

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Бобало Юрій Ярославович**

УДК [621.396.6:658.018.2]:004.94

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗОВАНЕ  
КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ  
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ЗА  
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів.

**Науковий консультант**

доктор технічних наук, професор  
**Недоступ Леонід Аврамович**,  
Національний університет  
«Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри теоретичної  
радіотехніки та радіовимірювань

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Ястребенецький Михайло Онисимович**,  
Державне підприємство Державний  
науково-технічний центр з ядерної та  
радіаційної безпеки Державного комітету  
ядерного регулювання України, м. Харків,  
начальник відділу

доктор технічних наук, професор  
**Шинкарук Олег Миколайович**,  
Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, завідувач кафедри  
радіотехніки та зв'язку

доктор технічних наук, професор  
**Кривуля Геннадій Федорович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки завідувач кафедри  
автоматизації проектування обчислювальної  
техніки, м. Харків

Захист відбудеться 21 жовтня 2010 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 09 \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Северин В. П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Забезпечення високої якості та надійності функціонування технічних об'єктів є однією з найважливіших науково-практичних проблем. У сучасних умовах, які характеризуються напруженим економічним станом, стратегічною лінією вирішення цієї проблеми є подальший розвиток наукових засад комплексного підвищення техніко-економічної ефективності створення нової техніки, впровадження перспективних технологій автоматизованого керування процесами проектування і виробництва з максимальним використанням їхніх потенціальних можливостей і раціонального використання всіх видів ресурсів.

Питання забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури (РЕА) завжди перебували в центрі уваги вчених і спеціалістів промислових підприємств, про що свідчить значна кількість чинних нормативних документів і публікацій за цією тематикою. Над проблемами теорії і практики автоматизованого керування цими процесами в Україні активно працюють у таких наукових центрах, як Інститут кібернетики НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Національний університет «Львівська політехніка», Харківський національний університет радіоелектроніки, Вінницький національний технічний університет та інші. Значну кількість задач, пов'язаних з проблемою забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури, до останнього часу фахівці ставили та вирішували переважно як самостійні задачі без достатнього системного обґрунтування. Зростання складності проектування, виготовлення та експлуатації цього виду техніки, а також витрат, пов'язаних з ними, все більше вимагають прийняття ефективних рішень на всіх етапах життєвого циклу.

Для знаходження раціональних варіантів на етапах проектування апаратури, технологічної підготовки виробництва і самого виробництва останніми роками широкого застосування набули інтегровані системи автоматизованого проектування. Однак математичні моделі, які використовуються в цих системах, є недостатньо спроможними відображати динаміку реальних процесів забезпечення якості виробів на всіх стадіях їхнього життєвого циклу, що не дає змоги достатньою мірою виконувати комплексне автоматизоване керування ними і здійснювати їх оптимізацію за техніко-економічними критеріями. Під час оперативного вирішення питань забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури, особливо у випадку складних процесів її створення, прерогатива під час прийняття рішень залишається у розробника, і такі рішення можуть бути неоптимальними. Усі ці фактори визначають проблемність розробки ефективних методів автоматизованого керування усіма етапами процесів створення РЕА на основі удосконалення математичних моделей для адекватного відображення специфіки забезпечення якості на всіх стадіях життєвого циклу і забезпечення можливості вибору їх оптимальних варіантів за техніко-економічними критеріями, що обумовлює актуальність теми дисертації.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі теоретичної радіотехніки і радіовимірювання Національного університету «Львівська політехніка» відповідно до плану науково-дослідних робіт МОН України в межах держбюджетних тем, у яких здобувач був науковим керівником та відповідальним виконавцем: «Розробка математичного та програмного забезпечення системи комплексної оптимізації процесів проектування та серійного виготовлення радіоелектронних пристроїв за критеріями якості та надійності» (№ ДР 0196U000173), «Розробка методів підвищення ефективності технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв з гарантованими властивостями» (№ ДР 0198U002387), «Достандартизаційні дослідження нових методів на забезпечення надійності та якості компонентів при проектуванні радіоелектронних пристроїв та систем» (№ ДР 0100U000478), «Розробка методів забезпечення надійності радіоелектронної апаратури шляхом оптимізації параметричного синтезу компонентів» (№ ДР 0102U001177), «Розроблення методів забезпечення оптимального синтезу компонентів з врахуванням дрейфів параметрів і вимог до безвідмовності їх сумісного функціонування» (№ ДР 0104U002296), «Моделювання і мультикритеріальна оптимізація процесів забезпечення якості та безвідмовності радіоелектронних пристроїв» (№ ДР 0107U000823).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є теоретичне узагальнення і вирішення проблеми підвищення ефективності процесів проектування і виробництва радіоелектронної апаратури та забезпечення високих показників її якості за техніко-економічними критеріями шляхом розробки методів автоматизованого керування на основі математичного моделювання і комплексної оптимізації для раціонального використання ресурсів.

Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

- проаналізувати практичні проблеми підвищення ефективності процесів проектування, виробництва і експлуатації радіоелектронної апаратури та обґрунтувати принципи автоматизованого керування ними на основі системного моделювання і оптимізації для забезпечення підвищених показників якості продукції за умови мінімальності сумарних виробничих витрат;

- обґрунтувати вибір та формалізацію універсальних критеріїв ефективності автоматизованого керування процесами проектування, виробництва та експлуатації радіоелектронної апаратури і запропонувати методику їх математичного моделювання на різних стадіях життєвого циклу;

- провести аналіз процесів формування і підтримування заданих властивостей апаратури на всіх стадіях її життєвого циклу з урахуванням проектної, виробничої і експлуатаційної дефектності та розробити теоретичні засади математичного моделювання цих процесів як об'єктів автоматизованого керування;

- розробити чисельні методи комплексної багатокритеріальної оптимізації процесів керування якістю з метою отримання високонадійної апаратури за допустимих витрат усіх видів ресурсів;

- розвинути теорію математичного моделювання та прогнозування

потоків виробничих дефектів, їх ущільнення і розрідження під час виконання технологічних та контрольних процедур і на цій основі розробити ефективну методику автоматизованого керування надійністю виробів на основних стадіях виробництва;

– розробити принципи підвищення ефективності системи контролю шляхом моделювання та оптимізації контрольних процедур та створити математичні моделі процесів формування і контролю дефектності на усіх стадіях життєвого циклу радіоелектронної апаратури;

– проаналізувати структуру витрат для забезпечення якості під час проектування, виробництва та експлуатації радіоелектронної апаратури і на цій основі розробити методику моделювання та оптимізації витрат;

– розробити методику використання одержаних теоретичних висновків, методів і математичних моделей для автоматизованого керування процесами забезпечення якості під час виготовлення електронних осцилографів, цифрових частотомірів та інших виробів з використанням реальної виробничої інформаційної бази.

*Об'єктом досліджень* є процеси забезпечення якості проектування, виробництва і експлуатації радіоелектронної апаратури.

*Предметом досліджень* є математичні моделі та методи автоматизованого керування процесами забезпечення якості радіоелектронної апаратури за техніко-економічними критеріями.

*Методи дослідження.* При вирішенні задач комплексного наскрізного математичного моделювання процесів забезпечення якості РЕА як об'єктів автоматизованого керування застосовано методи системного аналізу та теорії систем, математичного моделювання стохастичних систем, ідентифікації об'єктів керування. При вирішенні задач математичного моделювання та прогнозування потоків виробничих дефектів та процесів формування і контролю дефектності застосовано методи теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії випадкових процесів та потоків, математичної теорії надійності, теорії прогнозування. При вирішенні задач комплексної оптимізації процесів керування якістю було застосовано методи багатокритеріальної системної оптимізації та прийняття рішень, а також відповідні чисельні методи.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат дисертації полягає у вирішенні науково-практичної проблеми підвищення ефективності процесів забезпечення якості радіоелектронної апаратури шляхом автоматизованого керування ними під час формування та контролю техніко-економічних показників з раціональним використанням залучених ресурсів.

Наукова новизна визначається наступними положеннями.

1. Подальшого розвитку набули теоретичні основи і методи керування процесами забезпечення якості РЕА як об'єктів автоматизованого керування, що ґрунтуються на системному підході і на відміну від існуючих дають змогу створювати математичні моделі відповідних процесів, які придатні для вирішення задач автоматизованого керування процесами забезпечення якості.

2. Вперше запропоновано перспективний метод моделювання процесів

забезпечення якості РЕА, який базується на використанні універсального показника якості – показника дефектності, яка виникла під час виконання проектних, технологічних і контрольних процедур, що на відміну від відомих методів моделювання дозволяє створювати не локальні, а наскрізні математичні моделі цих процесів з метою використання в системах керування.

3. Вперше виконано формалізацію типових багатоальтернативних оптимізаційних задач оптимізації процесів проектування і виробництва РЕА, які характеризуються множинами поставлених цілей, а також теоретичне обґрунтування методів їх вирішення, що забезпечує можливість підвищення ефективності автоматизованого керування зазначеними процесами.

4. Подальшого розвитку набули теорія і методологія оцінювання та прогнозування безвідмовності виробів на базі апріорної та поточної інформації про якість матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих виробів, а також про дефектність, яка допускається на окремих стадіях технологічного процесу, що дає змогу оцінювати спроможність усіх видів задіяних ресурсів, забезпечувати необхідний рівень якості виробів, визначати вимоги до окремих складових виробничого процесу і в разі потреби проводити їх корекцію.

5. Подальшого розвитку набула методика ідентифікації процесів формування і контролю властивостей виробів, яка базується на математичному моделюванні процесів формування потоків дефектів, їх ущільнення і розрідження під час виконання технологічних та контрольних процедур, що забезпечує можливість аналізу їх впливу на процеси керування якістю.

6. Подальшого розвитку набули теорія і методи моделювання витрат із забезпечення якості та надійності виробів РЕА на стадіях проектування та серійного виготовлення, що забезпечує можливість оптимізації витрат і підвищує ефективність використання обмежених ресурсів.

**Практичне значення одержаних результатів** для радіотехнічної галузі полягає в розробці інженерної методології підвищення і гарантування якості РЕА, зменшення сумарних виробничих витрат і раціонального використання всіх видів ресурсів шляхом моделювання, комплексної оптимізації та автоматизованого керування процесами проектування, виробництва та експлуатації за критеріями якості. Розроблені теоретичні положення, моделі та методи дали змогу вирішити важливу народногосподарську проблему забезпечення високого технічного рівня продукції радіотехнічних підприємств за мінімальних сумарних виробничих витрат та раціонального використання усіх видів ресурсів.

Запропоновані розробки та рішення доведені до конкретної алгоритмічної та програмної реалізації і дозволяють:

- здійснювати математичне моделювання процесів проектування та виготовлення радіоелектронних пристроїв з врахуванням оперативної інформації про властивості виробів, що формуються на кожній стадії, і відповідних показників якості задіяних ресурсів, технологічних і контрольних процедур, а також дестабілізуючих факторів;

- використовувати отримані моделі для комплексної оптимізації процесів проектування та виготовлення РЕА, а також автоматизованого керування ними

з метою забезпечення належної якості виробів і мінімізації сумарних витрат;

– враховуючи вимоги до якості та вартості готових виробів, обґрунтувати вимоги до якості матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, а також вимоги до інших ресурсів, які використовують у конкретному виробництві;

– визначати і нормувати вимоги до окремих автоматизованих технологічних операцій і процесів, а також до параметрів технологічного обладнання та інструменту, які забезпечують необхідний рівень якості виробів;

– визначати і нормувати вимоги до автоматизованої системи контролю – визначати раціональне розміщення контрольних процедур у структурі виробничого процесу, обсяги і глибину контролю, вимоги до метрологічного забезпечення виробництва і ресурсів, які при цьому використовуються;

– оперативно оцінювати надійність виробів на всіх стадіях виробництва на основі поточної інформації про стан технологічних процесів і здійснювати оперативне коректування параметрів процесів.

На Запорізькому ДП «Радіоприлад» впроваджені моделі технологічних процесів виробництва засобів захисту інформації і методи багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів за мінімумом виробничих витрат та методи прогнозування надійності засобів захисту і нормалізації за показниками дефектності, що під час виробництва дали можливість скоротити терміни підготовки виробництва на 14.0 % та зменшити виробничі витрати в середньому на 10,5 %.

На науково-виробничому комплексі «ІСКРА» (м. Запоріжжя) запропоновано метод прогнозування надійності виробів на основі оперативної інформації служби контролю якості виробів про поточну дефектність під час виробництва приймального модуля 694ППОЗ, який забезпечив скорочення дефектності в середньому на 78 %, що підвищило надійність на 8.45 %.

У Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті впроваджені ймовірнісна методологія моделювання і оцінювання ефективності процедур формування та контролю якості РЕА з використанням функціональних і економічних критеріїв на етапах системотехнічного, схемотехнічного та конструкторсько-технологічного проектування, а також методи моделювання і комплексної оптимізації процесів проектування та виробництва РЕА з визначенням оптимальних параметрів процесів проектування і процедур формування та контролю якості на етапах створення РЕА.

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів телекомунікаційного і радіоелектронного профілю в Національному університеті «Львівська політехніка».

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно: розроблення і реалізація підходів до комплексного вирішення проблеми підвищення ефективності процесів проектування, виробництва і експлуатації радіоелектронної апаратури шляхом їх автоматизованого керування для забезпечення високих показників якості при раціональному використанні всіх видів задіяних ресурсів; обґрунтування концепції комплексної оптимізації життєвого циклу апаратури з використанням наскрізних математичних моделей процесів формування і підтримки її якості;

системний аналіз і принципи параметрично-структурного моделювання процесів забезпечення якості апаратури; дослідження функціонування відмовостійкої радіоелектронної апаратури і залежності показників надійності від якості технологічних процесів; теорія і методи оцінювання ефективності і керованості систем забезпечення якості апаратури; дослідження ефективності параметричного синтезу компонентів і розроблення методів оцінювання безвідмовності цих систем; векторно-аналітична інтерпретація і моделювання безвідмовності параметричного синтезу компонентів; дослідження реальних розподілів стикувальних параметрів компонентів і моделювання рядами Грама-Шарльє та Еджворта; питання теорії оцінювання і моделювання перетворення потоків дефектів у процесі виготовлення апаратури; ймовірнісна формалізація і оцінювання ефективності систем забезпечення якості на стадіях життєвого циклу апаратури.

**Апробація результатів роботи.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: науково-технічній конференції «Машинне моделювання та забезпечення надійності електронних пристроїв» (Бердянськ, 1993); I та II Українських конференціях з автоматичного управління «Автоматика» (Київ, 1994; Львів, 1995); International conference reports «Electronics-99» (Каунас, 1999); Polsko-Ukrainska Szkola-Seminarium «Aktualne Problemy Electrotechniki Teoretycznej: Nauka i Dydaktyka» (Соліна, Польща, 2000); Deuxieme conference International «Methodologie, pratique et inferense «MMR'2000» (Бордо, Франція, 2000); IV-th International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering» (Закопане, Польща, 2002); International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering» (Язлівець, Україна, 2003); III, IV Symposium «Modelowanie i symulacja komputerowa w technice» (Лодзь, Польща, 2004, 2005); VI, VII, VIII Международных научно-технических конференциях «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ (Одеса, 2005, 2006, 2007); International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» TCSET (Львів, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010); I та III Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» СПРТП (Вінниця, 2005, 2007); International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering» (Wilkasy, Польща, 2007); International Conference «Dependable systems, services and technologies» DESSERT (Кіровоград, 2007); International Conference CADSM (Львів, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009); Международном симпозиуме «Надежность и качество» (Пенза, Росія, 2007); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» РТІТ (Запоріжжя, 2008); International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering» СРЕЕ (Алушта, 2008).

**Публікації.** Основні положення дисертації викладено в 32 публікаціях, серед яких 1 монографія, 29 статей у фахових наукових виданнях ВАК України.



**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, додатка та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 331 сторінку, включаючи 59 рисунків по тексту, 14 рисунків на 12 окремих сторінках, 5 таблиць по тексту, 1 додаток на 4 сторінках, 325 найменувань використаних джерел на 39 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів дисертаційних досліджень, їх апробацію та публікації.

**У першому розділі** досліджено сучасний стан проблеми забезпечення потрібного рівня якості та безвідмовності радіоелектронної апаратури на стадіях її проектування і серійного виробництва. Встановлено, що традиційні підходи до вирішення цієї проблеми локальною оптимізацією окремих технологічних процесів є недостатньо ефективними, про що свідчить статистика відмов апаратури різного призначення під час її експлуатації. Дослідження фахівців та вчених в галузі радіоелектроніки різних наукових шкіл засвідчують, що близько половини всіх відмов відбувається через виробничі дефекти. Кількість відмов апаратури, пов'язаних із втратою працездатності елементів, також наближається до цього рівня. Встановлено, що підвищення ефективності процесів проектування та виготовлення сучасної високонадійної радіоелектронної апаратури передбачає множини завдань їх моделювання і комплексної оптимізації, які спрямовані на визначення раціональних варіантів цих процесів та обґрунтоване використання залучених ресурсів. Цим проблемам присвячені праці Н.П. Бусленка, В.М. Глушкова, Н.А. Бородачева, А.Н. Гаврилова, Г.Є. Пухова, В.І. Скуріхіна, П.І. Буловського, О.П. Митрофанова, В.Д. Цветкова, Г.В. Дружиніна, В.П. Маслова, Л.Г. Раскіна, О.М. Роїка, Є.Т. Володарського, В.Н. Брюніна, В.П. Стрельнікова, Я.В. Федухіна, Ю.М. Кофанова, Л.М. Любчика, С.Г. Радченка та інших учених. Показано, що вирішення цієї складної науково-технічної проблеми значною мірою визначається науковим технологічним потенціалом проектних організацій заводів-виготовлювачів, який у структурному сенсі є складною системою взаємопов'язаних елементів – матеріальних, інформаційних, інтелектуальних, метрологічних та інших ресурсів. Саме вони визначають потенційні можливості створення нової техніки із заданими експлуатаційними характеристиками. Тому обґрунтування кількісних характеристик і параметрів ресурсів, а також їх раціонального використання в роботі розглядається як одне з головних завдань комплексної оптимізації створення сучасної радіоелектронної апаратури.

На основі аналізу сучасного стану проблеми забезпечення якості апаратури обґрунтовано висновок, що подальшого прогресу у цьому напрямі можна досягнути шляхом підвищення ефективності автоматизованих систем

керування процесами в організаційно-технічних об'єктах, включаючи розроблення, виробництво і експлуатацію цього виду техніки. Дослідження щодо створення апарату такого керування доцільно проводити в таких напрямках:

- розроблення загальної концепції системного моделювання та автоматизованого керування процесами проектування, виробництва і експлуатації РЕА за критеріями якості та надійності;
- розроблення критеріїв і методів оцінювання та забезпечення ефективності процедур формування, підтримування і контролю якості виробів при автоматизованому керуванні процесами на всіх стадіях життєвого циклу;
- розроблення методів і моделювання процесів забезпечення якості РЕА і пов'язаних з ними виробничих витрат. Ці методи повинні охоплювати весь комплекс факторів, які визначають і забезпечують якість виробів на всіх стадіях їх проектування і виготовлення, зокрема якість проектування електричних схем, параметричного синтезу сумісно працюючих компонентів, матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, які при цьому використовуються, якість технологічних процесів під час здійснення операцій структуро- і формоутворення, збирання, монтажу, регулювання тощо;
- розроблення теоретичних основ формування потоків виробничих дефектів, що виникають під час виконання технологічних процедур, і їх перетворення у потоки відмов виробів під час експлуатації. Розроблення на цій основі методології оперативного оцінювання надійності виробів під час виготовлення дасть змогу реалізувати ідею комплексного автоматизованого управління якістю виробів.

У другому розділі розроблено концепцію забезпечення якості сучасної складної і наукомісткої РЕА, яка базується на засадах автоматизованого керування і комплексної оптимізації процесів її створення та експлуатації упродовж повного життєвого циклу –  $S_{жц}$ . Такі системи складаються з підсистем проектування –  $S_{п}$ , виготовлення –  $S_{в}$ , експлуатації –  $S_{е}$  і забезпечення ресурсами –  $S_{r}$ , які пов'язані між собою прямими та зворотними зв'язками і характеризуються відповідними показниками якості. Моделі цих систем представлені на рис. 1–4.

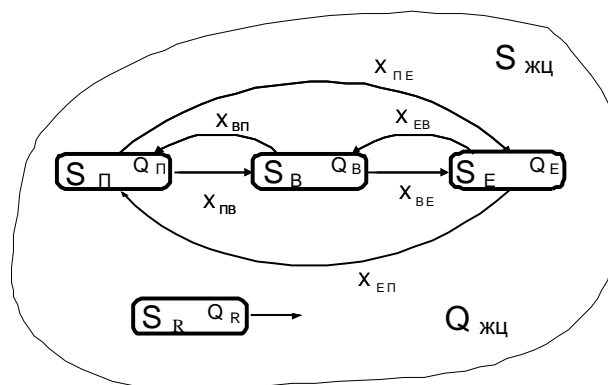


Рис. 1. Модель системи життєвого циклу РЕА  $S_{жц} = \{S_{п}, S_{в}, S_{е}, S_{r}\}$ ,  $Q_{п}, Q_{в}, Q_{е}, Q_{r}$  – показники якості функціонування підсистеми

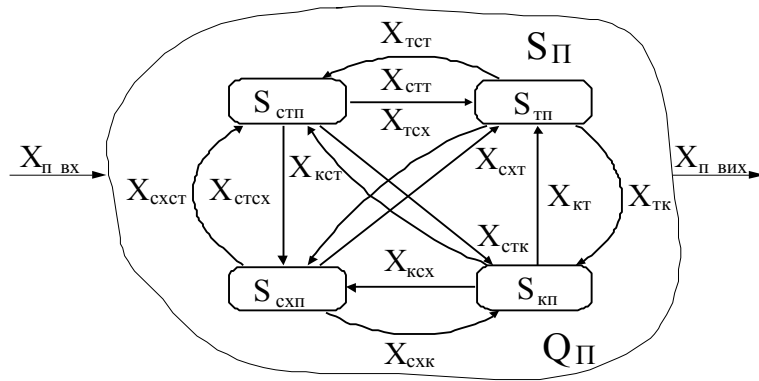


Рис. 2. Модель підсистеми проектування  $S_{\Pi} = \{S_{стп}, S_{схп}, S_{кп}, S_{тп}\}$  з підсистемами проектування:  $S_{стп}$  – системотехнічного,  $S_{схп}$  – схемотехнічного,  $S_{кп}$  – конструкторського,  $S_{тп}$  – технологічного

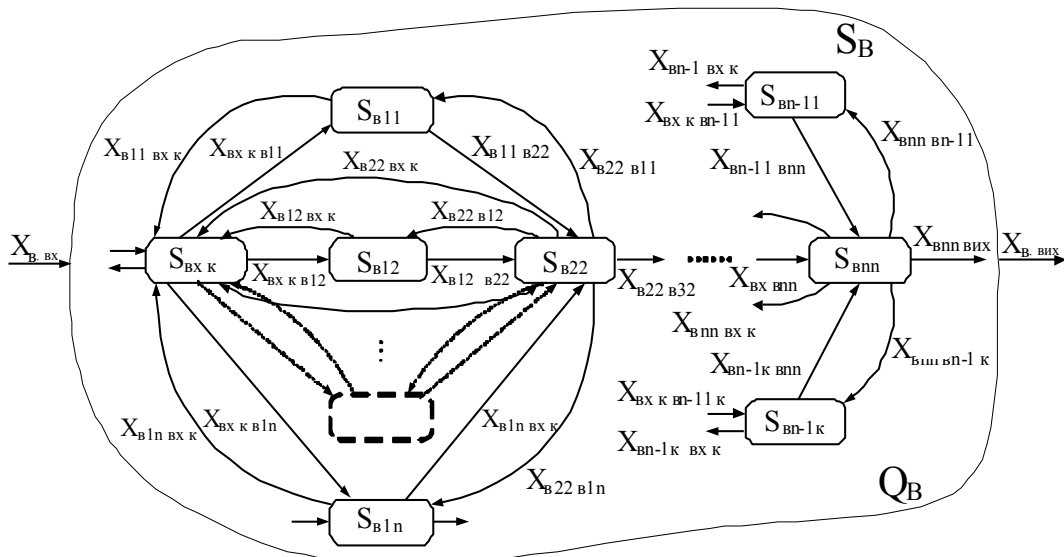


Рис. 3. Модель підсистеми виробництва комбінованої структури  $S_B = \{S_{вхк}, S_{в1,1}, S_{в1,2}, \dots, S_{в1,n}, S_{в2,2}, \dots, S_{вп-1,1}, S_{вп-1,2}, \dots, S_{вп-1,к}, S_{вп,п}\}$ ;  $S_{вхк}$  – вхідний контроль матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів;  $S_{в1,1}, S_{в1,2}, \dots, S_{вп,п}$  – покрокові технологічні процеси

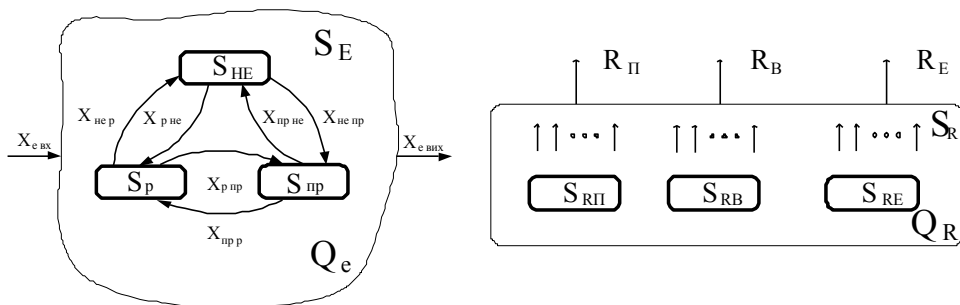


Рис. 4. Моделі підсистем експлуатації  $S_E = \{S_{HE}, S_p, S_{прп}\}$  і забезпечення ресурсами  $S_R = \{S_{рп}, S_{рб}, S_{ре}\}$  з підсистемами: нормальної експлуатації  $S_{HE}$ , ремонту  $S_p$ , профілактики  $S_{прп}$ , проектування  $S_{рп}$ , виробництва  $S_{рб}$ , експлуатації  $S_{ре}$

Згідно з загальними принципами оцінювання якості функціонування складних систем векторам показників, які характеризують якість проектування, виробництва і експлуатації РЕА, надається зміст  $n$ -вимірного вектора дефектності виробу  $Q=[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ . Фізичний зміст компонентів цього вектора визначається метою відповідного процесу і його спроможністю виконувати поставлені завдання. Вектором допустимих значень показників  $q_1^d, q_2^d, \dots, q_n^d \in Q^d=[q_1^d, q_2^d, \dots, q_n^d]^T$ . Вимоги до якості завжди мають односторонні обмеження, тому, користуючись поняттям вектора граничних значень  $Q^g$ , ймовірність виконання системою  $S$ , поставленого завдання  $P_{в.з}$  у загальному випадку, якщо  $Q$  – показник дефектності виробу, визначається умовою  $P_{в.з}=P(\hat{Q} < \hat{Q}^g)$ , де  $\wedge$  – символ випадкової події або вектора. Ймовірність предикату  $(\hat{Q} < \hat{Q}^g)$  з урахуванням у загальному випадку стохастичної природи векторів  $\hat{Q}$  і  $\hat{Q}^g$  у вигляді інтегралу Стілтєса визначають як

$$P_{в.з} = P(\hat{Q} < \hat{Q}^g) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} n \int_{\hat{Q}} F_{\hat{Q}}(Q^g) dF_{\hat{Q}}(Q^g),$$

де  $F_{\hat{Q}}(Q^g) = P(\hat{Q} < Q^g)$ ,  $dF_{\hat{Q}}(Q^g) \approx P(\hat{Q} = Q)$  – умовні ймовірності відповідних означених гіпотез.

Забезпечення якості РЕА на всіх стадіях життєвого циклу формалізується функціонуванням системи  $S$  структури

$$S = \{S_{\Pi}(S_{схп}, S_{стп}, S_{кп}, S_{тп}), S_{В}(S_{Т1}, S_{Т2}, \dots, S_{Тn}), S_{К}(S_{к1}, S_{к2}, \dots, S_{кn}), S_{Е}(S_{Е1}, S_{Е2}, \dots, S_{Еn}), S_{R}(S_{R1}, S_{R2}, \dots, S_{Rn})\}. \quad (1)$$

Всі процеси життєвого циклу РЕА запропоновано оцінювати єдиним універсальним критерієм якості. За такий критерій узято ймовірнісний показник рівня дефектності, інваріантність якого до фізичної сутності та параметрів виробленого продукту і процесів проектування, виробництва та експлуатації виробів дала змогу реалізувати ідею наскрізного моделювання з подальшою комплексною оптимізацією. Оригінальність і гнучкість запропонованого підходу, на відміну від наявних, забезпечує отримання математичних моделей зазначених процесів практично без будь-яких структурних чи параметричних обмежень.

Якщо події забезпечення бездефектності та допущення дефектності під час виконання технологічних процедур подати відповідними ймовірностями  $P_{бдеф}$  і  $P_{деф}$ , то  $P_{бдеф} + P_{деф} = 1$ , а при  $P_{бдеф} = P_{в.з}$   $P_{в.з} = 1 - P_{деф}$ .

Виконання поставленого завдання системою (1) зводиться до виконання нею умови

$$P_{в.з} = P\{Q(\Pi, T, K, E, R) < Q^g\} \geq P_{в.з.зад}, \quad (2)$$

де  $Q(\Pi, T, K, E, R)$  – показник якості всього процесу, що залежить від відповідних показників якості процесів проектування  $\Pi=[n_1, n_2, \dots, n_n]$ , технологічних і контрольних процедур  $T=[t_1, t_2, \dots, t_n]$  і  $K=[k_1, k_2, \dots, k_n]$ ,

процесів експлуатації  $E=[e_1, e_2, \dots, e_n]$  і процесів забезпечення ресурсами  $R=[r_1, r_2, \dots, r_n]$ ;  $Q^r$  – граничне значення показників якості;  $P_{вз}$  і  $P_{вз.зад}$  – ймовірність виконання завдання, поставленого системі  $S$ , та її задане значення.

Умова (2) в роботі розглядається як критерій виконання завдання, а показники  $\Pi, T, K, E, R$  – як параметри оптимізації. Варіантність управління системами і варіантність оптимізаційних задач визначається комбінаціями показників якості, які використовуються як параметри оптимізації. Такими варіантами є:

$$P_{в.з.} = P\{Q(\Pi_{var}, T, K, E, R) < Q^r\} \geq P_{в.з.зад.};$$

$$n_i \in G_{n_i};$$

$$(t_i \in G_{t_i}^\partial) = \text{const}; \quad (e_i \in G_{e_i}^\partial) = \text{const};$$

$$(k_i \in G_{k_i}^\partial) = \text{const}; \quad (r_i \in G_{r_{i,доп}}^\partial) = \text{const};$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$P_{в.з.} = P\{Q(\Pi, T, K, E, R_{var}) < Q^r\} \geq P_{в.з.зад.};$$

$$(n_i \in G_{n_i}^\partial) = \text{const}; \quad (e_i \in G_{e_i}^\partial) = \text{const};$$

$$(t_i \in G_{t_i}^\partial) = \text{const}; \quad r_i \in G_{r_i}^\partial;$$

$$(k_i \in G_{k_i}^\partial) = \text{const};$$

$$P_{в.з.} = P\{Q(\Pi_{var}, T_{var}, K, E, R) < Q^r\} \geq P_{в.з.зад.};$$

$$n_i \in G_{n_i}^\partial; \quad (e_i \in G_{e_i}^\partial) = \text{const};$$

$$t_i \in G_{t_i}^\partial; \quad (r_i \in G_{r_i}^\partial) = \text{const};$$

$$(k_i \in G_{k_i}^\partial) = \text{const};$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$P_{в.з.} = P\{Q(\Pi_{var}, T_{var}, K_{var}, E_{var}, R_{var}) < Q^r\} \geq P_{в.з.зад.};$$

$$n_i \in G_{n_i}^\partial; \quad e_i \in G_{e_i}^\partial;$$

$$t_i \in G_{t_i}^\partial; \quad r_i \in G_{r_i}^\partial;$$

$$k_i \in G_{k_i}^\partial.$$

Отже, із загальної кількості варіантів стало можливим вибирати логічно обґрунтовані варіанти з врахуванням ресурсних можливостей, організаційних та інших факторів. Наведений підхід використано під час визначення контурів управління процесами проектування і виготовлення РЕА з метою забезпечення заданих показників якості виробів.

Формування якісних показників виробів подано структурами, які характеризуються активно формуючими, пасивно формуючими і

неформуєчими перетвореннями показників якості матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів та інших компонентів у показники якості та надійності готових виробів. Активно і пасивно формуєчі перетворення, які надалі будемо позначати А і В, відбуваються внаслідок виконання технологічних і контрольних процедур. Неформуєчі перетворення С, D і E відтворюють об'єктивно зв'язки між показниками дефектності виробів на всіх стадіях виробництва і показниками їх надійності в період експлуатації. Для  $n$  показників якості ці перетворення мають такий зміст:

$$\begin{aligned} A: X_{<n>ном} &\rightarrow \hat{X}_{<n>}, \\ B: \hat{X}_{<n>} &\rightarrow \begin{cases} \hat{X}_{<p>у.конд} \in \{\hat{X}_{<n>}^{\hat{D}}\}, \\ \hat{X}_{<q>деф} \in \{\hat{X}_{<n>}^{\hat{D}}\}, \end{cases} \\ C: \hat{X}_{<p>у.конд} &\rightarrow \omega_{деф}(\tau), \\ D: \omega_{деф}(\tau) &\rightarrow \omega(t), \\ E: \omega(t) &\rightarrow ПН, \end{aligned}$$

де  $X_{<n>ном}$  – вектор номінальних значень показників якості;  $\hat{X}_{<n>}$  – випадковий вектор значень показників якості після перетворення А;  $\hat{X}_{<p>у.конд}$  – вектор значень показників якості, які в результаті контролю визнані умовно кондиційними;  $\hat{X}_{<q>деф}$  – вектор значень показників якості, які визнані дефектними;  $<p>$ ,  $<q>$  – вимірність векторів,  $p+q=n$ ;  $\omega_{деф}(\tau)$  – параметр потоку дефектів у проміжку 0- $\tau$ ;  $\omega(t)$  – параметр потоку відмов виробів під час експлуатації; ПН – показник надійності.

Запропоновані теоретичні положення параметрично-структурного моделювання і управління процесами забезпечення якості та надійності виробів дають змогу отримувати моделі цих процесів практично будь-якої структурної чи покрокової складності. Їхня інваріантність до фізичної сутності процесів забезпечує можливість реалізації на практиці принципу наскрізного моделювання, що є визначальною умовою виконання комплексної оптимізації процесів.

**У третьому розділі** досліджуються процеси утворення дефектності на стадіях життєвого циклу РЕА, проаналізовано сутність і структуру дефектності, здійснено ймовірнісну формалізацію цих процесів як основу запропонованої методології їх наскрізного моделювання.

Стадія проектування представлена на рис. 5 підсистемою проектування РЕА і технологічного процесу виробництва. Якість продукту процесів проектування (підсистема  $S_n$  на рис. 5) визначається якістю схемотехнічного, системотехнічного, конструкторського і технологічного проектування. Дефекти проектування виявляються як на перелічених, так і на подальших стадіях життєвого циклу – під час виготовлення та експлуатації виробів.

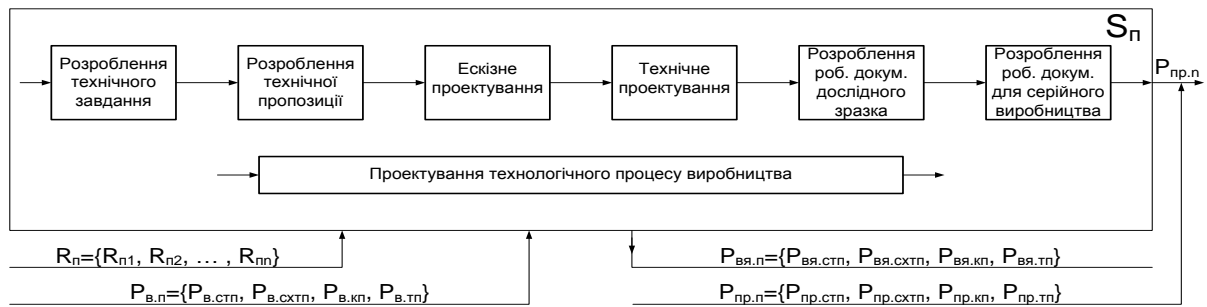


Рис. 5. Підсистема проектування РЕА і технологічного процесу виробництва

Матриці пропущених та виявлених дефектів проектування  $P_{пр.п}$  і  $P_{вя.п}$  описуються стовпцевими матрицями:

$$P_{пр.пр} = [P_{пр.стп}, P_{пр.схтп}, P_{пр.кп}, P_{пр.тп}]^T - \text{матриця А,}$$

$$P_{вя.пр} = [P_{вя.стп}, P_{вя.схтп}, P_{вя.кп}, P_{вя.тп}]^T - \text{матриця В,}$$

у яких використані такі позначення:  $P_{пр.стп}$ ,  $P_{вя.стп}$ ,  $P_{пр.схтп}$ ,  $P_{вя.схтп}$  – ймовірності пропуску та виявлення дефектів на стадії системотехнічного та схмотехнічного проектування, а  $P_{пр.кп}$  та  $P_{вя.кп}$ ,  $P_{пр.тп}$  та  $P_{вя.тп}$  – на стадіях конструкторського та технологічного проектування.

Встановлено, що значну частину дефектів проектування апаратури четвертого та п'ятого поколінь становлять дефекти, зумовлені неоптимальністю параметричного синтезу сумісно працюючих компонентів. У відомих працях ці питання практично не розглядаються, а якість проектів оцінюють переважно натурним випробуванням дослідних зразків. Тому для оцінювання якості проектів в аспекті надійності параметричного синтезу компонентів актуальною залишається проблема розроблення моделей для програмного, інформаційного та методичного забезпечення САПР.

У дисертації запропоновано оцінювати ступінь відповідності якості проекту встановленим нормам щодо забезпечення надійності за допомогою розроблених для цього критеріїв. Їхня перевага над відомими полягає у використанні наявної інформації про реальні розподіли параметрів компонентів, які можуть істотно відрізнятись від класичних. Запропоновані в роботі гнучкі універсальні моделі розподілів стиковальних параметрів здатні враховувати реальні варіації моментів вищих порядків, що забезпечує їхню високу адекватність порівняно з класичними.

Запропоновані критерії оцінювання якості проекту складаються з функціональних та економічних критеріїв.

Функціональні критерії якості мають вигляд:

*критерій придатності*

$$G_{ПР} : \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (X_{к,i} \in \{X_{к,i}^д\});$$

*критерій оптимальності*

$$G_O : \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (X_{k,i} \in \{X_{k,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (X_{k,i} \in \{X_{k,i}^{opt}\}),$$

де  $\{X_{k,i}^{opt}\}$  – множина оптимальних значень параметрів;

*критерій недосягнення*

$$G_H : \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=1}^m (X_{вих.к-1,i} \in \{X_{вих.к-1,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=1}^m (X_{вх.к,i} \in \{X_{вх.к,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=1}^m (X_{вих.к,i} < X_{вх.к,i});$$

*критерій статистичного збігу*

$$G_C : \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=m+1}^p (X_{вих.к-1,i} \in \{X_{вих.к-1,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=m+1}^p (X_{вх.к,i} \in \{X_{вх.к,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=m+1}^p (X_{вих.к-1,i} \in \{X_{вх.к,i}\});$$

*критерій перевершення*

$$G_{\Pi} : \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=p+1}^s (X_{вих.к-1,i} \in \{X_{вих.к-1,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=p+1}^s (X_{вх.к,i} \in \{X_{вх.к,i}^d\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=p+1}^s (X_{вих.к-1,i} > X_{вх.к,i});$$

де  $m + p + s = n$  – загальна кількість стикувальних параметрів;  $m$ ,  $p$ ,  $s$  – кількість параметрів, для яких є визначальними умови недосягнення, статистичного збігу та перевершення відповідно.

Економічний критерій якості

$$G_E : \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (C_{з.к,i} < C_{з.к,i}^d) \cap \bigcap_{k_{21}}^n \bigcap_{i_{21}}^n (C_{е.к,i} < C_{е.к,i}^d),$$

де  $C_{з.к,i}$  – витрати на забезпечення якості на стадії проектування за  $i$ -м параметром;  $C_{е.к,i}$  – витрати, пов'язані з втратою якості на стадії експлуатації;  $C_{з.к,i}^d$ ,  $C_{е.к,i}^d$  – допустимі значення.

Інтегрована дефектність проекту в аспекті забезпечення надійності параметричного синтезу компонентів

$$P_{деф.п} = 1 - P_{в.з.п} = 1 - P_{\Pi}(G_{\Pi}, G_O, G_H, G_C, G_{\Pi}, G_E).$$



Стадія вхідного контролю представлена підсистемою на рис. 6.

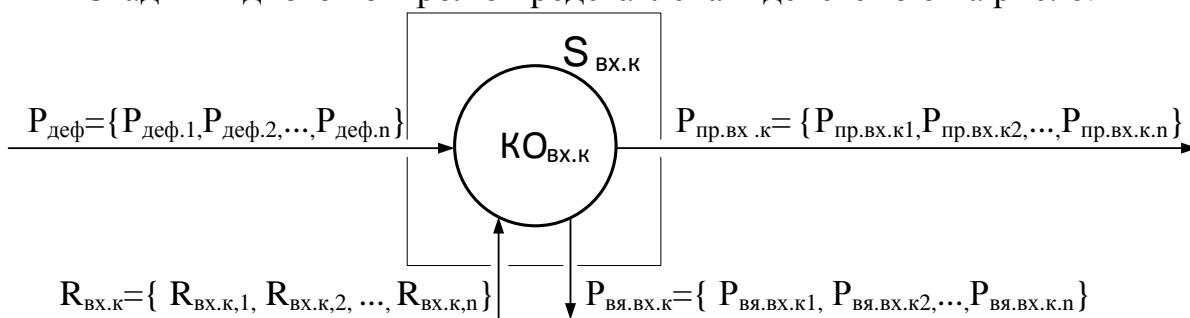


Рис. 6. Підсистема вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів, електрорадіовиробів

Матриці пропуску та виявлення дефектів  $P_{пр.вх.к}$  і  $P_{вя.вх.к}$  під час вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів і електрорадіоелементів (підсистема  $S_{вх.к}$  на рис. 6) є діагональними матрицями вигляду:

$$P_{пр.вх.к} = \text{diag} \left\| P_{пр.вх.к.01}, P_{пр.вх.к.12}, \dots, P_{пр.вх.к.n-1n} \right\| - \text{матриця С,}$$

$$P_{вя.вх.к} = \text{diag} \left\| P_{вя.вх.к.01}, P_{вя.вх.к.12}, \dots, P_{вя.вх.к.n-1n} \right\| - \text{матриця D.}$$

Стадія виробництва, представлена на рис. 7, розглядається як сукупність крокових підсистем технологічних та контрольних процедур.

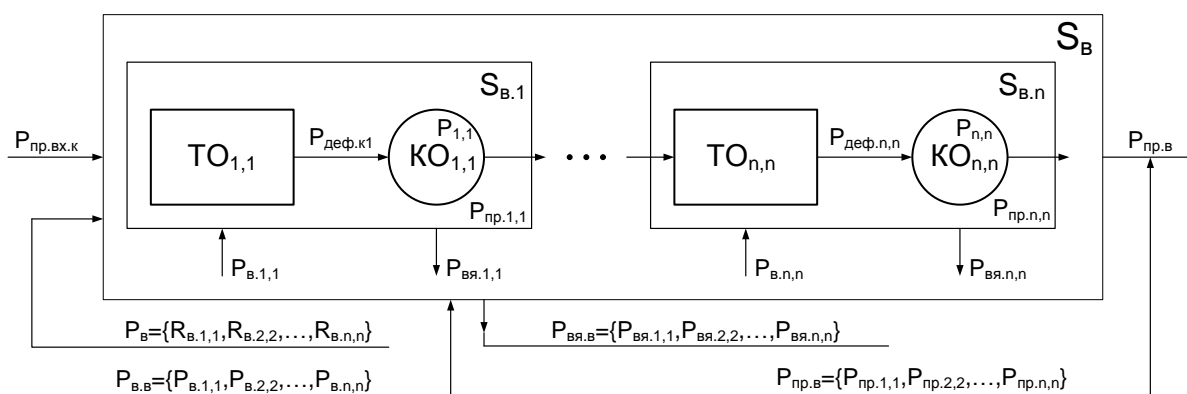


Рис. 7. Крокова підсистема  $S_v$  технологічних ТО та контрольних КО процедур

Наведено результати досліджень процесів виникнення дефектності під час виконання технологічних операцій. Встановлено, що сумарна ймовірність появи дефектів на  $k$ -му кроці технологічного процесу, яку в роботі позначено  $P_{деф.к.к}$ , описується складним функціоналом, аргументами якого є множини парціальних ймовірностей  $P_{пр.к-1,1}$ ,  $P_{пр.к-1,2}$ , ...,  $P_{пр.к-1,k}$  і ймовірності введення дефектів під час виконання  $k$ -ї операції –  $P_{в.к.к}$ , що визначають модель формування дефектності на рис. 8

$$P_{\text{деф.к,к}} = P(P_{\text{пр.к-1,1}}, P_{\text{пр.к-1,2}}, \dots, P_{\text{пр.к-1,к}}; P_{\text{в.к,к}}),$$

де перший індекс означає порядковий номер кроку технологічного процесу, другий – показник виробу, який формується на відповідному кроці. У наведеному функціоналі

$$P_{\text{пр.к-1,1}} = \psi_1(P_{\text{пр.вх.к}}, P_{\text{в.1,1}}, P_{\text{в.2,1}}, \dots, P_{\text{в.к-1,1}}, P_{1,1}, P_{2,1}, \dots, P_{\text{к-1,1}}),$$

$$P_{\text{пр.к-1,2}} = \psi_2(P_{\text{пр.вх.к}}, P_{\text{в.2,2}}, P_{\text{в.3,2}}, \dots, P_{\text{в.к-1,2}}, P_{2,2}, P_{3,2}, \dots, P_{\text{к-1,2}}),$$

.....

$$P_{\text{пр.к-1,к}} = \psi_k(P_{\text{пр.вх.к}}, P_{\text{в.к-1,к}}, P_{\text{к,к}}),$$

де  $P_{\text{в.к,к}}$  – ймовірність вводу дефектів під час виконання к-ї технологічної операції,  $P_{\text{пр.вх.к}}$  – ймовірність пропуску дефектів у разі здійснення вхідного контролю.

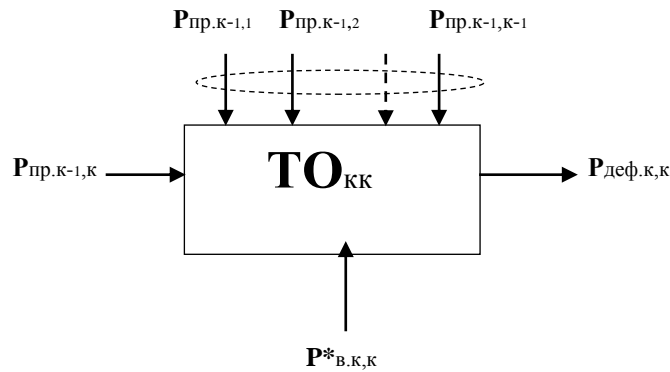


Рис. 8. Модель формування дефектності під час виконання к-ї технологічної операції

Показано, що вплив допущених раніше дефектів на якість виконання к-ї технологічної операції може бути значним і істотно різним. Відзначено, що цей вплив сьогодні вивчений недостатньо як з теоретичного, так і з прикладного боку, що стримує створення наскрізних математичних моделей процесів забезпечення якості продукції в умовах складних за структурою і керованістю сучасних виробництв.

Дефектність  $P_{\text{деф.}(A+M)}$ , яка утворюється на к-му кроці технологічного процесу, розглядається як деяка сума двох складових – дефектності адитивної, поданої ймовірністю  $P_{\text{деф.}(A)}$ , і дефектності мультиплікативної, поданої ймовірністю  $P_{\text{деф.}(M)}$ . На рис. 9 показано структуру дефектності і реальний приклад залежності дефектності гальванічного нарощування міді від дефектності хімічного міднення під час виготовлення друкованих плат комбінованим позитивним методом.

Експериментально-статистичним методом встановлено залежності

$$P_{в.к,к} = \varphi(P_{в.к,к}^*, P_{пр.к-1,i}), \quad i = \overline{1,к},$$

які забезпечують виконання умов:

$$\begin{aligned} P_{в.к,к} &= P_{в.к,к}^* \quad \text{при} \quad P_{пр.к-1,i} = 0, \quad i = \overline{1,к}; \\ P_{в.к,к} &= 0 \quad \text{при} \quad P_{в.к,к}^* = 0, \quad \forall P_{пр.к-1,i} = [0,1]; \\ \lim P_{в.к,к} &= 1 \quad \text{при} \quad \forall P_{пр.к-1,i} = [0,1]; \\ P_{в.к,к}^* &\rightarrow 1. \end{aligned}$$

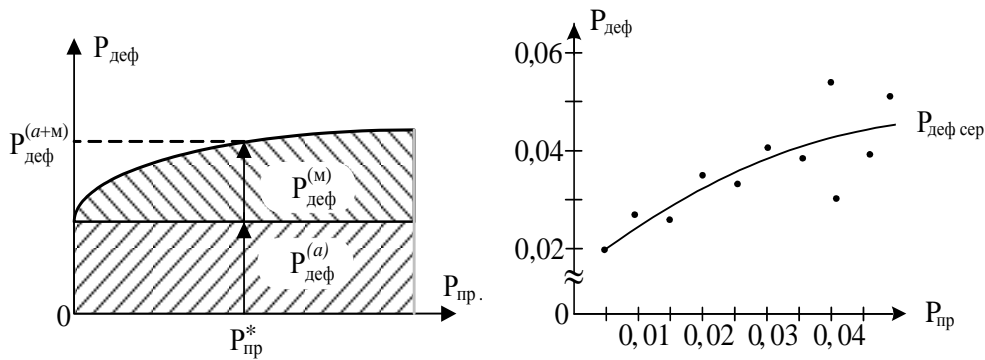


Рис. 9. Структура дефектності і приклад залежності дефектності гальванічного нанесення міді від дефектності хімічного міднення

Один з варіантів математичної моделі ймовірності вводу дефектів під час формування показника якості виробу має вигляд

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

де  $K_a$  – адаптаційний коефіцієнт.

Отримані нові результати експериментальних і теоретичних досліджень у цій галузі знань є внеском у подальший розвиток теорії і практики побудови адекватних математичних моделей процесів формування якості виробів, керування цими процесами під час вирішення завдань оптимізації за критеріями якості відповідно до сучасних вимог.

Запропонована формалізація технологічного процесу зводиться до його зображення структурою, що складається з множин технологічних і контрольних процедур, з'єднаних за певною схемою. На рис. 10 представлені схема кроку технологічного процесу і його формалізоване зображення. Як показано на рис. 10А, к-й крок процесу становить собою підсистему  $S_{кк}$  у складі технологічної операції  $ТО_{кк}$ , під час виконання якої формується якість виробу стосовно к-го параметра, і контрольної операції  $КО_{кк}$ , під час виконання якої оцінюється якість і виявляються допущені дефекти.

Внаслідок проведених досліджень встановлено, що вплив раніше допущених дефектів на якість виконання подальших технологічних операцій, який спричинює явище емергентності, може бути значним та істотно різним. Схему формування дефектності на рівні підсистем  $S_{к-1}$  і  $S_{к}$  зображено на

рис. 11.

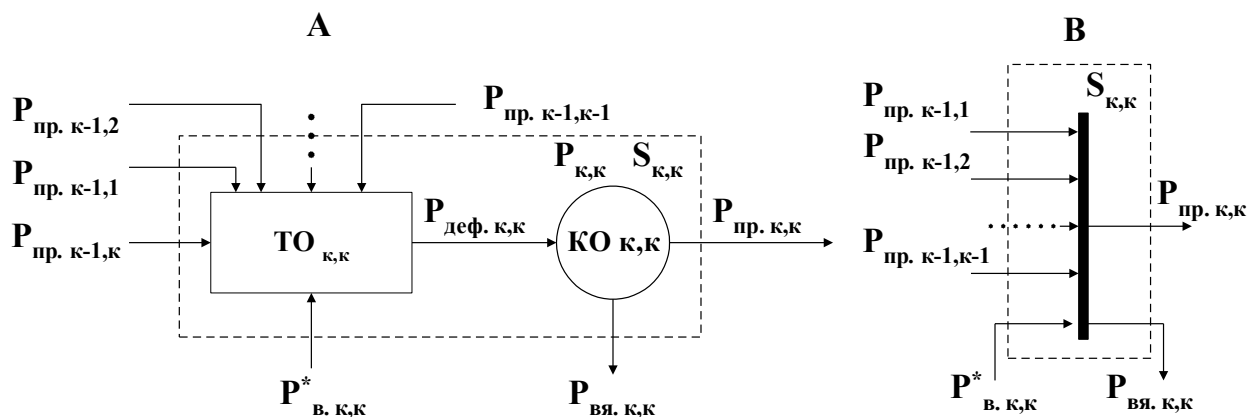


Рис. 10. Схема к-го кроку технологічного процесу А та його формалізоване зображення В

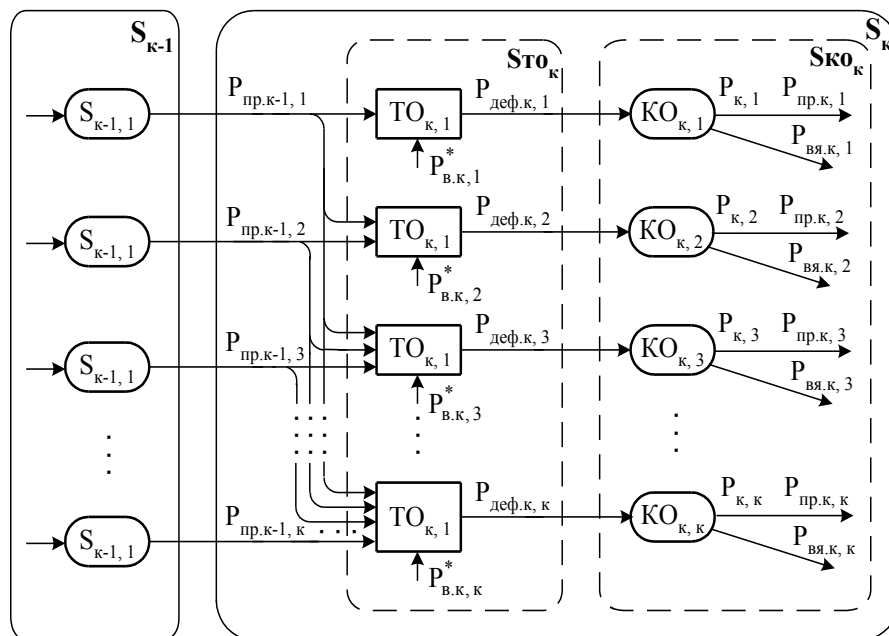


Рис. 11. Схема формування дефектності на рівні підсистем  $S_{k-1}$  і  $S_k$

Повний n-кроковий процес описано матрицями ймовірностей пропуску і виявлення дефектів  $P_{пр.в}$  і  $P_{вя.в}$ , які мають верхньотрикутну структуру:

$$P_{\text{пр.в}} = \begin{pmatrix} P_{\text{пр.в11}} & P_{\text{пр.в21}} & P_{\text{пр.в31}} & \cdots & P_{\text{пр.вп1}} \\ 0 & P_{\text{пр.в22}} & P_{\text{пр.в32}} & \cdots & P_{\text{пр.вп2}} \\ 0 & 0 & P_{\text{пр.в33}} & \cdots & P_{\text{пр.вп3}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P_{\text{пр.впп}} \end{pmatrix} \text{ – матриця E,}$$

$$P_{\text{вя.в}} = \begin{pmatrix} P_{\text{вя.в11}} & P_{\text{вя.в21}} & P_{\text{вя.в31}} & \cdots & P_{\text{вя.вп1}} \\ 0 & P_{\text{вя.в22}} & P_{\text{вя.в32}} & \cdots & P_{\text{вя.вп2}} \\ 0 & 0 & P_{\text{вя.в33}} & \cdots & P_{\text{вя.вп3}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P_{\text{вя.впп}} \end{pmatrix} \text{ – матриця F.}$$

Отже, матриці A, C, E та B, D, F можна розглядати як блоки синтезованих матриць ймовірностей пропуску дефектів на стадіях проектування, вхідного контролю та під час виробництва апаратури  $P_{\text{пр}}$  (матриця M) і матриць ймовірностей виявлення дефектів на всіх стадіях життєвого циклу –  $P_{\text{вя}}$  (матриця N):

$$M = A + C + E, \quad N = B + D + F.$$

У роботі наведено синтезовані матриці M і N, що охоплюють усі стадії життєвого циклу.

Вхідними некерованими параметрами підсистеми  $S_{k,k}$  є потоки дефектів, пропущених з попередніх кроків технологічного процесу, які в роботі оцінюються ймовірностями пропуску дефектів  $P_{\text{пр.к-1,1}}$ ;  $P_{\text{пр.к-1,2}}$ ; ...;  $P_{\text{пр.к-1,к-1}}$ ;  $P_{\text{пр.к-1,к}}$ . Вхідним керованим параметром підсистеми є потік дефектів, що вводяться у виріб під час виконання к-ї технологічної процедури. Він оцінюється ймовірністю  $P_{\text{в.к,к}}^*$ . Вихідним параметром підсистеми є потік пропущених дефектів з ймовірністю  $P_{\text{пр.к,к}}$  і потік виявлених дефектів з ймовірністю  $P_{\text{вя.к,к}}$ . Параметром керування контрольною процедурою підсистеми  $S_{k,k}$  є показник глибини контролю  $\alpha_{k,k}$ , який визначає безпомилковість оцінки якості виробів і виявлення дефектів з ймовірністю  $P_{k,k}$ . Проміжним параметром підсистеми є потік дефектів після виконання технологічної процедури  $TO_{k,k}$ . Він оцінюється ймовірністю наявності дефектів –  $P_{\text{деф.к,к}}$ .

У загальному випадку зазначені параметри підсистеми  $S_{k,k}$  є функціонали:

$$\begin{aligned} P_{\text{в.к,к}}^* &= P(P_{\text{в.к,к}}^*, P_{\text{пр.к-1,1}}, P_{\text{пр.к-1,2}}, \dots, P_{\text{пр.к-1,к-1}}); \\ P_{\text{деф.к,к}} &= \Phi(P_{\text{пр.к-1,к}}, \dots, P_{\text{в.к,к}}); \\ P_{k,k} &= F(\alpha_{k,k}); \\ P_{\text{пр.к,к}} &= \Psi(P_{\text{деф.к,к}}, P_{k,k}); \end{aligned}$$

$$P_{\text{вя.к,к}} = \theta(P_{\text{деф.к,к}}; P_{\text{к,к}}),$$

які пов'язані між собою рекурентними залежностями:

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

$$P_{\text{вя.к,к}} = P_{\text{деф.к,к}} \cdot P_{\text{к,к}};$$

$$P_{\text{пр.к,к}} = P_{\text{деф.к,к}} \cdot (1 - P_{\text{к,к}}).$$

У дисертації розглянуто три типові варіанти структури процесів забезпечення якості РЕА, які подані схемами послідовного, паралельного та комбінованого з'єднання підсистем. Для прикладу схему послідовного процесу наведено на рис. 12.

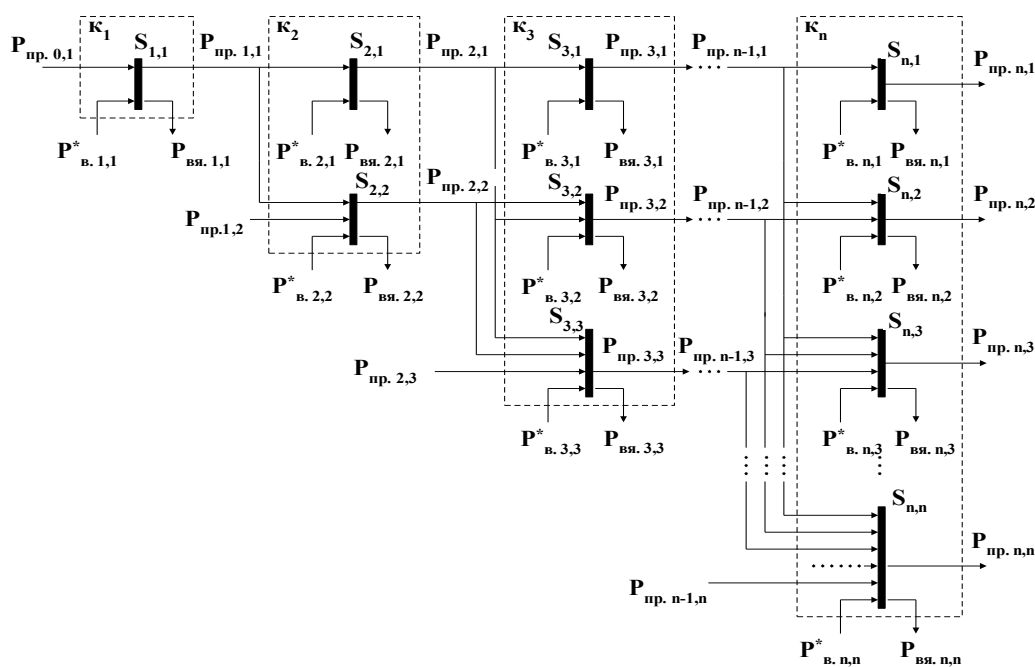


Рис. 12. Схема послідовного процесу

Залежно від кількості показників якості виробів кожний крок об'єднує відповідну кількість підсистем їхнього формування та контролю. На k-му кроці підсистема S\_{k,k} формує і контролює k-й параметр. Водночас підсистеми S\_{к,к-1}, S\_{к,к-2}, ..., S\_{к,1} можуть ущільнювати або розріджувати потоки дефектів стосовно параметрів, сформованих на попередніх кроках. Тому ймовірність введення дефектів на k-му кроці технологічного процесу треба розглядати як деяку суму їх парціальних уведень з ймовірностями P\_{в.к,1}, P\_{в.к,2}, ..., P\_{в.к,к-1}.

Границі поля значущості парціального введення дефектів у структурному полі формування k-го параметра виробу можуть залежати не лише від k-го параметра, а й від сукупності k, k-1, k-2 ... параметрів, тобто можуть охоплювати параметри, сформовані на попередніх кроках. До того ж

$$P_{\text{в.к,к}} > P_{\text{в.к,к-1}} > \dots > P_{\text{в.к,2}} > P_{\text{в.к,1}}.$$

Ймовірності, окрім  $P_{в.к.1}$ , є ймовірностями умовними:  $P_{в.к,i} = P_{в.к,к} \cdot P_{к(i)}$ ,  $i = \overline{2,к}$ . Отримані експериментально статистичним способом, ці залежності наведені в роботі.

Математичні моделі дефектності  $n$ -крокового технологічного процесу визначаються системами рівнянь моделі пропуску дефектів з останнього кроку технологічного процесу та моделі виявлення дефектів на останньому кроці технологічного процесу:

$$P_{пр.н,1} = \langle [P_{пр.н-2,1} + (1 - P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}](1 - P_{н-1,1}) + \{1 - [P_{пр.н-2,1} + (1 - P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}] \cdot (1 - P_{н-1,1})\} P_{в.н,1} \rangle (1 - P_{н,1});$$

$$P_{пр.н,2} = \langle [P_{пр.н-2,2} + (1 - P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}](1 - P_{н-1,2}) + \{1 - [P_{пр.н-2,2} + (1 - P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}] \cdot (1 - P_{н-1,2})\} P_{в.н,2} \rangle (1 - P_{н,2});$$

$$\dots$$

$$P_{пр.н,n} = [P_{пр.н-1,n} + (1 - P_{пр.н-1,n})P_{в.н,n}](1 - P_{н,n});$$

$$P_{вя.н,1} = \langle [P_{пр.н-2,1} + (1 - P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}](1 - P_{н-1,1}) + \{1 - [P_{пр.н-2,1} + (1 - P_{пр.н-2,1})P_{в.н-1,1}] \cdot (1 - P_{н-1,1})\} P_{в.н,1} \rangle P_{н,1};$$

$$P_{вя.н,2} = \langle [P_{пр.н-2,2} + (1 - P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}](1 - P_{н-1,2}) + \{1 - [P_{пр.н-2,2} + (1 - P_{пр.н-2,2})P_{в.н-1,2}] \cdot (1 - P_{н-1,2})\} P_{в.н,2} \rangle P_{н,2};$$

$$\dots$$

$$P_{вя.н,n} = [P_{пр.н-1,n} + (1 - P_{пр.н-1,n})P_{в.н,n}]P_{н,n}.$$

Загальні ймовірності пропуску та виявлення дефектів на  $n$ -му кроці технологічного процесу визначають сумою ймовірностей сумісних подій. Запропоновані математичні моделі дефектності є універсальними, придатними для процесів будь-якої складності.

Математичні моделі дефектності багатокрокових технологічних процесів з причин рекурентності є громіздкими аналітичними залежностями, що робить їх малопридатними для розв'язання оптимізаційних задач, оцінювання рівня якості продукції на різних стадіях виробництва і витрат, пов'язаних з браком. У зв'язку із цим запропоновано компактне матричне зображення цих моделей:

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

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

Розглянута стадія експлуатації радіоелектронної апаратури. Вхідними параметрами підсистеми експлуатації  $S_E$  на рис. 13 є ймовірності пропуску до неї проектних, виробничих і ресурсних дефектів, а також дефектів, введених під час виконання експлуатаційних процедур, які позначено стовпцевими матрицями  $P_{пр.н} = [P_{пр.н,i}]^T$ ,  $P_R = [P_{R,j}]^T$ ,  $P_{в.е} = [P_{в.е,к}]^T$ ,  $i = \overline{1,n_{пр}}$ ,  $j = \overline{1,n_R}$ ,  $к = \overline{1,n_в}$ .

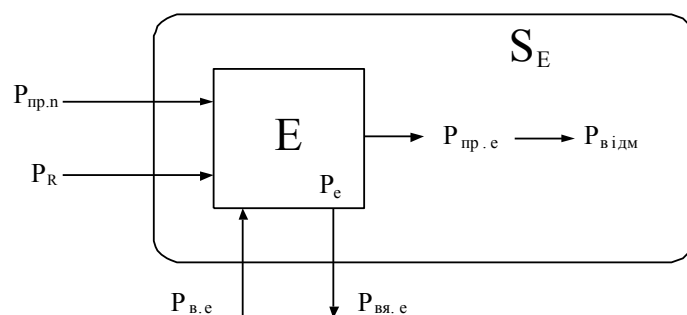


Рис. 13. Підсистема експлуатації

Вихідними параметрами є ймовірності виявлення і пропуску дефектів, що подані матрицями

$$P_{вя.е} = [P_{вя.е,i}]^T, i = \overline{1, n_{вя}}; \quad P_{пр.е} = [P_{пр.е,j}]^T, j = \overline{1, n_{пр.е}},$$

де  $\varepsilon$  – символ відображення множини елементів матриці  $P_{пр.е}$  в множині елементів матриці відмов  $P_{відм}$ .

У роботі показано, що наведені моделі використовують під час моделювання виробничих витрат, які зумовлені комплексом робіт із забезпечення якості та надійності виробів на всіх стадіях життєвого циклу.

У четвертому розділі наведено елементи розробленої теорії потоків виробничих дефектів, які виникають під час виготовлення РЕА і визначають рівень її якості та надійності. У результаті проведених досліджень встановлено, що потоки виробничих дефектів здебільшого не є ординарними і характеризуються істотною післядією. Вона виявляється у значному впливі дефектності, допущеної під час виконання попередніх технологічних процедур, на формування наступних показників якості виробів. Ці процеси сьогодні достатньо не вивчені і не формалізовані. Тому класична теорія марковських процесів для аналізу таких потоків, яку часто намагаються використовувати на практиці, виявляється малоприсадною. Запропонований у дисертації розвиток теорії потоків виробничих дефектів охоплює питання їх виникнення, ущільнення під час виконання технологічних процедур і розрідження у разі здійснення контролю. Результати досліджень узагальнені відповідними твердженнями.

Об'єктами досліджень стали потоки відмов, що виникають внаслідок існування потоків виробничих дефектів. У роботі доведено можливість кількісного оцінювання залежності параметрів цих потоків  $\omega$  і  $\omega^{\partial}$  у вигляді коефіцієнта перетворення потоків



$$\varepsilon = \frac{\omega}{\omega^\partial} = \frac{d \left\{ \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t) \right\}}{d \left\{ \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M m_j^\partial(\tau) \right\}}$$

де  $N$  – обсяг партії виробів;  $M$  – кількість дефектних виробів;  $t$  – час експлуатації;  $\tau$  – час виготовлення технологічної партії виробів. Формально таке перетворення, представлене на рис. 14, розглядається як відображення певної підмножини виробничих дефектів  $\Omega^\partial = \{\omega_1^\partial, \omega_2^\partial, \dots, \omega_n^\partial\}$ , що належить множині всіх допущених дефектів  $\Omega^{\partial*}$ , на множині відмов  $\Omega_1 = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ .

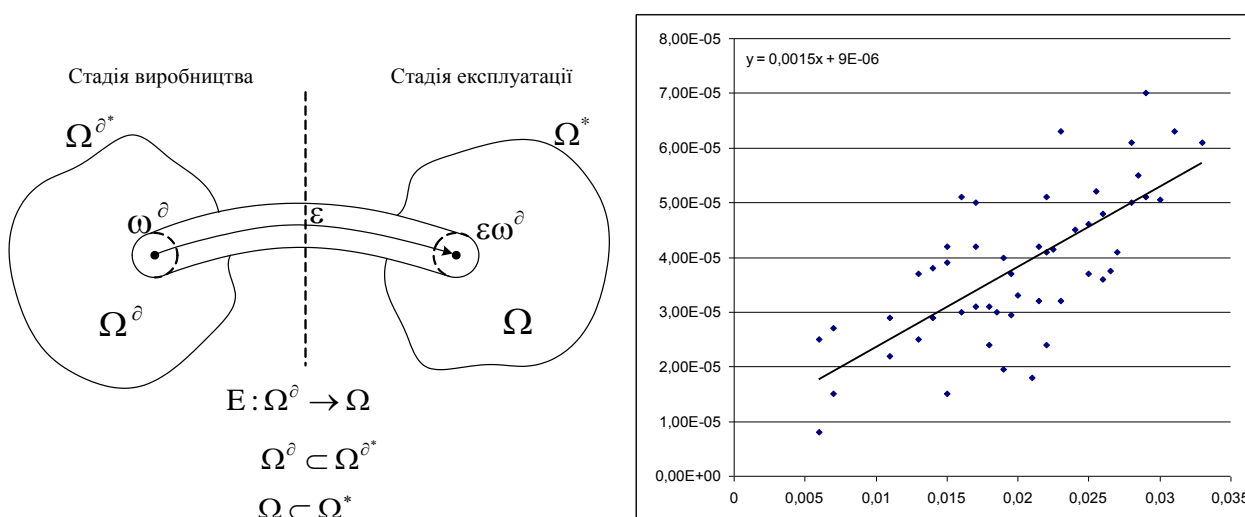


Рис. 14. Відображення множини дефектів  $\Omega^\partial$  у множину відмов  $\Omega$  і реальна залежність  $\omega = \psi(\omega^\partial)$  для друкованих плат, виготовлених комбінованим адитивним методом

Виконані експериментальні дослідження підтвердили правомірність і можливість такого підходу до оцінювання показників надійності виробів за показниками потоків виробничих дефектів на різних стадіях технологічного процесу, проілюстровано на рис. 15.

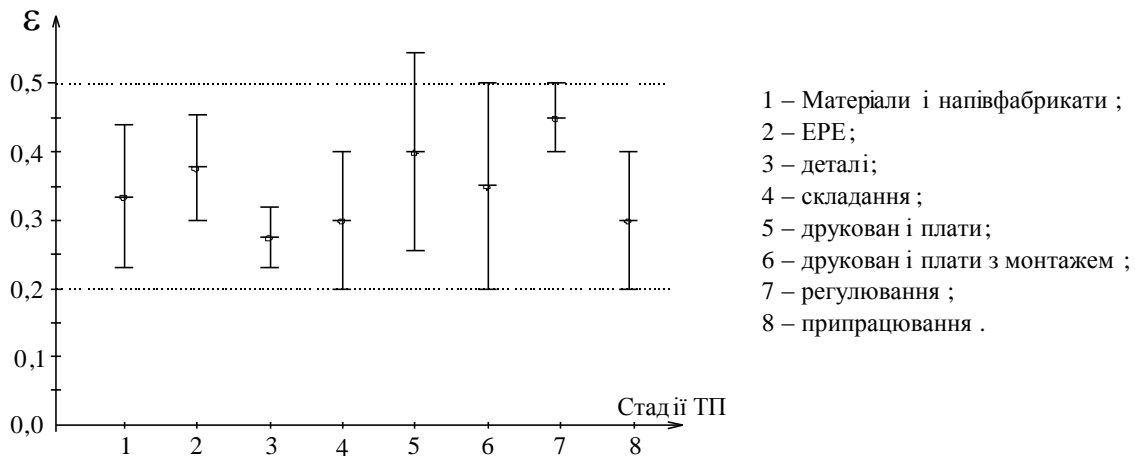


Рис. 15. Усереднені і розмахові значення коефіцієнта перетворення потоків  $\varepsilon$  на основних стадіях виготовлення частотомірів групи Ч1 і осцилографів групи С1

Параметр потоку відмов виробів  $\omega(t)$  з причин виробничих дефектів визначаємо з умови

$$1 - \left[ 1 - \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n (1 - P_{np,j,i}) \right] \cdot [1 - P(t)] = e^{-\int_0^t \omega(t) dt},$$

де  $N$  – кількість технологічних процесів; кожний  $j$ -й процес складається з  $n$  технологічних операцій.

Параметр потоку дефектів  $\omega_c^{\partial}$ , які виникають у процесі виробництва, зображаємо сумою потоків, які належать до кожного параметра.

Кожен крок технологічного процесу характеризується потоком дефектів, які вводяться під час виконання  $i$ -ї технологічної процедури на  $k$ -му кроці (параметр  $\omega_{в,k,i}$ ), і потоками пропущених дефектів з попередніх кроків (параметр  $\omega_{пр,k-1,i}$ ). Математична модель сумарного потоку дефектів має вигляд

$$\begin{aligned} \omega_c^{\partial} = & \{[(\omega_{пр,0,1}^{\partial} + \omega_{в,1,1}^{\partial})(1 - P_{1,1}) + \omega_{в,2,1}^{\partial}(1 - P_{2,1}) + \dots + \omega_{вп,1}^{\partial}](1 - P_{п,1}) + \\ & + [(\omega_{пр,1,2}^{\partial} + \omega_{в,2,2}^{\partial})(1 - P_{2,2}) + \omega_{в,3,2}^{\partial}(1 - P_{3,2}) + \dots + \omega_{вп,2}^{\partial}](1 - P_{п,2}) + \dots + \\ & + [(\omega_{пр,п-2,n-1}^{\partial} + \omega_{в,n-1,n-1}^{\partial})(1 - P_{n-1,n-1}) + \omega_{в,n,n-1}^{\partial}](1 - P_{п,n-1}) + \\ & + (\omega_{пр,п-1,n}^{\partial} + \omega_{в,n,n}^{\partial})(1 - P_{п,n}). \end{aligned}$$

Розвинуті в роботі основи теорії виникнення і перетворення потоків виробничих дефектів на основних стадіях технологічного процесу виготовлення РЕА, сформульовані твердження і висновки, що засвідчують їхню специфічну природу, запропоновані методи кількісного оцінювання їх ущільнення та розрідження під дією технологічних і контрольних процедур є основою методології моделювання потоків виробничих дефектів. При цьому

використовуються рекурентні залежності параметрів потоків на кожній стадії виробництва від параметрів парціальних потоків дефектів, що утворюються під час виконання попередніх процедур. Такий підхід, на відміну від відомих, дає змогу створювати математичні моделі потоків дефектів технологічних процесів практично без обмежень на їх складність за кількістю технологічних та контрольних процедур, а також за складністю їхньої загальної структури. Запропонована концепція моделювання та прогнозування безвідмовності виробів на основі поточної інформації про рівень дефектності під час виробництва ґрунтується на встановлених залежностях потоків відмов апаратури від потоків виробничих дефектів. Її основна відмінність полягає у можливості кількісного оцінювання безвідмовності не традиційно, за кінцевими характеристиками якості виробів, а послідовно на всіх стадіях технологічного процесу. Це дає змогу оперативно здійснювати його корекцію і реалізувати принцип комплексного управління для забезпечення випуску виробів з гарантованими надійнісними характеристиками за раціонального використання всіх видів залучених ресурсів і скорочення сумарних виробничих витрат.

**П'ятий розділ** присвячений математичному моделюванню процесів контролю якості РЕА. На основі результатів аналізу стану кваліметрії і можливостей сучасного моніторингу процесів забезпечення якості у радіоапаратобудуванні встановлено: фактором, що стримує вирішення цієї проблеми, є недостатньо розвинуті теорія, методологія і методи системного моделювання і керування формуванням і контролем якості виробів упродовж їх повного життєвого циклу. У розділі наведено аналіз розроблених математичних моделей локальних процедур і наскрізних моделей контролю повних технологічних процесів виробництва РЕА. На відміну від теперішніх, вони побудовані на ймовірнісних показниках їх ефективності – ймовірностях правильного контролю, виявлення та пропуску дефектних одиниць продукції, показниках глибини контролю, показниках ефективності контролю ненормованих параметрів і ефективності комбінованих процедур. У розділі викладено основи теорії оцінювання якості виробів з урахуванням спроможності кожного варіанта контролю виявляти дефекти, допущені на попередніх кроках. Запропоновані математичні моделі забезпечують можливість розширення номенклатури і поля варіації їх параметрів при автоматизованому керуванні процесами за техніко-економічними, організаційними, ресурсними та іншими критеріями.

**У шостому розділі** досліджено формування сумарних витрат  $C_{\Sigma}$  на забезпечення якості виробів на всіх стадіях життєвого циклу, до складу яких входять витрати на проектування  $C_{\Pi}$ , виробництво  $C_{\text{в}}$  і експлуатацію –  $C_{\text{е}}$ :

$$C_{\Sigma} = C_{\Pi} + C_{\text{в}} + C_{\text{е}}.$$

У роботі наведено особливості моделювання витрат під час проектування, виробництва і експлуатації РЕА.

З урахуванням матричної формалізації множин аргументів функції сумарних витрат формула  $C_{\Sigma}$  набуває вигляду:

$$C_{\Sigma}=(K_{\Pi}, C_{\Pi})+(K_{В}, C_{В})+(K_{\text{кон}}, \mathbf{B}, \theta, C_{\text{кон}})+(K_{\text{к}}, C_{\text{к}}, P_{\text{вя}})+(K_{\text{е}}, C_{\text{е}}, P_{\text{вя.е}}),$$

де  $C_{\Pi}$ ,  $C_{В}$ ,  $C_{\text{кон}}$ ,  $C_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{е}}$  – матриці середньостатистичних (базових) значень витрат на формування якості під час проектування, виробництва, проведення контролю витрат, пов'язаних із забракуванням виробів під час контролю якості, а також витрат гарантійне обслуговування апаратури в процесі експлуатації;  $K_{\Pi}$ ,  $K_{В}$ ,  $K_{\text{кон}}$ ,  $K_{\text{к}}$ ,  $K_{\text{е}}$  – матриці коефіцієнтів варіації витрат на проектування, контроль якості, усунення браку, усунення дефектів на стадії виробництва та експлуатації апаратури;  $\theta$  – матриця показників глибини контролю при оцінці якості виробів в процесі виробництва;  $\mathbf{B}$  – матриця булевих коефіцієнтів;  $P_{\text{вя}}$  – матриця ймовірності виявлення дефектів під час контролю якості в процесі виробництва;  $P_{\text{вя.е}}$  – матриця ймовірності виявлення дефектів у процесі експлуатації РЕА.

У наведеній моделі сумарних витрат  $C_{\Sigma}$  дужками позначено скалярні добутки відповідних матриць, визначати які запропоновано за такою загальною схемою:

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

де

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

Таким чином, мінімізація витрат  $C_{\Sigma}$  за заданих значень елементів булевої матриці  $\mathbf{B}$  відбувається за допомогою обчислення оптимальних значень показників  $\theta_{k,i}$ ,  $P_{в.к,i}$ ,  $P_{к,i}$ ,  $P_{\text{деф}}$ ,  $P_{\text{еR}}$  та інших з урахуванням технічних та економічних обмежень.

У загальному випадку процедуру оптимізації процесу забезпечення якості апаратури записуємо як розв'язок двох варіантів задачі:

$$\text{варіант 1} - \begin{cases} P(Q) = \max P(Q), \\ C(Q) < C_0, \end{cases}$$

де  $P(Q)$  – формалізований показник (критерій) якості системи;  $C(Q)$  – показник сумарних витрат;  $C_0$  – його допустимий рівень;

$$\text{варіант 2} - \begin{cases} C(Q) = \min C(Q), \\ P(Q) > P_0, \end{cases}$$

де  $P_0$  – заданий рівень показника якості системи.

Приклад оптимізації процесу за критерієм мінімуму сумарних витрат із використанням параметрів оптимізації  $\theta$ ,  $P_{\text{деф}}$ ,  $P_{в}$ ,  $P_{\text{вя}}$  та інших з визначенням оптимальних значень  $\{\theta, P_{\text{деф}}, P_{в}^*, P_{\text{вя}}, \dots\}_{\text{opt}} = \text{argmin } C_{\Sigma}$  наведено на рис. 16.

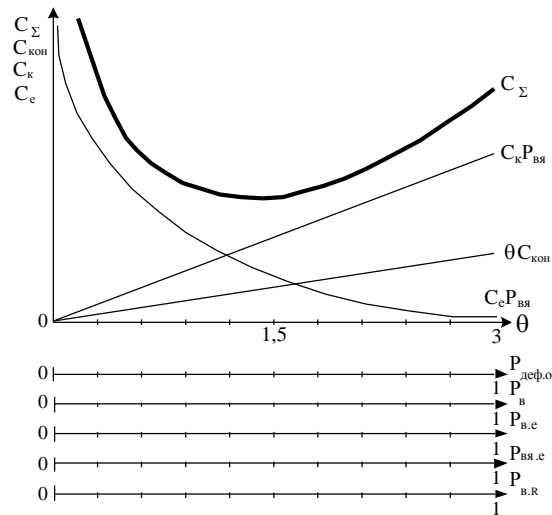


Рис. 16. Оптимізація процесу за критерієм мінімуму сумарних витрат  $C_{\Sigma}$

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

Перевагою запропонованих підходів до наскрізного ймовірнісного моделювання і автоматизованого керування процесами забезпечення якості виробів і витрат, пов'язаних з їхнім виконанням, є те, що вони не мають обмежень щодо складності структур і особливостей фізичної суті окремих технологічних процедур, з яких складаються ці процеси. Запропонований математичний апарат з використанням універсальних критеріїв якості у вигляді ймовірностей введення, виявлення та пропуску дефектів дає змогу моделювати і провадити автоматизоване керування процесами виробництва широкого класу технічних об'єктів, виконувати процедури декомпозиції і синтезу систем, розв'язувати задачі комплексної оптимізації.

У **сьомому розділі** приведено програмно-методичний комплекс для вирішення задач моделювання, аналізу і оптимізації процесів забезпечення якості радіоелектронної апаратури шляхом їх автоматизованого керування. Приведено аналіз ефективності комплексу і рекомендації по його використанню.

## ВИСНОВКИ

Науковим результатом дисертаційної роботи є вирішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності автоматизованого керування

процесами забезпечення якості РЕА за техніко-економічними критеріями. Для цього використано запропоновані наскрізні математичні моделі формування і підтримки якості на всіх стадіях життєвого циклу. Основні результати дисертаційної роботи і нові наукові положення:

1. Проведений аналіз проблеми забезпечення якості та надійності техніки засвідчує, що традиційні методи, які базуються на локальному вирішенні задач забезпечення заданих техніко-економічних показників виробів, не задовольняють вимог сьогодення. У роботі доведено, що комплексна оптимізація процесів проектування, виробництва та експлуатації радіоелектронних пристроїв за критеріями їхньої якості та сумарних витрат з використанням наскрізних математичних моделей дає змогу шляхом автоматизованого керування цими процесами підвищити якість апаратури до потенційно можливого рівня при раціональному використанні ресурсів і мінімальній собівартості і тому є перспективним напрямом вирішення проблеми забезпечення якості цього виду техніки.

2. Процеси створення РЕА запропоновано формалізувати відповідними процесами забезпечення якості з використанням єдиного універсального критерію якості для всіх стадій проектування і виробництва. Таким критерієм вибрано ймовірнісний показник рівня дефектності, інваріантність якого до фізичної сутності параметрів апаратури і процесів їх формування шляхом проведення технологічних процедур дає змогу реалізувати ідею їх наскрізного моделювання з наскрізною оптимізацією. Гнучкість запропонованого підходу забезпечує отримання математичних моделей вказаних процесів без будь-яких структурних параметричних обмежень.

3. Засвідчила свою дієздатність запропонована ймовірнісна методологія моделювання і оцінки ефективності процедур формування та контролю якості з використанням функціональних та економічних критеріїв у вигляді ймовірності виконання завдання на стадіях системотехнічного, схемотехнічного, конструкторського та технологічного проектування, а також на стадіях виробництва та експлуатації апаратури і оцінки сумарних витрат для забезпечення їх якості та надійності. Цю методологію покладено в основу вирішення множини задач комплексної оптимізації процесів створення нової техніки в умовах апріорної невизначеності. Запропоновані критерії відрізняються від відомих однорідною розмірністю на всіх стадіях вказаних процесів, що дає змогу реалізувати ідею їх наскрізного моделювання і комплексної оптимізації.

4. Запропоновано принципи формалізації процесів проектування, виробництва та експлуатації апаратури, в основу яких покладено елементи системного аналізу і синтезу структур з відображенням їх взаємозалежності та керованості. Наведено результати теоретичних досліджень в напрямі моделювання процесів формування дефектності апаратури на всіх стадіях її життєвого циклу. Доведено, що запропонована методика аналізу і кількісної оцінки процесів формування дефектності як суми адитивної і мультиплікативної складових з урахуванням явища емергентності систем забезпечує підвищення адекватності моделей і точності результатів оптимізації.

5. Розроблені теоретичні основи моделювання систем контролю якості та прогнозування безвідмовності у виробництві радіоелектронної апаратури. Доведено, що відмови апаратури в процесі експлуатації є результатом не тільки недоліків процесів її проектування і виготовлення, а також і результатом недосконалої контролю, як процедури зменшення невизначеності під час оцінки властивостей виробів. Запропоновано оцінку якості виробів провадити як за нормованими, так і ненормованими параметрами, які характеризуються достатньою інформативністю. Таким чином, параметри контрольних процедур можна використовувати як параметри керування і оптимізації всього технологічного процесу, що забезпечує підвищення ефективності контролю загалом.

6. Доведено, що розвинута концепція оцінки надійності виробів за рівнем дефектності, яка базується на встановлених залежностях потоків відмов готових виробів від потоків виробничих дефектів на всіх стадіях технологічного процесу, забезпечує можливість оцінювання і прогнозування надійності в процесі виготовлення виробів, а не традиційно після його завершення. Набула подальшого розвитку теорія формування і перетворення потоків виробничих дефектів у потоки відмов, з використанням якої стало можливим нормування вимог до технологічних і контрольних процедур і технологічних процесів загалом виконання яких забезпечує і гарантує заданий рівень надійності виробів. При цьому стає можливою оперативна локальна оптимізація окремих найбільш впливових стадій виробництва в межах глобального завдання комплексної оптимізації всього технологічного процесу.

7. Розроблені методи моделювання процесів проектування, виробництва та експлуатації апаратури дають змогу провадити формалізовану постановку задачі визначення оптимальних параметрів цих процесів за допомогою двох оригінальних ймовірнісних оптимізаційних моделей. Використання однієї з них як цільової функції, а другої як обмеження відкриває можливість вирішувати задачі оптимізації або у плані забезпечення заданого рівня якості за мінімуму сумарних витрат, або у плані забезпечення максимально можливої якості за допустимих витрат залежно від призначення виробу та інших апріорних умов.

8. Розроблено програмно-методичний комплекс для діалогового розв'язку задач моделювання, аналізу та оптимізації шляхом автоматизованого керування технологічними процесами виготовлення РЕА.

9. Перевірка розроблених методів, алгоритмів і програм забезпечення якості радіоелектронної апаратури шляхом комплексної оптимізації процесів її створення і експлуатації підтвердили перспективність запропонованої концепції.

10. Розроблені моделі та методи застосовано при вирішенні практичних завдань забезпечення якості продукції на Запорізькому ДП «Радіоприлад», на науково-виробничому комплексі «ІСКРА» (м. Запоріжжя), у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті, а також впроваджено в навчальний процес на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бобало Ю. Я. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури: [монографія] / Бобало Ю. Я., Кіселичник М. Д., Недоступ Л. А.; за ред. Л. А. Недоступа. – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1996. – 167 с.

*Здобувачу належить розвиток системного підходу до забезпечення якості радіоелектронних пристроїв шляхом оптимізації цього процесу упродовж повного життєвого циклу з обґрунтуванням використання єдиного універсального показника якості.*

2. Бобало Ю. Я. Про функціонування відмовостійких адаптивних радіоелектронних систем / Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник // Вісник Львівського політехнічного інституту. Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв. – Львів, 1991. – № 254. – С. 5–7.

*Здобувачем розроблені концептуальні питання забезпечення функціонування відмовостійких адаптивних радіоелектронних пристроїв.*

3. Бобало Ю. Я. Комплексная оптимизация процессов разработки и производства средств связи и устройств радиотехники по критериям качества и суммарных затрат / Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочий, М. Д. Кіселичник, Б. А. Мандзий, Л. А. Недоступ // Электросвязь. – 1994. – № 2. – С. 27–28.

*Здобувачем розроблена концепція комплексної оптимізації процесу створення і використання нової техніки на основі наскрізного моделювання.*

4. Бобало Ю. Дослідження залежності надійності виробів від показників якості технологічних процесів / М. Кіселичник, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Теорія і проектування напівпровідникових і радіоелектронних пристроїв. – 1997. – № 326. – С. 44–47.

*Здобувачу належить розвиток напрямку прогнозування надійності виробів за результатами оцінювання якості технологічних процесів на всіх стадіях виробництва*

5. Бобало Ю. Я. Система ОПТАН: концепция, проблемы, перспективы / Л. А. Недоступ, Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник, Г. М. Васьків // Электросвязь. – 1997. – № 2. – С. 10–12.

*Здобувачеві належить розроблення концепції і теоретичне обґрунтування елементів системи ОПТАН.*

6. Бобало Ю. Моделирование дефектности процессов последовательной структуры / Л. Недоступ, М. Кіселичник, Ю. Бобало // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas. – 1997. – № 1 (10). – С. 80–83.

*Особистим науковим внеском здобувача є запропонований показник дефектності як інтегральний показник якості РЕА.*

7. Бобало Ю. Я. Дослідження деяких моделей квазінормальних розподілів параметрів РЕА / Л. А. Недоступ, О. В. Лазько, Ю. Я. Бобало // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1998. – № 352. – С. 3–8.



*Особистим науковим внеском здобувача є дослідження і моделювання квазінормальних розподілів параметрів РЕА,*

8. Bobalo Y. Modelling of the distribution of product parameters using Gram-Charlie and Edgeworth series / L. Nedostup, O. Lazko, Y. Bobalo // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering = Электроника и электротехника. – Каунас. 1999. – № 4 (22). – P. 53–56.

*Здобувач дослідив нерегулярність рядів Грама-Шарльє і визначив обмеження їх використання у якості математичних моделей розподілів параметрів РЕА.*

9. Бобало Ю. Питання теорії перетворення потоків при проведенні технологічних і контрольних процедур / Л. Недоступ, М. Кіселичник, Ю. Бобало // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1999. – № 367. – С. 172–176.

*Здобувачем розроблені основи теорії перетворення потоків дефектів при проведенні технологічних процедур в умовах серійного виробництва РЕА.*

10. Бобало Ю. Моделювання розподілів рядами Грама-Шарльє та їх застосування в технологічних САПР / О. Лазько, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2000. – № 387. – С. 59–65.

*Здобувач розробив методологію моделювання розподілів параметрів рядами Грама-Шарльє та їх застосування у технологічних САПР.*

11. Бобало Ю. Оцінка полів розсіювання параметрів радіоелектронних пристроїв при їх квазінормальних розподілах / О. Лазько, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2000. – № 399. – С. 174–180.

*Здобувачем досліджені поля розсіювання параметрів радіоелектронних пристроїв при їх квазінормальних розподілах.*

12. Бобало Ю. Оцінка безвідмовності сумісної роботи компонентів радіоелектронних пристроїв / О. Лазько, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2001. – № 415. – С. 204–209.

*Здобувач розвив методи оцінювання безвідмовності сумісної роботи компонентів з урахуванням полів розсіювання стикувальних параметрів.*

13. Бобало Ю. Я. До питання надійності виробів в умовах серійного виробництва / М. Д. Кіселичник, Л. А. Недоступ, Ю. Я. Бобало // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 418. – С. 72–77.

*Здобувачем розроблені концепції оперативного оцінювання і керування надійністю виробів в умовах серійного виробництва РЕА.*

14. Бобало Ю. Оцінювання безвідмовності систем сумісно працюючих компонентів / О. Лазько, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2001. – № 428. – С. 63–73.

*Здобувачем розроблено підхід кількісного оцінювання безвідмовності*

*сумісно працюючих компонентів РЕА.*

15. Бобало Ю. Я. Формалізація ефективності параметричного синтезу компонентів / Ю. Я. Бобало, О. В. Лазько, Л. А. Недоступ // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2002. – № 440. – С. 76–82.

*Здобувач розробив принципи формалізації та критерії ефективності параметричного синтезу компонентів з позиції забезпечення безвідмовності систем.*

16. Бобало Ю. Векторно-аналітична інтерпретація і програмне забезпечення оптимального параметричного синтезу компонентів / Ю. Бобало, М. Кіселичник, О. Лазько, Б. Мандзій, Л. Недоступ // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2003. – № 477. – С. 212–219.

*Здобувачем запропонована векторно-аналітична інтерпретація оптимального параметричного синтезу компонентів РЕА.*

17. Bobalo Y. Conceptual questions of modelling and optimizing quality providing processes / Y. Bobalo, L. Nedostup, B. Mandziy, M. Kiselychnyk // Acta Techn. CSAV. – 2004. – Vol. 49. – P. 249–255.

*Здобувачу належить загальна концепція моделювання процесів забезпечення якості та їх оптимізації у виробничих умовах.*

18. Бобало Ю. Системний аналіз, моделювання й оптимізація процесів забезпечення якості радіоелектронних пристроїв / Л. Недоступ, М. Кіселичник, Ю. Бобало, О. Лазько // Теоретична електротехніка. – 2004. – Вип. 57. – С. 159–172.

*Здобувачем проведено комплексний аналіз наскрізного моделювання і оптимізації процесів забезпечення якості радіоелектронних пристроїв.*

19. Бобало Ю. Структурування, оцінювання ефективності та моделювання виробничих систем забезпечення якості радіоелектронних пристроїв / Л. Недоступ, М. Кіселичник, Ю. Бобало, Г. Васьків, О. Лазько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2004. – № 508. – С. 18–24.

*Здобувач розробив методику структурування та моделювання виробничих витрат, пов'язаних з забезпеченням заданих показників якості при серійному виробництві РЕА.*

20. Бобало Ю. Я. Програмне забезпечення комплексної оптимізації виробничих систем / Л. А. Недоступ, Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник, О. В. Лазько, Г. М. Васьків // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2004. – № 522. – С. 62–67.

*Здобувачем розроблена загальна структура програмного забезпечення, призначеного для вирішення комплексних оптимізаційних задач на базі статистичної інформації реального серійного виробництва РЕА.*

21. Бобало Ю. Я. Забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристроїв шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва / Л. А.

Недоступ, М. Д. Кіселичник, Ю. Я. Бобало, О. В. Лазько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2005. – № 534: – С. 124–130.

*Здобувачем проведено аналіз загальної стратегії забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристроїв шляхом комплексної оптимізації повного виробничого процесу з врахуванням техніко-економічних обмежень.*

22. Бобало Ю. Я. Системне параметрично-структурне моделювання процесів забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристроїв / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, Ю. Я. Бобало, О. В. Лазько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2006. – № 557. – С. 141–151.

*Здобувач запропонував методологію параметрично-структурного моделювання процесів забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристроїв.*

23. Бобало Ю. Я. Імовірнісне оцінювання ефективності і керованості систем забезпечення якості радіоелектронної апаратури / Ю. Я. Бобало // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2007. – № 595. – С. 18–22.

24. Бобало Ю. Я. Аналіз методів оцінювання безвідмовності систем сумісно працюючих компонентів електронних пристроїв / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, О. В. Лазько // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 7 (26). – С. 212–214.

*Здобувачем проведено аналіз і запропоновані шляхи оцінювання безвідмовності систем сумісно працюючих компонентів.*

25. Бобало Ю. Я. Моделювання та керування потоками дефектів та відмов радіоелектронних пристроїв / Ю. Я. Бобало // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2008. – Вип. 13. – С. 3–7.

26. Bobalo Y. OPTAN – Software for Modelling, Analysis and Optimization of Electronic Devices Process Improvement / Y. Bobalo, L. Nedostup, O. Nadobko, M. Kiselychnyk, O. Lazko // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2009. – R. 85. – NR 4. – P. 59–61.

*Здобувач сформулював твердження з запропонованої теорії потоків виробничих дефектів.*

27. Бобало Ю. Я. Керування процесами формування та контролю заданих властивостей у виробництві електронних пристроїв / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2009. – № 637 : – С. 7–11.

*Здобувачем запропонована ймовірнісна формалізація процесів утворення дефектності.*

28. Бобало Ю. Я. Імовірнісне оцінювання ефективності систем забезпечення якості радіоелектронної апаратури / Ю. Я. Бобало // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Системний аналіз, управління і інформаційні технології. – Харків: НТУ «ХПІ».

– 2009. – № 4. – С. 186 –190.

29. Бобало Ю. Я. Моделювання та керування процесами формування та контролю якості радіоелектронної апаратури / Ю. Я. Бобало // Східно-Європейський журнал передових технологій . – 2009. – № 2/3 (38). – С. 11 –13.

30. Bobalo Y. Analysis of quality of radio electronic devices in multistage production systems / Y. Bobalo, M. Kiselychnyk, L. Nedostup // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2010. – R. 86. – NR 1. – P. 124 –126.

*Здобувач запропонував імовірнісну формалізацію процесів утворення, ущільнення і розрідження дефектності при виконанні контрольних і технологічних процедур.*

31. Бобало Ю. Я. Забезпечення адекватності під час моделювання квазі-нормальних розподілів / О. Лазько, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 418. – С. 80–85.

*Здобувач запропонував підхід до забезпечення адекватності моделей квазінормальних розподілів параметрів з врахуванням нерегулярності рядів Грама-Шарльє.*

32. Бобало Ю. Я. 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». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2007. – № 595.– С. 57–61.

*Здобувачем запропонована імовірнісна формалізація процесів утворення дефектності, їх ущільнення і розрідження при виконанні контрольних і технологічних процедур, сформульовані твердження з запропонованої теорії потоків виробничих дефектів.*

## АНОТАЦІЇ

**Бобало Ю. Я. Математичне моделювання та автоматизоване керування процесами забезпечення якості радіоелектронної апаратури за техніко-економічними критеріями.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2010.

Наведено результати аналізу проблеми забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури і доведено, що традиційні методи, які ґрунтуються на локальному вирішенні окремих задач, малоефективні. Комплексна оптимізація процесів проектування, виготовлення і експлуатації апаратури з використанням наскрізних математичних моделей дає змогу підвищити техніко-економічні показники всіх стадій життєвого циклу. Запропоновані принципи формалізації і моделювання процесів забезпечення якості на стадіях проектування, виробництва та експлуатації ґрунтуються на теоріях системного

аналізу і синтезу ергатичних структур з відображенням і врахуванням їх взаємозалежності і керованості.

Отримала подальший розвиток концепція оперативного оцінювання надійності виробів за рівнем поточної дефектності, яка ґрунтується на встановлених залежностях потоків відмов апаратури від потоків виробничих дефектів на всіх стадіях технологічних процесів. У роботі сформульовано теоретичні положення формування і перетворення цих потоків, а також їх математичного моделювання з урахуванням ущільнення і розрідження.

Розроблено метод моделювання і оптимізації виробничих витрат, пов'язаних із забезпеченням якості та надійності апаратури. Запропоновано дві оригінальні ймовірнісні математичної моделі, які сукупно формалізують постановку задачі визначення оптимальних параметрів процесів проектування, виробництва і експлуатації. Використання однієї з них як цільової функції, а іншої – як основного обмеження дає змогу розв'язувати різнопланові задачі оптимізації залежно від призначення апаратури та інших апріорних умов.

**Ключові слова:** математичні моделі, ергатичні системи, процеси забезпечення якості, надійність, потоки дефектів, ефективність, комплексна оптимізація.

**Бобало Ю. Я. Математическое моделирование и автоматизированное управление процессами обеспечения качества радиоэлектронной аппаратуры по технико-экономическим критериям. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

Приведены результаты анализа проблемы обеспечения качества и надежности радиоэлектронной аппаратуры, на основе которого сделан вывод о том, что традиционные методы, предусматривающие решение локальных задач повышения качества на отдельных стадиях разработки и производства, малоэффективны. На современном этапе развития радиоаппаратостроения актуальной является проблема создания теории и методологии комплексной оптимизации процессов создания новой техники с использованием отвечающих этим требованиям математических моделей.

Предложена концепция комплексной оптимизации процессов обеспечения качества, основанная на теории моделирования сложных систем. Эта теория получила развитие в направлении моделирования процессов образования дефектности на всех стадиях жизненного цикла, что дало возможность разработать принципы их комплексной оптимизации. Оценка эффективности процедур формирования и контроля качества производится с использованием функциональных и экономических критериев в виде вероятности выполнения задачи при проведении технологических и контрольных процедур и суммарных производственных затрат по обеспечению качества на стадиях производства и эксплуатации. Предложенные

оптимизационные модели отражают формализованную постановку задачи оптимального выбора параметров процедур формирования и контроля качества в виде целевых функций и ограничений. Применение одной из них в качестве целевой, а другой – в качестве главного ограничения обеспечивает решение задач оптимизации либо в плане обеспечения заданного уровня качества при минимальных затратах, либо в плане обеспечения максимально возможного качества при допустимых затратах.

Получила дальнейшее развитие концепция оперативного оценивания надежности изделий по уровню текущей дефектности, которая базируется на установленных зависимостях параметров потоков отказов от потоков производственных дефектов на всех стадиях технико-экономического процесса. Изложены теоретические положения, касающиеся динамики формирования и преобразования этих потоков. Их использование позволяет обеспечивать гибкость и адекватность математических моделей посредством учета показателей уплотнения и разрежения потоков дефектов при проведении реальных технологических и контрольных процедур.

Предложена оригинальная модель суммарных производственных затрат, синтезированная из частных моделей, и приводится ее компактный матричный вариант.

**Ключевые слова:** математические модели, эргатические системы, процессы обеспечения качества, надежность, потоки дефектов, эффективность, комплексная оптимизация.

**Bobalo Y. Y. Mathematical modeling and automated control of processes of providing of quality of radio electronic devices in obedience to technical and economic criteria.** – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of doctor of technical sciences on speciality 05.13.07 – automation of control processes. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2010.

The results of analysis of problem of providing of quality and reliability of radio electronic apparatus are pointed and it is proved that traditional methods which are based on the local decision of separate tasks become ineffective. Complex optimization of processes of planning, producing and generation apparatus with the using of through mathematical models allows increasing the technical and economic indexes of all stages of life cycle. The offered principles of formalization and design of processes of providing of quality on the stages of planning, production and exploitation are based on the theories of system analysis and synthesis of ergatic structures with a reflection and account of their interdependence and dirigibility.

Conception of operative evaluation of reliability of wares in obedience to current imperfectness level, which is based on the set dependences of streams of refuses of apparatus on the streams of production defects at all stages of technological

processes, got subsequent development. Theoretical positions of forming and transformations of these streams, and also their mathematical modeling, with a compression and dilution into account taken, in this work were executed.

The method of design and optimization of production charges, related to providing of quality and reliability of apparatus is developed. Two original probabilities of mathematical model, which in an aggregate are the formalized raising of task of determination of optimum parameters of processes of planning, production and exploitation, are offered. The using of one of them as an objective function, and second as a basic limitation allows solving the different tasks of optimization depending on setting of apparatus and other priori conditions.

**Keywords:** mathematical models, ergatic systems, processes of providing of quality, reliability, streams of defects, efficiency, complex optimization.