефимов, Т. В. Барт. – М.: КНОРУС, 2006.- 172с.
50. Жаднов В.В., Лазарев Д.В. Модели характеристик надежности составных частей РЭА. / Надежность: Научно-технический журнал. № 4 (11), 2004. – с. 15-23.
51. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Тихменев А.Н. Разработка моделей надежности для проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры. / Радиовысотометрия-2010: Сб. тр. Третьей Всероссийской научно-технической конференции. // Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Из-во «Форт Диалог-Исеть», 2010. – с. 200-201.
52. Залманзон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. / Л. А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
53. Зими́на Е. П. Применение комплекса САПР для разработки конструкторской документации в электронном виде [Электронный ресурс] / Е. П. Зими́на, М. В. Васильев // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 45. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: http://trudymai.ru/published.php?ID=25392&PAGEN_2=2.

54. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с. #59.
55. Ивахненко А. Г. Непрерывность и дискретность / А. Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
56. Измерение вероятностных характеристик случайных процессов с применением стохастических вычислительных устройств / В. Г. Корчагин, Л. Я. Кравцов, Ю. Б. Садонов, Л. М. Хохлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 128 с.
57. Измерения и контроль в микроэлектронике / [Н. Д. Дубовой, В. И. Осокин, А. С. Очков та ін.]. – К.: Высшая школа, 1984. – 367 с.
58. Ишуткин В. И. Технологическая надежность системы СПИД / В. И. Ишуткин. – М.: Машиностроение, 1973. – 128 с.
59. Иыуду К. А. Оптимизация устройств автоматики по критерию надежности / К. А. Иыуду. – М.: Энергия, 1966. – 196 с.
60. Імовірнісна формалізація процесів утворення, виявлення і пропуску дефектів на стадіях життєвого циклу РЕА / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, О. В. Лазько // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2007. – № 595 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 57-61.
61. Касти Д. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти. – М.: Мир, 1982. – 216 с.
62. Климов А. К. Регулировка электронной аппаратуры в микроэлектронном исполнении / А. К. Климов, В. А. Лопухин, Ю. В. Шеханов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 86 с.
63. Комаров А. С. Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем / А. С. Комаров, Д. В. Карпухин, Е. И. Шульгин. – М.: Техносфера, 2014. – 239 с.

64. Контроль функционирования больших систем/ Под ред. Г. П. Шибанова / Г. П. Шибанов, А. Е. Артеменко, А. А. Метешкин, Н. И. Циклинский. – М.: Машиностроение, 1977. – 360 с.
65. Кравчук В. И. Проектирование систем автоматического управления с использованием методов принятия решений / В. И. Кравчук. // Молодой ученый. – 2016. – №26. – С. 47–52.
66. Крамер Г. Математические методы статистики / Геральд Крамер. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
67. Кривошейкин А. В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей / А. В. Кривошейкин. – М.: Мир, 1983. – 136 с.
68. Крылов В. И. Методы приближенного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа / В. И. Крылов, Н. С. Скобля. – М.: Наука, 1974. – 223 с.
69. Моисеев С. А. Метод прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала : дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Моисеев Сергей Александрович – Орел, 2013. – 198 с.
70. Кудрицкий В. Д. Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств / В. Д. Кудрицкий. – К.: Техника, 1982. – 166 с.
71. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления / И. В. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1971. – 320 с.
72. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
73. Лопухин В. А. Автоматизация и оптимизация контроля в производстве радиодеталей / В. А. Лопухин, В. С. Шафранский. – Л.: Энергия, 1980. – 160 с.
74. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа / А. М. Медведев. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.

75. Медведев А., Мылов Г., Люлина В., Набатов Ю., Семенов П., Сержантов А. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 6. Специальные средства контроля и испытания печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 1.
76. Михайлов А. В. Точность радиоэлектронных устройств. / А. В. Михайлов, С. К. Савин. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
77. Морозов В.С., Морозова В.А., Лукошков В.С. Определение оптимального комплекса параметров при решении задач прогнозирования индивидуальной долговечности ЭВП// Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1973. – Вип.2. – С.57-68.
78. Морозов И. Д. Матричные расчеты в статистике / И. Д. Морозов. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 216 с.
79. Мотика І. І. . Моделі операцій контролю для аналізу точності технологічних процесів / І. І. Мотика, Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”, Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика.. – 2002. – №444. – С. 57–60.
80. Мотика І. І. Аналіз похибок технологічних операцій з використанням характеристичних функцій / І. І. Мотика, Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”, Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 1998. – №327. – С. 100–110.
81. Мотика І. І. Бібліотека моделей технологічних операцій для аналізу точності процесів виготовлення / І. І. Мотика, Л. А. Недоступ, Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”, Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2008. – №626. – С. 126–130.
82. Мотика І. І. Метод аналізу виробничих похибок / І. І. Мотика, Н. І. Нестор // Матеріали Міжнародної НТК "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та

- підготовки інженерних кадрів" / І. І. Мотика, Н. І. Нестор. – Львів, 1994.
83. Мотика І. І. Моделювання статистичних характеристик технологічних процесів / І. І. Мотика, Л. А. Недоступ, Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”, Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2010. – №685. – С. 55–59.
84. Мотика І. І. Стандартний розподіл імовірностей для аналізу похибок технологічних процесів / І. І. Мотика, Л. А. Недоступ, Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”, Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2006. – №564. – С. 79–82.
85. Мотика І. І. Характеристичні функції розподілів похибок операцій контролю / І. І. Мотика, Н. І. Нестор // Матеріали 5-ї МНТК “ Досвід розробки і застосування САПР В мікроелектроніці” / І. І. Мотика, Н. І. Нестор. – Львів, 1999.
86. Мылов Г. В. Печатные платы: выбор базовых материалов / Г. В. Мылов. – М.: НТИ «Горячая линия – Телеком», 2015. – 172 с.
87. Мясников В. А. Модели планирования и управления производством / В. А. Мясников, М. Б. Игнатъев, Е. И. Перовская. – М.: Экономика, 1982. – 232 с. #79
88. Недоступ Л. А. Анализ значимости и эффективности контроля ненормированных параметров средств измерения в составе гибких систем управления. / Л. А. Недоступ // Гибкие системы управления. Системные и математические модели: Сб. науч. ст. / Л. А. Недоступ. – Львов, 1985. – С. 17–23.
89. Недоступ Л. А. Матричный анализ процессов формирования и контроля свойств изделий при серийном производстве / Л. А. Недоступ // Проектирование функциональных и информационных структур

- комплексных АСУ на основе методологии системного моделирования: Сб. науч. ст. / Л. А. Недоступ. – Львов, 1983. – С. 78–83.
90. Недоступ Л. А. Нормування дефектності технологічних процесів серійного виробництва радіоелектронних пристроїв / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, Н. І. Нестор // Матеріали науково-технічної конференції «Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці», 23-28 лютого 1993 р / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, Н. І. Нестор. – Львів, 1993.
91. Недоступ Л. А. Оценка погрешностей прогнозирования метрологических свойств средств измерений / Л. А. Недоступ // Исследования в области метрологического обеспечения ИИС и средств измерений системного применения: Сб. науч. ст. / Л. А. Недоступ. – Львов, 1985. – С. 33–38.
92. Недоступ Л. А. Оценка эффективности и оптимизация контроля свойств изделий при серийном производстве. / Л. А. Недоступ // Системные исследования и автоматизация проектирования структур комплексных АСУ. Сб. науч. ст. / Л. А. Недоступ. – Львов, 1982. – С. 55–62.
93. Недоступ Л. А. Применение матриц в задачах моделирования затрат при контроле свойств изделий в процессе производства и эксплуатации / Л. А. Недоступ, М. С. Волошина, Г. М. Васькив // Системное моделирование и проектирование адаптивных структур управления в производственно-хозяйственных организациях: Сб. науч. ст. / Л. А. Недоступ, М. С. Волошина, Г. М. Васькив. – Львов, 1983. – С. 64–69.
94. Недоступ Л. А. Системный анализ процессов формирования и контроля свойств изделий при серийном производстве / Л. А. Недоступ // Системное моделирование, анализ и проектирование

- производственно-экономических систем: Сб. науч. ст. / Л. А. Недоступ. – Львов, 1982. – С. 75–81.
95. Недоступ Л. А. Технологические методы управления качеством радиоэлектронных измерительных устройств / Л. А. Недоступ, Т. Е. Удовиченко, Г. А. Шевцов. – М.: Радио и связь, 1976.
96. Недоступ Л.А. Кіселичник М.Д. Бобало Ю.Я., Нестор Н.І. Исследование начальных распределений и дрейфа частоты кварцевых генераторов -- Тези доповіді на НТК «Машинне моделювання та забезпечення надійності електронних пристроїв», Бердянськ, 1993 р.
97. Недоступ Л.А. Оптимизация контроля, регулировки и технологической приработки приборов. - Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те. 1987. -176 с.
98. Недоступ Л.А., Надобко О.В., Васькив Г.М. Вероятностное моделирование распределений погрешностей средств измерений по результатам оценки их составляющих // Системные исследования проблем управления качеством и автоматизация процессов управления качеством: Материалы III Всесоюз. конф. Львов. 1984. Ч.2. С. 75-79.
99. Недоступ Л.А., Надобко О.В., Шевцов Г.А. Особенности применения ряда Грама-Шарлье для моделирования распределений показателей качества измерительных устройств // Системные исследования проблем управления качеством и автоматизация процессов управления. Материалы I Всесоюз. конф. М., 1 - 19 сент. 1979 г. М., 1980. С. 160-167.
100. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств / А. П. Ненашев. – М.: Вища шк, 1990. – 432 с.
101. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры / [Б. Е. Бердичевский, Л. Г. Дубицкий, Г. М. Сушинцев та ін.]. – М.: Советское радио, 1976. – 296 с.

102. 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
103. Нестор Н. І. Програмний модуль для оптимізації технологічних процесів методом гілок і границь -- Тези доповідей НТК «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки», 20-26 лютого 1995 р. Львів, 1995
104. Нестор Н. І. Оптимізація послідовності технологічних операцій за критеріями виходу придатних виробів і вартості виробів / Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка” Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 1999. – №373. – С. 42–46.
105. Нестор Н. І. Оптимізація технологічних процесів по критеріях якості та мінімальних виробничих витрат методом гілок і границь / Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка” Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв. – 1995. – №289. – С. 65– 69
106. Нестор Н. І. Пакет процедур для розв’язання оптимізаційних задач методом гілок та границь / Н. І. Нестор. // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”, Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2000. – №398. – С. 99–104.
107. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
108. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / Г. Нуссбаумер. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.

109. Оптимизация радиоэлектронной аппаратуры / [А. Я. Маслов, А. А. Чернышев, В. В. Ведерников та ін.]. – М.: Радио и связь, 1982. – 201 с.
110. Оптимизация технико-экономических характеристик радиоаппаратуры / С. Е.Алексеев, А. Н. Голиков, И. Л. Калюжный, И. Л. Маригодов. – К.: Техніка, 1990. – 192 с.
111. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование : учебник : в 3 ч. / А. И. Орлов. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. ч. 3 : Статистические методы анализа данных. — 623 с.
112. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством / А. А. Первозванский. – М.: Наука, 1975. – 616 с.
113. Пестряков В. Б. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры / В. Б. Пестряков. – М.: Советское радио, 1969. – 208 с.
114. Петухова Я. А., Гончарова Е. В. Анализ системы контроля качества продукции // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 2. – С. 655–661. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/570130.htm>.
115. Плоткин Я. Д. Экономика качества и надежности измерительных приборов / Я. Д. Плоткин. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 192 с.
116. Полишко С. П. Управление качеством продукции / С. П. Полишко, А. Л. Козлов. – К.: Техника, 1978. – 143 с.
117. Потоки дефектов и их определение при производстве РЭА / Л. А.Недоступ, Ю. Я. Бобало, М. Д. Киселичник, О. В. Лазько. // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» т.2. ГОУВО «Пензенский государственный университет» - Пенза – 2007 – с 88-89.
118. Принципы построения отраслевой системы автоматизированного проектирования в авиационном приборостроении / [П. П. Парамонов, Ю. А. Гатчин, И. О. Жаринов, та ін.]. // Научно-технический вестник

- информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – №6. – С. 111–117.
119. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат / Г. В. Мылов, А. М. Медведев, П. В. Семенов, И. В. Дрожжин. – М.: НТИ «Горячая линия – Телеком», 2016. – 264 с.
120. Пролейко В. М. Системы управления качеством изделий микроэлектроники / В. М. Пролейко, В. А. Абрамов, В. М. Брюнин. – М.: Советское радио, 1976. – 224 с. @43.
121. Прохоров Ю. В. Теория вероятностей / Ю. В. Прохоров, Ю. А. Розанов. – М.: Наука, 1987. – 400 с. – (вид. 3).
122. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 884 с.#76.
123. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
124. Пухов, Г. Е. Модели технологических процессов / Г. Е. Пухов, Ц. С. Хатиашвили. – М.: Техника, 1974. – 223 с.
125. Салыга В. И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами / В. И. Салыга, Н. М. Кораблев, О. Г. Руденко. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1976. – 179 с.
126. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 464 с. – (Изд. 2-ое, перераб. и доп.).
127. Системы автоматизированного контроля радиоэлектронной аппаратуры / Е. Т. Володарский, В. И. Губарь, Л. Л. Никифоров, Ю. М. Туз. – К.: Техніка, 1983. – 151 с.

128. Скурихин В. И. Математическое моделирование / В. И. Скурихин, В. Б. Шифрин, В. В. Дубровский. – К.: Техника, 1983. – 270 с.
129. Смирнов В. И. Научно-методические проблемы конструкторско-технологической подготовки / В. И. Смирнов // Современные проблемы конструирования и производства радиоаппаратуры / В. И. Смирнов. – М.: ЛЭТИ, 1979. – С. 3–5.
130. Сыпчук П. П. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА / П. П. Сыпчук, А. М. Талалай. – М.: Сов. радио, 1979. – 168 с.
131. Талалай А. М. Модель группировки и оценка разбиения параметров объекта на группы / А. М. Талалай. // Автомат. и телемех.. – 1986. – №2. – С. 147–149.
132. Толстов Г. П. Ряды Фурье / Г. П. Толстов. – М.: Наука, 1980. – 381 с.
133. Точность производства в машиностроении и приборостроении / [Н. А. Бородачев, Р. М. Абдрашитов, И. М. Веселова та ін.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
134. Тупик В. А. Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры [Электронный ресурс] / В. А. Тупик // СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2004. – Режим доступа до ресурсу: <http://dl10cg.rapidshare.de/files/31510061/4078542704/tehnologiya.i.organizaciya.proizvodstva.radioelektronnoj.ap>.
135. Туркельтауб Р. М. Методы исследования точности и надежности схем аппаратуры / Р. М. Туркельтауб. – М.: Энергия, 1966. – 160 с.
136. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер. – М.: Мир, 1967. – 752 с.
137. Филенков В. В. Совершенствование методов контроля и количественной оценки безопасности изделий связи и автоматики :

- дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Филенков Виктор Валерьевич – Омск, 2004. – 134 с.
138. Фомин Б. Ф. Моделирование производственных систем / Б. Ф. Фомин, В. Б. Яковлев. – К.: Вища шк, 1992. – 191 с.
139. Харрингтон Дж. Х. Управление качеством в американских корпорациях / Пер. с англ. - М.: Экономика, 1990. - 272с.
140. Хофман Д. Измерительно-вычислительные системы обеспечения качества / Д. Хофман. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
141. Цвиркун А. Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. Оптимизационно-имитационный подход / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев. – М.: Наука, 1985. – 176 с.
142. Цвиркун А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
143. Чабдаров Ш. М. Методы и математические модели единого системосхемоконструкторско-технологического подхода к разработке радиоаппаратуры / Ш. М. Чабдаров, А. Ю. Феоктистов, Р. Р. Файзуллин. // Радиопромышленность. – 1991. – №4. – С. 1–3.
144. Шакалис В. В. Моделирование технологических процессов / В. В. Шакалис. – М.: Машиностроение, 1973. – 136 с.
145. Шило, Г. Н. Расчет нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий [Текст] / Г.Н. Шило, Д.А. Коваленко, Н.П. Гапоненко //Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – №1. – С. 15-18.
146. Шило, Г.М. Вибір стратегії призначення інтервальних допусків [Текст] / Г.М. Шило, І.М. Веснін, М.П. Гапоненко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2012. — №2. — С.52-57.

147. Шило, Г.Н. Стратегии назначения интервальных допусков [Текст] /Г.Н.Шило // Кибернетика и системный анализ. - 2015. - Т.51. - №4. - С.176-186.
148. Шумилин А. С. Точностные расчеты в микроэлектронике / А. С. Шумилин. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 140 с.
149. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / [В. И. Городецкий, А. К. Дмитриев, В. М. Марков та ін.]. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
150. Юрин В. Н. Повышение технологической надежности станков / В. Н. Юрин. – М.: Машиностроение, 1981. – 78 с.

ДОДАТОК А.

ВЛАСТИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ФУНКЦІЙ

Характеристичною функцією дійсної скалярної величини X називається математичне сподівання функції $\exp(i\lambda x)$, яка розглядається як функція змінної λ :

$$g(\lambda) = M[e^{i\lambda x}]. \quad (\text{Д1.1})$$

У відповідності із визначенням математичного сподівання для характеристичної функції отримуємо формулу:

$$g(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda x} f(x) dx. \quad (\text{Д1.2})$$

Характеристичні функції мають ряд властивостей, які дозволяють значно спростити розв'язок багатьох задач теорії ймовірностей. Наведемо найважливіші з цих властивостей [121, 122].

1) Характеристична функція будь-якої випадкової величини при усіх дійсних значеннях λ неперервна і не перевищує по модулю одиницю.

2) При зміні знаку λ на протилежний характеристична функція дорівнює комплексно спряженій, тобто:

$$g(-\lambda) = \overline{g(\lambda)}. \quad (\text{Д1.3})$$

3) Якщо випадкові величини X і Y зв'язані між собою лінійною залежністю

$$Y = aX + b, \quad (\text{Д1.4})$$

то характеристична функція $g(\lambda)$ випадкової величини Y виражається формулою

$$g_y(\lambda) = e^{i\lambda b} g_x(a\lambda) \quad (\text{Д1.5})$$

4) Якщо дві випадкові величини X і Y незалежні і

$$Z = X + Y, \quad (\text{Д1.6})$$

то характеристична функція випадкової величини Z дорівнює:

$$g_z(\lambda) = g_x(\lambda)g_y(\lambda) \quad (\text{Д1.7})$$

Дана формула легко узагальнюється на суму будь-якої кількості незалежних випадкових величин. Якщо

$$Z = \sum_{v=1}^n X_v, \quad (\text{Д1.8})$$

то

$$g_z(\lambda) = \prod_{v=1}^n g_{x_v}(\lambda) \quad (\text{Д1.9})$$

5) Для лінійної функції незалежних випадкових величин

$$Z = \sum_{v=1}^n a_v X_v + b \quad (\text{Д1.10})$$

характеристична функція прийме вид:

$$g_Z(\lambda) = e^{i\lambda b} \prod_{v=1}^n g_{X_v}(a_v \lambda) \quad (\text{Д1.11})$$

б) Характеристичною функцією n -вимірного випадкового вектора X називається функція n змінних $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, яка визначається формулою:

$$g(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = \mathbf{M} \left[e^{i \sum_{p=1}^n \lambda_p X_p} \right], \quad (\text{Д1.12})$$

або

$$g(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\lambda_1 x_1, \dots, \lambda_n x_n)} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (\text{Д1.13})$$

Скорочено вираз (Д1.13) записують у формі:

$$g(\lambda) = \mathbf{M} \left[e^{i(\lambda, \mathbf{X})} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\lambda, \mathbf{X})} f(\mathbf{X}) d(\mathbf{X}), \quad (\text{Д1.14})$$

де інтеграл слід розуміти як n -кратний інтеграл по n змінних x_1, \dots, x_n , через λ і X позначено n -вимірні вектори з компонентами відповідно $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ і x_1, \dots, x_n , а через (λ, X) - їх скалярний добуток.

7) Якщо випадковий вектор Y є результатом лінійного перетворення

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}, \quad (\text{Д1.15})$$

де \mathbf{b} - не випадковий вектор, то його характеристична функція визначається формулою:

$$g_y(\lambda) = e^{i(\lambda, b)} g_x(A^t \lambda) \quad (Д1.16)$$

8) Густина імовірності випадкового вектора виражається через його характеристичну функцію в скороченій формі за формулою:

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\lambda, \mathbf{X})} g(\lambda) d\lambda \quad (Д1.17)$$

У частковому випадку для скалярної випадкової величини можемо скористатися формулою:

$$f(X) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda x} g(\lambda) d\lambda \quad (Д1.18)$$

9) Якщо випадковий вектор X має центральні моменти μ_i до N включно, то вони можуть бути визначені з ряду:

$$\begin{aligned} e^{\sum_{p=1}^n \lambda_p m_{x_p}} g(\lambda_1, \dots, \lambda_n) &= \\ = 1 + \sum_{v=2}^N i^p \sum_{h_1 + \dots + h_n = v} \frac{\mu_{h_1 \dots h_n}}{h_1! \dots h_n!} \lambda_1^{h_1} \dots \lambda_n^{h_n} + R_n \end{aligned} \quad (Д1.19)$$

$$(h_1 + h_2 + \dots + h_n = v)$$

Отже, якщо відома характеристична функція вектора X , можна розкласти ліву частину виразу (Д1.17) в ряд Маклорена і шляхом порівняння членів при однакових степенях λ можна знайти центральні моменти потрібного порядку.

Якщо X скалярна випадкова величина, як частковий випадок маємо формулу:

$$e^{i\lambda m_x} g(\lambda) = 1 + \sum_{r=2}^N \frac{i^r \mu_r}{r!} \lambda^r + R_N \quad (\text{Д1.20})$$

ДОДАТОК Б.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

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.

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)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (форма участі здобувача):

11. Kernytskyy 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) (Очна участь здобувача із доповіддю)

12. Motyka I., Nestor N., Karkulyovskyy V., Kernytskyy 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) (Очна участь здобувача із доповіддю)

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) (Очна участь здобувача із доповіддю)

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) (Очна участь здобувача із доповіддю)

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. . (Заочна участь здобувача, співдоповідач)

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. (Очна участь здобувача із доповіддю)

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. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)

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. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)

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 (Очна участь здобувача із доповіддю)

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. (Очна участь здобувача із доповіддю)

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. (Очна участь здобувача із доповіддю)

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 – Implementacion and Educational Problems.

October 9-10, Krasieczyn, 2009. P. 37-38. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)

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. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)

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. (Очна участь здобувача із доповіддю)

**ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



_____ 2018 р.

АКТ

про впровадження у навчальний процес

Національного університету "Львівська політехніка"

наукових результатів, отриманих в рамках виконання дисертаційної роботи "Статистичне моделювання технологічних процесів виробництва радіоапаратури методом характеристичних функцій" на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, виконаної Нестор Наталією Ігорівною

Комісія в складі голови методичної комісії спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», к.т.н. доц. Марікуци У.Б., завідувача кафедри «Системи автоматизованого проектування» д.т.н., проф. Лобур М.В., заступника завідувача кафедри «Системи автоматизованого проектування» к.т.н., доц. Каркульовського В.І., старшого викладача кафедри «Системи автоматизованого проектування» Панчака Р.Т., цим актом стверджує впровадження і використання в лекційному курсі та лабораторних заняттях для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» на кафедрі «Системи автоматизованого проектування» в дисципліні «Автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва» наукових результатів, отриманих в результаті виконання дисертаційної роботи «Статистичне моделювання технологічних процесів виробництва радіоапаратури методом характеристичних функцій» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, виконаної Нестор Наталією Ігорівною.

Зокрема, у навчальній дисципліні використовують запропоновані Нестор Н.І.:

- моделі операції обробки (Тема 8. Математичні моделі об'єктів складання. Пункт: Проектування ТП механічного складання вузлів)
- моделі операції обробки та моделі операції контролю (Тема 20. Синтез структури технологічних процесів і операцій при обробці деталей в гнучких виробничих системах. Пункт: Синтез структури технологічних процесів.)

Голова метод. комісії к.т.н., доц.

_____ Марікуца У.Б.

Члени комісії:

д.т.н., проф.

_____ Лобур М. В.

к.т.н., доц.

_____ Каркульовський В.І.

ст.викладач

_____ Панчак Р.Т.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
 Головний конструктор
 ТОВ НВП «ХАРТРОН-ЮКОМ»
 Сфименко М.В.
 "12" вересня 2018 р.

АКТ

про використання моделей технологічних операцій,
 розроблених старшим викладачем кафедри "Системи автоматизованого
 проектування" Національного університету "Львівська політехніка"

Нестор Наталією Ігорівною

отриманих в рамках виконання дисертаційної роботи

"Статистичне моделювання технологічних процесів виробництва
 радіоапаратури методом характеристичних функцій"

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Розроблені Нестор Н.І. імовірнісні моделі технологічних операцій
 обробки та контролю, а також результати статистичного моделювання
 технологічного процесу використані у роботі ТОВ НВП «ХАРТРОН-ЮКОМ».
 Нестор Н.І. надала консультації щодо використання моделей, підготовки даних
 та інтерпретації отриманих результатів.

Моделі, запропоновані Нестор Н.І., використані для визначення
 оптимального розміщення операцій контролю і вибору параметрів контролю
 технологічного процесу виробництва телеметричної апаратури для
 ракетноносіїв.

Начальник лабораторії
 ТОВ НВП «ХАРТРОН-ЮКОМ»



Финогенов Ю.М.