

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселічник

ЯКІСТЬ НАДІЙНІСТЬ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ І МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Монографія

За редакцією д-ра техн. наук, проф. Л.А. Недоступа

Львів
Видавництво Львівської політехніки
2013

УДК 621.37
ББК 32.84
Я 38

Рецензенти:

Політанський Л.Ф., д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича;

Любчик Л.М., д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерної математики і математичного моделювання Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", лауреат Державної премії України, член Національного комітету України по автоматичному управлінню;

Кришук В.М., канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету

*Рекомендувала Вчена рада Національного університету "Львівська політехніка"
(Протокол № 64 від 24.09.2013 р.)*

Бобало Ю.Я.

Я 38 Якість, надійність радіоелектронної апаратури. Елементи теорії і методи забезпечення: монографія / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник; за ред. Л.А. Недоступа. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 196 с.

ISBN 978-617-607-481-6

Розглянуто системний підхід до підвищення ефективності процесів забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури. За результатами проведених досліджень розроблено елементи теорії комплексної оптимізації цих процесів з використанням функціональних і економічних критеріїв і наскрізних математичних моделей. Викладено особливості формування і моделювання потоків виробничих дефектів і їх перетворення на потоки відмов апаратури в процесі експлуатації.

Книга може бути корисною для студентів старших курсів як навчальний посібник, а також для широкого кола спеціалістів, які займаються питаннями забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури та інших видів техніки.

**УДК 621.37
ББК 32.84**

© Бобало Ю.Я., Недоступ Л.А.,
Кіселичник М.Д., 2013

© Національний університет
"Львівська політехніка", 2013

ISBN 978-617-607-481-6

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
Розділ 1. ПРОБЛЕМИ І КОНЦЕПЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ	7
1.1. Тенденції і проблеми забезпечення якості радіоелектронної апаратури	7
1.2. Якість апаратури і проблеми її оцінювання.....	14
1.3. Ефективність процесів забезпечення якості РЕА	16
1.4. Наскрізне моделювання процесів забезпечення якості, їх оптимізація і керування	20
Розділ 2. СТРУКТУРНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ І ПАРАМЕТРИЧНО-СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РЕА	27
2.1. Структурна формалізація процесів проектування, виробництва та експлуатації РЕА.....	27
2.2. Формувальна здатність і керованість процесів забезпечення якості.....	34
2.3. Виконання завдання системами забезпечення якості виробів і його оцінювання.....	39
2.4. Моделі керування системами забезпечення якості упродовж життєвого циклу РЕА	43
2.5. Техніко-економічні критерії забезпечення якості виробничими системами.....	50
2.6. Процеси формування надійності виробів.....	52
2.7. Параметрично-структурні моделі процесів забезпечення якості та надійності виробів	57
Розділ 3. ПРОЦЕСИ УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТНОСТІ І ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ	63
3.1. Сутність і структура дефектності РЕА	63
3.2. Імовірнісна формалізація процесів виявлення і пропуску дефектів на стадіях життєвого циклу РЕА	67
3.3. Дефектність і працездатність систем компонентів при їх сумісному функціонуванні.....	71
3.4. Оцінювання якості параметричного синтезу компонентів РЕА	76
3.5. Розподіли параметрів РЕА та їх моделювання	79
3.6. Моделювання дефектності в разі квазінормальних розподілів стикувальних параметрів компонентів	86

- 3.7. Моделювання процесів утворення дефектності під час виробництва РЕА.....91
3.8. Моделювання дефектності n-крокового технологічного процесу..... 102

Розділ 4. ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКІВ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ

- І ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ РЕА** 112
4.1. Потоки подій під час формування властивостей виробів..... 112
4.2. Елементи теорії потоків виробничих дефектів і відмов апаратури
під час експлуатації..... 114
4.3. Формування потоків виробничих дефектів..... 123
4.4. Моделі потоків виробничих дефектів на завершальних стадіях
регулювання і технологічного припрацювання РЕА 131
4.5. Концептуальні аспекти моделювання і прогнозування надійності
під час виробництва РЕА 135

Розділ 5. МЕТОДИ І МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ У ВИРОБНИЦТВІ РЕА 139

- 5.1. Стан і проблеми кваліметрії у радіоапаратобудуванні 139
5.2. Особливості контролю у виробництві РЕА 141
5.3. Ефективність контролю і проблеми забезпечення 150
5.4. Види і моделі процесів контролю якості у виробництві РЕА 157

Розділ 6. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ВИТРАТ

- І ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕА**..... 166
6.1. Структура витрат на забезпечення якості під час проектування,
виробництва та гарантійного обслуговування РЕА
в процесі експлуатації..... 166
6.2. Моделювання витрат під час проведення
проектно-конструкторських робіт 169
6.3. Математичне моделювання виробничих витрат 171
6.4. Матричні моделі витрат на забезпечення якості на стадіях
життєвого циклу РЕА..... 178
6.5. Оптимізація процесів формування і контролю якості РЕА..... 182

- СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ** 190

ПЕРЕДМОВА

Забезпечення високої якості та надійності функціонування технічних об'єктів є однією з найважливіших науково-технічних 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 потенційних можливостей і раціонального використання усіх видів ресурсів. Питання забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури (РЕА) завжди перебували в центрі уваги вчених наукових закладів і спеціалістів промислових підприємств, про що свідчить значна кількість чинних нормативних документів і публікацій за цією тематикою. Але водночас зазначимо, що велику кількість задач, пов'язаних з проблемою забезпечення якості та надійності РЕА, до останнього часу ставили та вирішували переважно як самостійні задачі без достатнього системного обґрунтування. Зростання складності процесів проектування, виготовлення та експлуатації цього виду техніки, а також витрат, пов'язаних з ними, все більше вимагають прийняття оптимальних рішень на всіх стадіях життєвого циклу. Для знаходження їх раціональних варіантів на стадіях проектування апаратури, технологічної підготовки виробництва і самого виробництва останніми роками поширення набули системи автоматизованого проектування. Однак математичні моделі, які використовують у цих системах, недостатньо адекватно відображають динаміку реальних процесів формування якості виробів на всіх стадіях їхнього життєвого циклу, що не дає змоги забезпечити їх належну комплексну оптимізацію за техніко-економічними критеріями. Під час оперативного розв'язання задач забезпечення якості та надійності РЕА, особливо у разі складних процесів її створення, прерогатива щодо прийняття рішень залишається у розробника і виробника, і ці рішення не завжди оптимальні.

Усі ці фактори актуалізують подальше вдосконалення теорії та практики підвищення ефективності процесів забезпечення якості та надійності РЕА за допомогою їх комплексної оптимізації за техніко-економічними критеріями. Вони стимулювали авторів до проведення досліджень у цьому напрямі. Результати досліджень наведено у цій монографії.

Автори висловлюють щирю подяку рецензентам – професору Л.М. Любчику, професору Л.Ф. Політанському, професору В.М. Крищуку за їх цінні зауваження і поради щодо покращення монографії.

Автори вдячні співпрацівникам – канд. техн. наук, доц. Г.М. Васьківу, канд. техн. наук, доц. О.В. Надобку і канд. техн. наук, доц. О.В. Лазько, канд. техн. наук, доц. М.В. Меленю, які взяли участь у розробленні та розв'язанні низки задач, проведенні експериментів, а також інженерам Г.З. Яцук і Н.В. Лядик за цінні поради та допомогу в підготовці рукопису.

Розділ 1

ПРОБЛЕМИ І КОНЦЕПЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

1.1. Тенденції і проблеми забезпечення якості радіоелектронної апаратури

Науково-технічний поступ України в умовах загострення технічних, економічних, соціальних та інших проблем на сучасному етапі її розвитку зумовив необхідність інтенсифікувати процеси забезпечення країни радіоелектронною апаратурою (РЕА), яка значною мірою сприяє прогресу науки, техніки, медицини та всіх інших сфер діяльності суспільства. Зважаючи на жорсткі вимоги маркетингу, актуалізувалась проблема вдосконалення процесів проектування, виробництва та експлуатації цього виду техніки на основі прогресивних технологій, сучасного інформаційного забезпечення, використання нових матеріалів, упровадження ефективних систем контролю і управління, здатних забезпечити високі показники виробів та раціональне використання ресурсів.

Останнім часом у процесах проектування, виробництва і експлуатації РЕА виникли певні тенденції, які зумовлюють основні напрями робіт щодо їх вдосконалення. Основна з них полягає у постійному підвищенні вимог до якості виробів, зумовлених вимогами світового і внутрішнього ринків, які все більше характеризуються не тільки конкуренцією цін, а й жорсткою конкуренцією рівнів якості. Ця тенденція дає підставу сподіватись, що наступний період розвитку вітчизняної промисловості характеризуватиметься техніко-економічною стратегією, спрямованою на досягнення вищих рівнів якості, тобто на створення практично безвідмовних у межах встановленого часу, а отже, конкурентоспроможних виробів. Ці процеси повинні бути ефективними, здатними забезпечувати потрібні властивості виробів за мінімальних або допустимих витрат, що в умовах ринкових відносин набуває особливої значущості.

Необхідно зазначити, що всі стадії життєвого циклу РЕА характеризуються відповідними рівнями дефектності, яка набуває специфічного змісту. Так, стадія проектування характеризується дефектами схемотехнічного і системотехнічного проектування, параметричного синтезу компонентів, дефектами резервування, застосування елементної бази, матеріалів і напівфабрикатів, конструкторського і технологічного проектування.

На стадії виробництва виникають дефекти формоутворення і структуроутворення, нанесення різних видів покриттів, дифузії та епітаксії, виготовлення типових елементів заміни, складання, монтажу, регулювання і технологічного припрацювання. До них належать також дефекти контролю якості під час виконання технологічних операцій і дефекти оцінювання якості та надійності готових виробів.

Дефекти на стадії експлуатації виникають через помилки оператора, порушення режиму й обсягу профілактики, неякісний ремонт.

Аналіз літератури, а також досвіду підприємств виробників РЕА засвідчує, що сучасна стратегія забезпечення якості продукції переважно зорієнтована на використання типових технологічних процесів, які розробляють у спеціалізованих організаціях для серійних підприємств відповідної галузі. Типова технологія визначає структуру процесів, перелік матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, потребу в обладнанні, режими і регламенти виконання технологічних, контрольних і профілактичних процедур, обсяги і методи контролю. Заходи, спрямовані на забезпечення якості, на заводах-виробниках РЕА передусім націлені на виконання вимог типових технологій. Тенденція широкого використання типових технологічних процесів характеризується поліпшенням техніко-економічних показників виробництва завдяки уніфікації технологічного і контрольного обладнання, інструментів і оснащення, автоматизації процесів, зменшення витрат і термінів їх освоєння. Однак застосування типових технологій без належного врахування конкретних умов виробництва часто призводить до того, що процеси виявляються неоптимальними, ресурси використовуються нераціонально, через це досягнутий рівень якості виробів істотно нижчий за потенційно можливий.

Численні дослідження показали, що в середньому 45–55 % усіх відмов РЕА спричинені відмовами електрорадіоелементів (ЕРЕ), приблизно 50 % – виробничими дефектами, допущеними під час виготовлення, і до 5 % – іншими причинами. Відзначено, що попри загальну тенденцію зростання рівня надійності РЕА останніх поколінь, співвідношення її відмов з причин відмов елементів і виробничих дефектів залишається майже сталим. Особливістю є і те, що велику частку усіх експлуатаційних відмов становлять параметричні відмови через дефекти ЕРЕ, недосконалість технології виготовлення апаратури, неефективність контролю. Частка параметричних відмов зростає під час експлуатації виробів. Підвищення функціональної складності РЕА здебільшого призводить до збільшення кількості параметричних відмов. Тому згадана тенденція зростання складності РЕА, перехід до систем і комплексів не усуває, а навпаки, посилює проблему параметричних відмов, тому необхідно вдосконалювати і розвивати методи забезпечення якості та параметричної надійності РЕА під час її проектування і виготовлення.

Сьогодні є чимало наукових праць з різних аспектів забезпечення надійності радіоелектронної апаратури. Не зменшуючи їх наукової і практичної цінності, необхідно все-таки зазначити, що питання забезпечення надійності в них розглянуто переважно в контексті задач, які розв'язують на стадіях розроблення електричних схем і конструкцій апаратури. Питанням забезпечення точності й стабільності параметрів РЕА під час виробництва приділено менше уваги, хоча доведено, що саме такі стадії, як тренування елементів, регулювання і технологічне припрацювання апаратури, відрізняються високою ефективністю у забезпеченні її надійності. Теоретичні питання утворення дефектності, її ущільнення і розрідження у процесі виробництва і її впливу на надійність РЕА потребують серйозних досліджень.

Тенденції, що характеризують процеси виробництва, реалізації і використання РЕА, свідчать про актуальність проблеми підвищення ефективності систем забезпечення якості в інтересах виробника і замовника на основі застосування у виробництві оптимальних технологічних процесів і керування ними. Ця проблема містить множину завдань, серед яких провідними є:

- оптимізація рівнів показників якості виробів;
- оптимізація процесів формування якості виробів;
- оптимізація контролю якості.

Перше завдання потрібно розглядати в аспекті маркетингу, оскільки умови його виконання залежать від умов проектування і виготовлення виробів на багатьох підприємствах. Основа вирішення другого завдання – наявність ресурсів виробництва і розширення складу об'єкта управління. Останнє зумовлено визначенням категорій “якість процесів” і “якість виробів”, взаємозв'язок яких розкриває принцип відображення: якість процесів впливає на якість результатів. Тому якість технологічних процесів стає визначальним чинником забезпечення якості апаратури загалом, хоч фактичні показники якості виробів можуть відрізнятися від запланованих. Дослідження свідчать, що істотна розбіжність між потенційним і фактичним значеннями показників якості спостерігається на початку серійного виробництва. Це зумовлює необхідність нормування і контролю показників якості, враховуючи потенціальні можливості підприємства і, зокрема, його ресурсне забезпечення. Керування якістю повинно бути зорієнтоване на повне використання виділених ресурсів або на їх економію у разі спрямування показників якості до потенційного рівня. Ці умови покладено в основу підвищення ефективності виробництва загалом [6, 52].

Проблема оптимального забезпечення ресурсами є однією з основних проблем забезпечення ефективності сучасного виробництва радіоелектронної апаратури. Визначення потрібного рівня якості матеріалів, напівфабрикатів, деталей, комплектуючих виробів, а також інших ресурсів – енергетичних, технологічних,

метрологічних тощо залишається необхідною умовою забезпечення якості та надійності виробів. Але в сучасних умовах, зважаючи на інтенсивне впровадження прогресивних мікро-, нано- та інших наукоємких технологій, питання інтелектуального рівня кадрового забезпечення стає чи не першочерговим.

Складність систем, до яких належать процеси забезпечення якості РЕА упродовж життєвого циклу, зумовлює необхідність їх системного вивчення. Ці системи характеризуються особливими властивостями, які не є еквівалентними сумі властивостей їх складових підсистем. Формально всі властивості систем можна розділити на дві групи. Перша з них пояснюється взаємозалежним впливом різних чинників на показники якості виробів. Такий адитивний вплив цих чинників визначається відповідним підсумовуванням парціальних впливів.

Друга група властивостей характеризується сумісним впливом факторів на показники якості, який за сутністю є мультиплікативним впливом. Він визначає одну із системних властивостей складних багатокрокових процесів забезпечення якості РЕА – їх емергентність [23, 35]. Ця властивість систем зумовлює необхідність їх вивчення як чогось цілого, яке характеризується системними зв'язками складових. Встановлено істотну значущість мультиплікативної складової у сумарній дефектності виробів, що формується під час функціонування складних технологічних систем.

Можна стверджувати, що цей напрям ні у теоретичному, ні у прикладному аспектах належно не розвинено, хоча, як свідчать дослідження, очевидна його перспективність у створенні адекватних математичних моделей формування дефектності реальних багатокрокових технологічних процесів виготовлення РЕА.

Сучасні технологічні процеси виробництва РЕА характеризуються складністю, необоротністю, груповими принципами оброблення, підвищеною точністю, різноманітністю технологічних операцій, наявністю на вході й виході контрольованих і неконтрольованих параметрів, складними, часто не вивченими залежностями між ними. Іноді вже під час виробництва РЕА змінюються вимоги щодо якості виробів, тобто здійснюється випуск однотипної апаратури з різними показниками якості. Тому оптимальний синтез технологічних процесів виробництва РЕА, як складних стохастичних об'єктів, потребує виконання досліджень комплексу проблем.

Проектування технологічних процесів традиційно провадиться у двох напрямках. Перший – структурне проектування, тобто синтез різних варіантів структури. Другий – параметричне проектування, визначення параметрів елементів структури. Такий різновид процедури синтезу оптимальних процесів не має належного логічного обґрунтування, оскільки передбачає вибір оптимальної структури за відомих констант, які характеризують технологічні й

контрольні процедури з погляду виробничих ресурсів, а параметричну оптимізацію здійснюють за наявності структур. Для широкого класу технологічних процесів виробництва РЕА задачу оптимізації не можна розглядати так спрощено, оскільки зміна параметрів технологічних і контрольних процедур впливає на структуру процесу загалом. А у разі зміни структури можуть змінюватися і параметри її елементів. У цьому сенсі комплексна оптимізація технологічних процесів передбачає вибір таких параметрів технологічних і контрольних процедур і структури процесу, за яких забезпечується випуск виробів заданої якості з мінімальними витратами [3, 47, 51, 52]. Задача синтезу оптимальних технологічних процесів у такому формулюванні істотно ускладнюється.

Отже, проектування технологічних процесів потрібно розглядати як комплексну проблему, в якій поєднуються задачі аналізу і синтезу, моделювання і оптимізації процедур забезпечення заданих властивостей виробів, ефективного проведення як технологічних операцій, так і процедур контролю. Дослідження свідчать, що реалізація комплексного підходу до проектування оптимальних процесів відстає від наукових і практичних досягнень в галузі технології і контролю якості виробів на усіх стадіях виробництва, хоча кожна з них розвинена доволі добре.

Однією з причин становища, яке склалося, є відсутність загальноприйнятої концепції (або концепцій) комплексного підходу до вирішення цієї проблеми. У численних працях українські та зарубіжні спеціалісти обґрунтовують, що забезпечити високі техніко-економічні показники апаратури можна за умови комплексної оптимізації всіх стадій її життєвого циклу за критеріями якості та надійності виробів і високої ефективності усього цього процесу [3, 5, 47]. Процес представляється системою S , яка є деякою сукупністю взаємопов'язаних елементів, що перетворюють простір вхідних параметрів X на простір вихідних параметрів Y за допомогою керуючих впливів W за наявності непередбачених впливів Z :

$$S: X * W * Z \rightarrow Y.$$

Показником функціонування системи є функція

$$g(x, w, z),$$

де x, w, z – складові векторів X, W, Z .

Керування такою системою і її оптимізація здійснюються зміною параметрів x і w :

$$x, w = \arg \text{extr. } g(x, w, z);$$

$$x \in G_x;$$

$$w \in G_w;$$

$$z = \text{const},$$

де G_x, G_w – обмеження.

Саме на цьому основані принципи формалізованого опису структур технологічних процесів, процедур управління цими системами і системами контролю.

Розвитку робіт із синтезу оптимальних технологічних процесів виробництва РЕА перешкоджають недостатнє розроблення теорії проектування процесів виробництва цього виду техніки, а також відсутність моделей і залежностей (зокрема часових), що пов'язують якість виробів з характеристиками технологічних, контрольних процедур і з характеристиками використовуваних ресурсів. Потребує подальшого розвитку методологія оптимізації процесів з урахуванням критеріїв якості та виробничих витрат на її забезпечення. Основним завданням під час їх проектування повинен стати вибір раціональних варіантів процедур формування і контролю властивостей виробів на всіх рівнях ієрархії – від технологічної установки або верстата до процесу загалом. Такий підхід забезпечуватиме тісний зв'язок функції управління технологічними процесами з функціями управління виробництвом загалом [18, 26, 42].

Проблеми проектування оптимальних технологічних процесів не вичерпуються тільки особливостями їх складових, а багато в чому визначаються характером зв'язків між ними. Тому актуальним є дослідження впливу технологічних операцій, які здійснюються у виробництві, на показники якості, сформовані на попередніх етапах технологічного процесу. Встановлено, що такий вплив призводить до ущільнення потоку дефектів, який спричинений прихованими дефектами, що погіршує показники надійності апаратури. Інформації з цих питань практично немає.

Недостатньо досліджено також питання впливу конструкційних параметрів деталей та вузлів, кваліфікації виконавців та інших чинників на інтенсивність потоків виробничих дефектів і на можливість виявити їх під час контролю. Останнім часом стає усе очевидніше, що традиційна методологія розв'язання задач оптимізації технологічних процесів неприйнятна без виконання зазначених досліджень, що зменшує як наукову, так і практичну цінність отриманих результатів. Одночасно використання широкого статистичного матеріалу, нагромадженого на підприємствах під час виробництва РЕА, і апарату математичної теорії експерименту дають змогу підвищити ефективність проектування технологічних процесів і створити реальні передумови для розвитку систем автоматизованого проектування оптимальних технологічних процесів.

Суть третього завдання проблеми оптимального синтезу технологічних процесів полягає у керуванні процедурами оцінювання якості під час виробництва РЕА. Необхідність в оптимальному керуванні параметрами контрольних процедур зумовлена тим, що під час серійного виробництва показники якості виробів можуть суттєво змінюватись, а це потребує оперативного й адекватного реагування систем контролю і керування.

Велика кількість розв'язків задач формалізації технологічних процесів ґрунтується на апріорі відомих моделях окремих технологічних і контрольних процедур. Незважаючи на уявну простоту й очевидність такого підходу, під час моделювання складних багатокрокових процесів дослідники наражаються на серйозні труднощі, оскільки необхідно врахувати численні неоднорідні параметри, що утруднює синтез моделей і практично унеможливує їх побудову для повного технологічного процесу виробництва РЕА. Крім того, формалізовані структури такого роду не відображають впливу технологічних процедур на показники якості виробів, сформовані на попередніх стадіях виробництва, і не враховують утворення відповідних потоків дефектів, їх ущільнення і розрідження під дією технологічних і контрольних процедур. Важливого наукового і практичного значення при цьому набуває типізація технологічних процесів і їх математичних моделей, надання їм вигляду, зручного для розв'язування згаданих вище задач.

Складність формалізації і вирішення таких завдань, громіздкість, велика різноманітність алгоритмів і недостатня комплексність методології системного проектування оптимальних процесів зумовили помітну обмеженість впровадження машинних методів у практику підприємств, на яких виготовляють РЕА. Зберігається тенденція використання інтуїтивних рішень на основі якісних оцінок. Внаслідок такого підходу технологічні процеси часто виявляються далеко не оптимальними, а якість виробів не виправдано заниженою. Тому, зважаючи на тенденції зростання вимог до якості РЕА і раціонального використання ресурсів, які виділяються для її виготовлення, перспективним у напрямі робіт на підвищення ефективності виробництва є комплексна оптимізація і автоматизоване керування технологічними процесами. Вони ґрунтуються на досягненні переважно таких характеристик технологічних і контрольних процедур на усіх стадіях виробництва, які забезпечать заданий рівень якості виробів з мінімальними виробничими витратами або максимально можливий рівень якості за наявних ресурсів. Науковою основою концепції комплексної оптимізації керування технологічними процесами є теорія моделювання і оптимізації процедур формування і контролю заданих властивостей виробів. Вона передбачає розвиток у напрямі системної формалізації процесів забезпечення якості, теорії формування дефектності й утворення потоків дефектів на різних стадіях виробництва, їх перетворення у вигляді ущільнення та розрідження під час здійснення технологічних і контрольних процедур, а також розроблення на цій основі теорії і методів оперативного оцінювання і прогнозування надійності РЕА з урахуванням її групових та індивідуальних властивостей.

1.2. Якість апаратури і проблеми її оцінювання

За відомим визначенням якість апаратури, як і інших технічних пристроїв, характеризується сукупністю властивостей, які визначають ступінь їх придатності до використання за призначенням. Якість характеризується багатьма показниками, серед яких показник надійності. Часто терміни “якість” і “надійність” вживають сумісно, як взаємодоповнювальні, незважаючи на їх деяку змістову відмінність і формальну підпорядкованість. Якість апаратури узагальнено визначається відповідністю її властивостей вимогам технічної документації у момент проведення контролю. Надійність характеризується її здатністю зберігати ці властивості в процесі експлуатації. Проте у деяких ситуаціях результати проведеного контролю відповідають встановленим вимогам до якості, а виріб з причини прихованих і невиявлених дефектів може передчасно втратити працездатність. Це пояснюється тим, що реально не існує бездефектного виробництва, як і ідеального контролю. Отже, проблема надійності РЕА фактично є проблемою її якості.

Для оцінювання якості апаратури використовується велика кількість видів контролю. Це вхідний контроль матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів та інших ресурсів, операційний контроль, приймальний контроль, періодичний контроль, контроль вибірковий і стовідсотковий (суцільний) тощо. Особливий вид контролю якості продукції – випробування, що полягає в експериментальному визначенні показників якості апаратури або її складових у процесі функціонування або з імітацією умов експлуатації за заданою програмою. На стадії проведення науково-дослідних робіт і схемотехнічного, системотехнічного, конструкторського та технологічного проектування випробування є основним видом контролю якості у широкому розумінні цього слова. На стадії виробництва цей вид контролю поєднується з іншими видами контролю.

На сучасному етапі розвитку науки і практики оцінювання якості РЕА сформувались два основних напрями вирішення цієї проблеми – поелементний параметричний контроль і контроль функціональний. В умовах серійного виробництва, характерного для сучасного електронного апаратобудування, навіть у разі досягнення високої якості проектування схем, конструкцій і технологій, брак виробництва є майже неминучим, і дефекти можуть виникати на кожному кроці технологічного процесу. Завдання виявлення, а за можливості й усунення виробничих дефектів, набувають першочергового значення у межах загальної проблеми створення високоякісної апаратури.

Поелементні методи контролю орієнтовані на виявлення виробничих дефектів під час виконання технологічних операцій в процесі виготовлення деталей, збірних одиниць різного рівня і апаратури загалом. Переважає неруйнівний метод контролю.

Функціональний контроль застосовують для оцінювання якості функціонально закінчених об'єктів виробництва, які за сутністю можна розглядати як системи відповідної складності. Це функціонально закінчені вузли, блоки, пристрої тощо. Оцінка якості таких систем зводиться до оцінювання якості їх функціонування, тобто до оцінювання спроможності виконувати поставлені завдання. Аналіз показує, що ефективність методів поелементного параметричного контролю, контролю функціонального доволі висока, але обмежується сферою поставлених перед контролем завдань. Зокрема, контроль поелементний малоефективний для оцінювання якості систем, а контроль функціональний – для локалізації дефектів у складних системах.

Отже, під час проектування і виготовлення складної радіоелектронної апаратури була і залишається актуальною проблема забезпечення ефективності контролю якості продукції, яка окреслюється двома питаннями: “що перевіряти” і “як перевіряти”? Цю проблему досліджують у своїх роботах багато українських і зарубіжних дослідників.

Показники якості апаратури складаються з абсолютних або відносних показників її властивостей і розділяються на дві групи: функціональні й економічні показники якості.

Функціональні показники відображають властивості РЕА з погляду її прямого призначення, виконання основних функцій.

Економічні показники характеризуються витратами, необхідними, щоб надати апаратурі заданих властивостей, а також економічним ефектом від її використання.

Належна якість апаратури визначається умовами, які повинні забезпечувати відповідні значення певних показників. Ці умови прийнято називати критеріями оцінки якості й формулювати у вигляді певних висловлювань, підтверджень або предикатів.

Сформована упродовж багатьох десятиріч парадигма оцінювання якості матеріалів, технічних виробів і процесів на сьогодні характеризується низкою невіршених проблем і відсутністю загальноприйнятих методів забезпечення достовірності результатів оцінювання. Достовірність оцінювання якості залежить від обсягу досліджень об'єкта для отримання достатньої кількості інформації і від схеми їх проведення. Кожна властивість матеріалів, деталей і апаратури загалом зумовлена множиною інших властивостей. Тому кожний показник якості теоретично можна представити у вигляді функції інших показників. Під час розв'язання практичних задач оцінювання якості виникає проблема вибору найінформативніших показників і глибини їх дослідження, з одного боку, і визначення витрат на їх контроль – з іншого боку, з врахуванням їх незліченної множини з потужністю континуума.

Ієрархічна структура дефектності характеризується структурною континуальністю, яку теоретично можна представити деревом дефектності, матрицею переходів або іншими формами. Їх обмеження щодо опису реальних процесів формування дефектності в умовах апріорної невизначеності є серйозною проблемою. Її традиційно вирішують, роблячи не зовсім науково обґрунтовані припущення, узгоджені з вимогами замовника. За результатами такого контролю замість істинних показників якості отримують оцінки, які за природою є випадковими величинами. Такими оцінками є помилки першого та другого роду.

До комплексу завдань, які у сукупності визначають сучасні проблеми оцінювання якості РЕА, входять:

- розроблення теорії і методів вибору із континуума показників якості виробів, які характеризуються високою інформативністю, і переведення їх у ранг нормованих;
- визначення раціональної глибини контролю під час проведення технологічних операцій;
- техніко-економічне обґрунтування оптимального розміщення контрольних операцій за ходом технологічного процесу;
- вибір методів контролю і обґрунтування вимог до його метрологічного забезпечення;
- обґрунтування методів оцінювання якості продукції на стадіях технологічного процесу;
- обґрунтування ресурсного забезпечення системи контролю якості;
- комплексна оптимізація процесів контролю за техніко-економічними критеріями.

Теоретичні й практичні аспекти проблеми забезпечення якості та надійності РЕА комплексною оптимізацією процесів її створення потребують подальших досліджень в цьому напрямі.

1.3. Ефективність процесів забезпечення якості РЕА

Однією з фундаментальних властивостей будь-якого об'єкта чи процесу, яка характеризує результат його функціонування, є ефективність.

Ефективність РЕА традиційно розглядають у двох аспектах – як ефективність функціональну й ефективність економічну. Функціональна ефективність характеризується прямим ефектом, який отримують у процесі її використання за призначенням.

До функціональних характеристик належать такі параметри, як чутливість і вихідна потужність, смуга пропускання, нелінійні спотворення трактів і коефіцієнт корисної дії тощо. Якщо ці характеристики відповідають встанов-

леним нормам, то вироби здатні виконувати задані функції. Формуються і підтримуються вони на всіх стадіях життєвого циклу.

Економічна ефективність відображає економічні властивості апаратури, такі як її собівартість, рентабельність, економічний ефект під час використання тощо. Для багатьох видів РЕА поняття функціональної та економічної ефективності є логічно нероздільними.

Процеси забезпечення заданих властивостей виробів на всіх стадіях їх життєвого циклу також характеризуються функціональністю та економічною ефективністю.

Функціональна ефективність процесів характеризується якістю проведення схемотехнічного, конструкторського та технологічного проектування, точністю та часовою стійкістю, миттєвим розсіюванням параметрів, запасом точності технологічних процесів, раціональним використанням задіяних ресурсів, рівнем дефектності виробництва, якістю процесів профілактичних та ремонтних робіт під час експлуатації.

Економічна ефективність процесів створення та експлуатації РЕА визначається сумарними витратами на формування і підтримку заданих показників.

З огляду на це, радіоелектронну апаратуру й процеси її проектування, виробництва та експлуатації необхідно розглядати як два взаємопов'язаних, керованих об'єкти зі своїми специфічними властивостями, параметрами і показниками ефективності забезпечення їх якості та надійності. Очевидно й те, що параметри апаратури залежать від ефективності процесів її створення та експлуатації.

Життєвий цикл радіоелектронної апаратури характеризується множиною процесів формування і підтримання властивостей, необхідних для того, щоб вона виконувала функції, згідно з призначенням. Для їх оцінювання на стадіях проектування, виробництва та експлуатації проводять контрольні заходи з використанням системи відповідних показників, отримуючи і оцінюючи результати схемотехнічного, системотехнічного, конструкторського і технологічного проектування на стадіях ескізного, технічного і робочого проектів, а також результати випробування експериментальних макетів, дослідних зразків і експериментальних партій виробів для їх серійного виробництва.

На стадії виробництва оцінюють точність, стабільність та дефектність технологічних процесів, якість проведення контрольних і випробувальних процедур.

На стадії експлуатації оцінюють якість технічного обслуговування, профілактики та ремонту.

Концепція підвищення ефективності виробництва та якості виробів зумовлює необхідність оптимального синтезу технологічних процесів на основі кількісних критеріїв. Проблема оцінювання ефективності часто виходить за межі теорії оптимальних систем і є переважно прерогативою тієї галузі прикладної науки, до якої належать досліджувані об'єкти. Вона відрізняється значною складністю,

особливо у виробництві таких видів РЕА, ефект експлуатації яких неможливо оцінити безпосередньо в грошових одиницях. У наукових технічних виданнях ця проблема не достатньо висвітлена, хоча питання оцінювання процесів формування і контролю якості РЕА розглянуто у численних публікаціях.

Сьогодні склались різні підходи до проблеми вибору критеріїв ефективності. У деяких працях критерії ефективності виробничих систем розглядають як критерії якості продукції, що не має достатнього цілісного технічного і економічного обґрунтування. Дослідження показали, що для оптимізації технологічних процесів можна використовувати єдиний узагальнений критерій ефективності у вигляді лінійної комбінації показників: вартості виготовлення, надійності, якості функціонування, інформаційної здатності тощо. Цей критерій у загальному вигляді має порівняно просту математичну структуру, але з нею пов'язана проблема з'ясування його фізичного змісту через різноманітні складові. Розглянуто також інформаційні критерії ефективності. Однак однією з причин обмеженого застосування інформаційних критеріїв є те, що вони не дають змоги враховувати семантичні аспекти інформації, яку отримують під час контролю. У багатьох наукових працях запропоновано економічні критерії ефективності, які переважно враховують економічні аспекти ефективності процесів, але зовсім не охоплюють технічних. Розрізнено перелічені завдання вирішуються у працях багатьох спеціалістів. Проте ці завдання тісно взаємопов'язані і тому потребують комплексного вирішення, оскільки їх відокремлений розгляд в умовах виробництва і розділення питань підвищення ефективності технологічних процесів і процесів контролю не дає змоги досягти потенційно можливого рівня якості виробів.

Сучасні тенденції зростання вимог до техніко-економічних параметрів РЕА і раціонального використання задіяних ресурсів обумовлюють доцільність комплексного оцінювання процесів з використання показників як функціональної, так і економічної ефективності. Цей напрямок ґрунтується на таких засадах.

Множину показників якості процесів формування і підтримання потрібних властивостей і параметрів РЕА у загальному вигляді можна подати н-вимірним вектором $Q_{<n>}$ у складі векторів показників якості процесів проектування $Q_{<m>\Pi}$ виробництва $Q_{<p>B}$ та експлуатації $Q_{<r>E}$:

$$Q_{<n>} = [Q_{<m>\Pi}, Q_{<p>B}, Q_{<r>E}]^T, \quad (1.1)$$

де

$$Q_{<m>\Pi} = [q_{i\Pi}]^T, \quad i = \overline{1, m}; \quad (1.2)$$

$$Q_{<p>B} = [q_{jB}]^T, \quad j = \overline{1, p}; \quad (1.3)$$

$$Q_{<r>E} = [q_{kE}]^T, \quad k = \overline{1, r}, \quad (1.4)$$

де n , m , p , r – позначення кількості підконтрольних показників якості процесів відповідно до вимірності наведених векторів розглянуто в 1.3.

Оцінюють якість процесів, порівнюючи досягнуті значення їх показників з апріорі встановленими допустимими значеннями або критеріями. Вектор цих значень $Q_{<n>доп}$ має аналогічну структуру:

$$Q_{<n>доп} = [Q_{<m>Пдоп}, Q_{<р>Вдоп}, Q_{<t>Едоп}]. \quad (1.5)$$

У загальному випадку вектори $Q_{<n>}$ і $Q_{<П>}$ є випадковими, тому як показник функціональної ефективності процесу забезпечення якості РЕА повинна використовуватись імовірність виконання завдання $P_{вз}^{\Phi}$ у вигляді:

$$P_{вз}^{\Phi} = P(Q_{<n>} \in \{ Q_{<n>доп} \}). \quad (1.6)$$

Треба зазначити, що, окрім розглянутого варіанта оцінювання якості, є велика група процесів, якість яких можна оцінювати за допомогою інших критеріїв, наприклад, критеріїв статистичного збігу, оптимальності та інших:

недосягнення

$$P_{вз}^{\Phi} = P(Q_{<n>} < \{ Q_{<n>доп} \}); \quad (1.7)$$

перевищення

$$P_{вз}^{\Phi} = P(Q_{<n>} > \{ Q_{<n>доп} \}), \quad (1.8)$$

де $Q_{<n>доп}$ – вектор допустимих значень показників якості процесів.

Деякі з них розглянуто в п. 2.5.

Наведені імовірності виконання завдання – найповніша об'єктивна й універсальна міра ефективності процесу забезпечення якості РЕА. Але їх використання пов'язано з необхідністю апріорного дослідження законів розподілу зазначених n-вимірних векторів, що сьогодні на практиці є суттєвою проблемою. Оpubлікованих праць щодо її вирішення ми не виявили.

Як показник економічної ефективності процесу забезпечення якості РЕА можна використовувати імовірність виконання завдання $P_{вз}^E$ у вигляді:

$$P_{вз}^E = P(C_{\Sigma} \leq C_{\Sigma доп}), \quad (1.9)$$

де $C_{\Sigma} = [C_{\Sigma,П}, C_{\Sigma,В}, C_{\Sigma,Е}]$ – сумарні витрати процесу; $C_{\Sigma доп} = [C_{\Sigma,П,доп}, C_{\Sigma,В,доп}, C_{\Sigma,Е,доп}]$ – сумарні допустимі витрати; $C_{\Sigma,П}, C_{\Sigma,В}, C_{\Sigma,Е}$ – сумарні витрати процесів забезпечення якості на стадіях проектування виробництва та експлуатації.

Калькулювання витрат, пов'язаних з процесом створення і експлуатацією РЕА, було і залишається суттєво орієнтовним, оскільки витрати залежать від багатьох чинників. Тому вартісні показники процесу є величинами випадковими і для їх оцінювання необхідно користуватись відповідними законами розподілів, якщо ж їх немає, доводиться задовольнятися оцінками середніх значень, що потребує проведення досліджень в цьому напрямі.

Під час дослідження ефективності процесів забезпечення якості та надійності РЕА упродовж її життєвого циклу виникає дві основні задачі – пряма

і зворотна. Пряма задача, або задача аналізу, націлена на оцінювання результату проведення цих процесів з апіорі заданими параметрами і властивостями ресурсів, структурою процесів, організацією виробництва, контролю і керування ними. Зворотна задача, або задача синтезу, зорієнтована на визначення параметрів процесів, зокрема параметрів матеріальних, інтелектуальних, метрологічних, технологічних й інших ресурсів, схем побудови і організації процесів, і їх інформаційного забезпечення, за яких загальна ефективність процесів буде оптимальною. Для розв'язання як прямої, так і зворотної задачі потрібно встановити відповідні критерії ефективності та розробити математичні моделі формування показників функціональної та економічної ефективності.

1.4. Наскрізне моделювання процесів забезпечення якості, їх оптимізація і керування

Створення і використання апаратури, як і інших технічних пристроїв, являє собою цілісний процес, що охоплює всі майже однакові стадії її життєвого циклу – проектування, виробництва та експлуатації. Основні етапи стадії проектування – науково-дослідні роботи, розроблення технічного завдання; розроблення технічної пропозиції; ескізне проектування; технічне проектування, виготовлення і дослідження макетів; етап розроблення технічної документації для виготовлення дослідного зразка або дослідної партії і їх усебічне випробування.

Стадія виготовлення охоплює послідовність технологічних операцій з надання об'єктам виробництва заданих властивостей згідно з призначенням і послідовність контрольних процедур з оцінювання якості в процесі виробництва.

Стадія експлуатації складається з процедур нормальної експлуатації апаратури, профілактичного обслуговування та ремонту.

Комплексна оптимізація всіх стадій життєвого циклу є визначальним фактором забезпечення ефективності РЕА і процесів її проектування, виробництва та експлуатації. Такий підхід до проблеми забезпечення високих показників якості апаратури у широкому розумінні цього слова, по суті, визначає нову технічну політику в галузі організації і проведення передовсім процесів проектування і виробництва цього виду техніки за обґрунтованого використання ресурсів і мінімізації сумарних витрат.

Досі практично не створено загальноприйнятої методології комплексної оптимізації процесів створення і експлуатації РЕА за критеріями якості, яка б охоплювала усі стадії проектування і виробництва, починаючи з наукових досліджень і закінчуючи завершальними стадіями. Проблема комплексної опти-

мізації процесів потребує досліджень з метою розроблення принципів і методів їх формалізації, визначення критеріїв оптимальності та параметрів оптимізації, методів аналізу і синтезу процесів і керування ними. Відомі багатоальтернативні оптимізаційні процеси забезпечення якості характеризуються значним різноманіттям, тому насамперед необхідно систематизувати їх з позиції можливості застосування для вирішення конкретних реальних виробничих завдань. Вони мають стати основою для розроблення цільових функцій та обмежень, визначених на множині альтернатив. Однак зазначимо, що, незважаючи на добре розвинену теорію оптимальних систем і наявність потужних засобів їх реалізації, відомо порівняно небагато прикладів використання цих методів для оптимізації технологічних процесів складної структури. Це пояснюється насамперед тим, що реальні технологічні процеси виробництва РЕА є складними системами, в описі та параметрах яких на різних стадіях є істотні відмінності. Наприклад, технологічні процеси виготовлення деталей характеризуються параметрами форми, які кількісно оцінюють лінійними і кутовими одиницями, процеси структуроутворення – параметрами структуроутворення, зокрема процесами кристалізації і рекристалізації, процеси виготовлення феритових деталей – магнітною проникністю, процеси паяння друкованих вузлів – адгезійною міцністю кріплення провідників і контактних площадок на поверхні діелектрика і надійністю паяних з'єднань тощо. Зрозуміло, що наскрізне моделювання повних технологічних процесів виготовлення апаратури, зважаючи на розмаїття параметрів, які є показниками якості виробів на відповідних стадіях виробництва, стає практично неможливим. Це потребує розроблення специфічних підходів і принципів моделювання, спроможних реалізувати концепцію їх гнучкості, універсальності й оптимального синтезу. Через відсутність ідентифікованих моделей типових процедур формування і контролю якості на різних стадіях виробництва неможливо скористатись результатами, отриманими під час розв'язання практичних задач. У деяких працях запропоновано методи моделювання процесів формування і контролю якості в умовах серійного виробництва радіоелектронної вимірювальної апаратури. Вони ґрунтуються на використанні одержаних експериментально кумулятивних функцій передавання дефектності упродовж повного технологічного процесу. Такий підхід дає змогу використовувати універсальні моделі, але неможливо врахувати впливи технологічних і контрольних процедур на параметри виробів, сформованих на різних кроках технологічного процесу, що зужує сферу його використання.

Сьогодні відомо багато варіантів моделювання та оптимізації технологічних процесів за різними критеріями. Однак методи і засоби розв'язання задач настільки різні, що виникає необхідність у їх зіставленні та порівнянні. Насамперед потрібно зазначити, що сьогодні чітко сформувались два підходи

до побудови математичних моделей технологічних процесів, один з яких ґрунтується на фізико-математичному аналізі й описі явищ, які у сукупності визначають динаміку процесів. Другий – на їх експериментальній ідентифікації, за якої основну інформацію отримують безпосереднім вимірюванням параметрів реальних процесів, які підлягають моделюванню. Вже підтверджено право на існування цих двох підходів. Але через складність багатьох сучасних виробництв, їх багатостадійність і чутливість до великої кількості дестабілізуючих факторів, які завжди існують у реальних умовах, методи побудови наскрізних математичних моделей на основі відомих закономірностей фізико-хімічних процесів часто виявляються малоефективними. Здебільшого залежності параметрів процесів, які існують об'єктивно, не мають математичного опису у вигляді формул, придатних для їх інженерного використання. Це пояснюється складністю і недостатньою вивченістю явищ, які об'єктивно існують й іноді становлять сентенцію цього процесу. У зв'язку з цим отримані таким способом наскрізні математичні моделі багатьох сучасних технологічних процесів, хоча і мають формальні ознаки фізичності, не можуть забезпечити потрібну адекватність і тому малопридатні для розв'язання конкретних виробничих задач. Прийнятнішими в умовах реального виробництва є експериментально-статистичні методи отримання таких залежностей і експериментально-статистичні методи наскрізної ідентифікації технологічних процесів виробництва РЕА. Необхідно до того ж зазначити, що аналітичне подання залежностей параметрів виробів і технологічних процесів їх виготовлення від зовнішніх і внутрішніх факторів є надійною основою для створення математичного апарату моделювання в загальному вигляді [21, 25, 35, 44, 48]. Використання експериментальних методів ідентифікації не виключає можливості врахування наявної інформації про фізико-хімічні й інші особливості технологічних процесів. У таких випадках отримані аналітичні залежності набувають більшого практичного сенсу і практичної значущості.

Залежно від кількості апріорної інформації про технологічні процеси як про об'єкти досліджень, методи визначення їх оптимальних характеристик поділяють на дві основні групи:

- методи визначення оптимальної структури і параметрів процесу;
- методи визначення параметрів процесу за заданої або прийнятої його структури.

Першу групу методів використовують переважно під час проектування нових технологічних процесів, і вона називається структурною оптимізацією. Друга група – у разі оптимізації діючих процесів або у випадках, коли структури процесів попередньо встановлені. Така оптимізація називається параметричною. У проблемі оптимізації технологічних процесів головне місце займає структурна

оптимізація, оскільки найбільше впливає на критерії оптимальності. Параметрична оптимізація при цьому має підпорядковане, хоча і дуже важливе значення.

Наведена класифікація методів оптимізації технологічних процесів виготовлення РЕА узгоджена з їх ієрархічними схемами з чотирма рівнями керування: з рівнями переходів, операцій, маршрутів і цілісних процесів виготовлення пристроїв. При цьому оптимізацію операцій можна виконувати на основі оптимізованих переходів, оптимізацію маршрутів – на основі оптимізованих операцій, а оптимізацію виготовлення пристроїв – на основі оптимізованих маршрутів виготовлення окремих вузлів і блоків. Цей шлях не завжди є раціональним, бо варіанти, оптимальні для якогось вибраного рівня, можуть бути далеко не оптимальними для іншого рівня.

Об'єктом керування є якість виробів, потрібного рівня якої досягають за допомогою керування якістю процесів виробництва. Таке керування зводиться до знаходження оптимальних за конкретних умов варіантів виробничого процесу як складної ергатичної системи з багатьма контурами керування локальних підсистем, кожна з яких характеризується певною функцією мети, своїм набором параметрів, показників якості та критеріїв оптимальності. Складність моделювання таких систем порівняно з іншими об'єктами істотно зростає. Це зумовлено тим, що структуру і функціонування реальних виробничих систем доволі складно описати звичними формальними моделями у вигляді сукупності алгебраїчних, логічних, диференціальних та інших рівнянь, які здатні наскрізно охоплювати всі стадії виробництва. Крім того, ці системи характеризуються стохастичністю поведінки, для прогнозування якої потрібна велика кількість апріорної інформації.

Сучасні підприємства – це складні виробничо-технічні ергатичні системи, імовірнісні властивості яких визначаються дією великої кількості дестабілізуючих факторів. Складність таких систем зумовлена не тільки їх структурною складністю, а і складністю задач, розв'язуваних під час функціонування. Це якісно складні системи, оскільки ґрунтуються на численних різномірних ефектах, що утворюють технологічні процедури формування заданих властивостей виробів. Кількість таких процедур у технологічному процесі середньої складності досягає рівня тисяч і десятків тисяч одиниць, на якість їх виконання накладається множина жорстких обмежень. Такі системи характеризуються невизначеністю стану, яка може зростати в міру збільшення стохастичних властивостей як самих технологічних процесів, так і властивостей матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, що використовуються у виробництві апаратури. До того ж людина – вагомий фактор стохастичності виробничих систем. З одного боку, людина є джерелом правильних рішень, що приймають під час проектування і оперативного керування системою, а з іншого, якщо

прийняті рішення неправильні або неоптимальні, вона може зумовити причини і наслідки появи істотних дестабілізуючих факторів. Ергатичні системи, якими є реальні процеси виробництва РЕА, на відміну від інших об'єктів дослідження, практично унеможливають виконання активних експериментів з втручанням у їхнє функціонування і отримання таким способом потрібної інформації у апіорі обумовленому фазовому просторі.

У цих умовах керування якістю продукції можна здійснювати моделюванням і подальшою оптимізацією процесів виробництва за відповідними критеріями на основі нагромадженої та оперативної інформації, одержаної в результаті поточного поопераційного контролю якості виробів на всіх стадіях конкретного технологічного процесу. Кінцевою метою цього, так званого пасивного, експерименту є отримання математичної моделі процесу забезпечення якості виробів у вигляді рівняння багатовимірної регресії. Складності вилучення з отриманого таким способом масиву статистичних даних потрібної для моделювання корисної інформації відомі. І все ж сьогодні пасивний експеримент забезпечує чи не єдину можливість створення адекватних математичних моделей, придатних для виконання реальних виробничих оптимізаційних завдань.

Залежно від призначення виробу, вимог до його якості та надійності, умов виробництва та експлуатації провадиться комплексний аналіз процесів його створення і експлуатації з урахуванням відповідних параметрів ефективності. При цьому виникає множина задач екстремального типу, які відрізняються набором варійованих параметрів і функцій відгуку. Так, якщо ефективність процесу оцінюють за допомогою двох критеріїв – імовірності виконання завдання $P_{вз}$ і сумарних виробничих витрат C_{Σ} , кожний з яких може бути головним, виникають два основних варіанти задачі оптимізації.

Перший варіант розглядається як пряма задача забезпечення заданого значення головного критерію функціональної ефективності – імовірності виконання завдання $P_{вз}^{\Phi}$ у ході проведення процесу за мінімальних сумарних витрат. У загальному вигляді цю задачу записують так:

$$\begin{aligned} P_{вз}^{\Phi} &\geq P_{вз.зад}^{\Phi}, \\ C_{\Sigma} &\rightarrow \min C_{\Sigma}, \\ C_{\Sigma,П} &\in G_{C_{\Sigma,П,доп}}, \\ C_{\Sigma,В} &\in G_{C_{\Sigma,В,доп}}, \\ C_{\Sigma,Е} &\in G_{C_{\Sigma,Е,доп}}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

де $P_{вз.зад}^{\Phi}$ – задане значення імовірності виконання завдання; $C_{\Sigma,П}$, $C_{\Sigma,В}$, $C_{\Sigma,Е}$ – варійовані параметри, аргументи функції C_{Σ} ; $G_{C_{\Sigma,П,доп}}$, $G_{C_{\Sigma,В,доп}}$, $G_{C_{\Sigma,Е,доп}}$ – області варіювання значень $C_{\Sigma,П}$, $C_{\Sigma,В}$, $C_{\Sigma,Е}$.

Другий варіант передбачає забезпечення допустимого значення головного критерію – сумарних виробничих витрат C_{Σ} у ході реалізації процесу забезпечення якості та надійності РЕА за максимально допустимого значення імовірності виконання завдання $P_{вз}^{\Phi}$. Ця зворотна задача має вигляд:

$$\begin{aligned} C_{\Sigma} &\leq C_{\Sigma, доп}, \\ P_{вз}^{\Phi} &\rightarrow \max P_{вз}^{\Phi}, \\ P_{вз.П}^{\Phi} &\in G P_{вз.П, доп}^{\Phi}, \\ P_{вз.В}^{\Phi} &\in G P_{вз.В, доп}^{\Phi}, \\ P_{вз.Е}^{\Phi} &\in G P_{вз.Е, доп}^{\Phi}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

де $C_{\Sigma, доп}$ – допустиме (задане) значення сумарних виробничих витрат; $P_{вз.П}^{\Phi}$, $P_{вз.В}^{\Phi}$, $P_{вз.Е}^{\Phi}$ – варійовані параметри, аргументи функції $P_{вз}^{\Phi}$; $G P_{вз}^{\Phi}$ – області варіювання.

Отже, варіюючи величини $C_{\Sigma(П,В,Е)}$ в першому випадку і величини $P_{вз(П,В,Е)}^{\Phi}$ – в другому випадку в межах прийнятих обмежень, можна знайти такі значення $C_{\Sigma(П,В,Е)}$ і $P_{вз(П,В,Е)}^{\Phi}$, які забезпечать значення заданих критеріїв у оптимальному варіанті заданого процесу.

Розв’язання як прямої, так і зворотної задачі потребує обґрунтування відповідних критеріїв оптимальності та розроблення математичних моделей формування показників функціональної та економічної ефективності процесів. Ці питання розглянуто у п’ятому і шостому розділах.

Складність і специфічність сучасних виробництв радіоелектронної апаратури, а відтак і систем забезпечення якості продукції, визначається не тільки їх великою структурною розмірністю, багатоконтурністю як внутрішнього, так і зовнішнього керування, різномірністю завдань, що потребують оперативного вирішення, а і апріорною невизначеністю загального стану ергатичної системи, яка зумовлена сумарною стохастичністю її природи, зокрема пов’язаною із наявністю людини як її елемента. У цих умовах методи глобальної оптимізації процесів забезпечення якості часто замінюються на методи обґрунтування доцільності під час знаходження раціональних варіантів, оскільки результати “глобальної” оптимізації систем через недосконалість наскрізних математичних моделей можуть виявитись неадекватними їх реальному стану. З наведених причин методи глобальної оптимізації стають малоефективними в результаті неминучих численних припущень і похибок формалізації, допущених під час наскрізного моделювання таких систем. Здебільшого їх використовують під час оптимізації окремих процедур і цілих процесів з обмеженою кількістю кроків за наявності адекватних математичних моделей і відповідних локальних критеріїв. Глобальні критерії переважно є критеріями економічними. Їх застосовують під час розв’язання

економічних оптимізаційних задач, зокрема, у разі оптимізації сумарних витрат на виконання процесів проектування, виробництва та експлуатації апаратури. Аналіз свідчить, що розв'язання глобальних оптимізаційних задач у разі складних виробничих систем практично можливе тільки для їх детермінованих варіантів. При цьому використовують числові методи знаходження екстремуму.

Загальними і найприйнятнішими методами оптимізації сучасних складних технологічних процесів виготовлення РЕА є методи, що ґрунтуються на алгоритмах випадкового пошуку. Ці методи застосовують для розв'язування складних за структурою багатоекстремальних завдань, які практично не розв'язуються методами лінійного чи нелінійного програмування. Вони не накладають особливих обмежень на параметри оптимізації, критерії оптимальності й області існування розв'язків.

Отже, проблема багатокритеріальної та багатопараметричної оптимізації технологічних процесів виробництва апаратури за критеріями якості та надійності потребує подальших теоретичних і практичних досліджень.

Зробимо загальний висновок до цього короткого огляду.

На сучасному етапі розвитку країни необхідно істотно підвищити ефективність виробництва високоякісної радіоелектронної апаратури, забезпечити її конкурентоспроможність як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках з раціональним використанням задіяних ресурсів і зменшенням сумарних виробничих витрат. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури, досвіду роботи науково-дослідних організацій і підприємств – виробників РЕА різного призначення, а також результатів її використання за призначенням свідчить, що необхідно переглянути підходи до вирішення цієї проблеми з розробленням і впровадженням нових ефективних техніко-економічних стратегій. Науково обґрунтованою є доцільність переходу від традиційних принципів забезпечення якості апаратури з локальним покращенням її параметрів на стадіях проектування і під час виконання технологічних і контрольних процедур у процесі виробництва до принципів комплексної оптимізації і керування ними упродовж її повного життєвого циклу. В зв'язку з цим актуальним є подальший розвиток концепції, теорії і методів комплексної оптимізації і керування процесами забезпечення якості та надійності РЕА за сучасними техніко-економічними критеріями.

Основою виконання комплексу цих різнопланових завдань має стати пласт наукових досліджень процесів виникнення дефектів та їх моделювання, явищ емергентності багатокрокових технологічних систем, розвиток теорії потоків виробничих дефектів, їх ущільнення і розрідження під час виконання технологічних і контрольних процедур, теорії перетворення цих потоків на потоки відмов апаратури в процесі експлуатації, теорії та методів прогнозування надійності на всіх стадіях життєвого циклу, оцінювання ефективності процесів тощо. Деякі результати цих досліджень викладено в монографії.

Розділ 2

СТРУКТУРНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ І ПАРАМЕТРИЧНО-СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РЕА

2.1. Структурна формалізація процесів проектування, виробництва та експлуатації РЕА

В умовах сьогодення, коли постійно зростають вимоги до якості та надійності РЕА різного призначення, сучасні теорії, методології і способи її створення потребують покращення їх показників на всіх стадіях життєвого циклу. Сьогодні актуалізується проблема підвищення ефективності процесів забезпечення якості та надійності їх комплексною оптимізацією за конкретно встановленими для кожної стадії техніко-економічними критеріями.

Процеси створення та експлуатації сучасної радіоелектронної апаратури характеризуються значною складністю їх реалізації, моделювання та оптимізації. Це пояснюється тим, що ці процеси об'єднують велику кількість різноманітних стадій, кожна з яких, своєю чергою, складається з множини проектних, технологічних та контрольних процедур, що виконуються послідовно або паралельно і відрізняються за структурою і цільовою функцією. Ці стадії процесів можуть виконуватись сумісно або відокремлено в часі і в просторі. Вони характеризуються різною тривалістю, можуть виконуватись на одному або на різних підприємствах. Тому їх розглядають як складні ієрархічні багаторівневі системи забезпечення якості $S_{жц}$. Формалізовану структуру такої системи зображено на рис. 2.1.

Зазначені структури (рис. 2.1) складаються з таких елементів:

$S_{стп}$ – підсистема системотехнічного проектування;

$S_{схп}$ – підсистема схемотехнічного проектування;

$S_{кп}$ – підсистема конструкторського проектування;

$S_{тп}$ – підсистема технологічного проектування;

$S_{то,i}, i = \overline{1, n}$ – технологічна підсистема формування якості;

$S_{ко,i}, i = \overline{1, n}$ – підсистема контролю якості;

$S_{не}$ – підсистема нормальної експлуатації виробів;

S_p – підсистема ремонту;

$S_{пр}$ – підсистема профілактики;

$S_R, i = \overline{1, n}$ – підсистеми забезпечення інтелектуальними, матеріальними, енергетичними та іншими ресурсами.

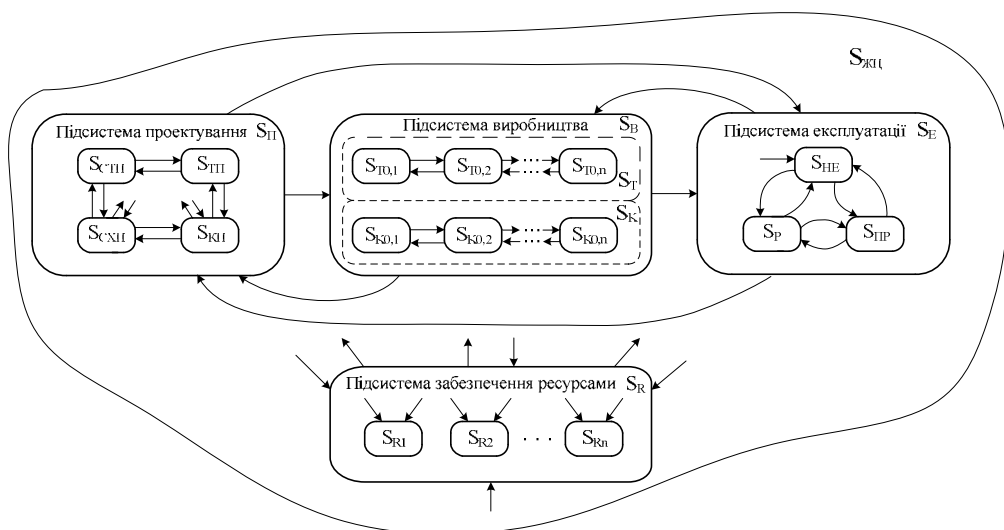


Рис. 2.1. Структура системи забезпечення якості РЕА упродовж життєвого циклу: $S_{ЖЦ}$, $S_{П}$, $S_{В}$, $S_{Е}$ і $S_{Р}$ – підсистеми проектування, підсистеми виробництва (у складі технологічної підсистеми $S_{Т}$ і підсистеми контролю $S_{К}$), підсистеми експлуатації і підсистеми забезпечення ресурсами, відповідно

Кожна з перерахованих підсистем складається з підсистем нижчого ієрархічного рівня, має специфічну структуру і характеризується відповідною множиною вхідних, вихідних та інших параметрів.

До характерних особливостей таких систем передусім належить послідовний поділ основної, або генеральної, задачі на підзадачі на підставі принципу декомпозиції. Цей принцип передбачає створення рівнів системи, які відповідають певним стадіям процесу. На кожному з цих рівнів процес розділяється на незалежні функціонально закінчені етапи. Така незалежність передбачає виконання умови, за якою рішення на кожному етапі приймають лише після закінчення робіт на попередньому етапі. У такий спосіб на кожному рівні створюється горизонтальна декомпозиція системи.

Зв'язок між рівнями має ієрархічний характер. Найвищим рівнем є рівень створення цілого виробу, найнижчим – рівень створення простої деталі. Ієрархічний рівень з відповідними зв'язками між ними є складовою вертикальної декомпозиції.

Враховуючи такі позиції, процес створення і експлуатації виробу та поширення інформації під час проектування, виробництва і експлуатації РЕА зображають у вигляді системи життєвого циклу $S_{ЖЦ}$:

$$S_{ЖЦ} = \{S_{П}; S_{В}; S_{Е}; S_{Р}\}. \quad (2.1)$$

Підсистеми пов'язані між собою каналами передавання у прямому і зворотному напрямках інформації у вигляді множин показників якості виробів, які формують підсистеми. Така послідовність притаманна процесам створення і експлуатації як складних систем і комплексів, так і порівняно простих пристроїв.

Кожна із підсистем, своєю чергою, є складною системою.

Системи проектування, виробництва та експлуатації радіоелектронної апаратури за суттю є складними організаційно-технічними інформаційними ергатичними системами, призначеними для створення нових видів техніки і забезпечення їх надійності під час експлуатації. Технічні аспекти функціонування таких систем визначаються комплексом процесів розроблення електричних схем, конструкцій і технологій відповідних технологічних процесів виготовлення пристроїв і процесів забезпечення збереження їх властивостей під час експлуатації. Інформаційні аспекти їхньої роботи полягають у постійному обміні оперативною інформацією між ними як у прямому, так і в зворотному напрямках. Це канали передавання інформації про види й асортимент наявних і використовуваних матеріалів та напівфабрикатів, електричні, конструкційні та технологічні характеристики деталей та вузлів власного виробництва, типи комплектуючих виробів, методи структуро- і формоутворення, інші технологічні процедури, а також про методи і результати контролю якості виробів та виконання профілактичних робіт під час їх експлуатації.

Вихідним інформаційним продуктом системи проектування S_{Π} є комплект схемних, конструкторських та технологічних розробок у вигляді програм, креслень, інструкцій та алгоритмів, які за допомогою відповідних носіїв інформації спрямовуються у систему виробництва $S_{\text{В}}$. Це пряме передавання інформації. У зворотному напрямку від системи $S_{\text{В}}$ в систему S_{Π} передається інформація про хід виробництва, виявлені особливості технологічних процесів, результати контролю та випробувань виробів, зокрема і випробувань на надійність. За цією інформацією оперативно коректується проектна документація, зокрема електричні схеми, конструкції та технології виробництва апаратури. Аналогічні інформаційні зв'язки існують і між окремими підсистемами систем S_{Π} , $S_{\text{Е}}$ і S_{R} .

Проектування РЕА є процесом ітераційним, і для наближення до кінцевого варіанта проектного рішення багаторазово виконуються дослідницькі процедури, провадиться великий обсяг контрольних перевірок і коректуються отримані результати. Підсистема проектування РЕА

$$S_{\Pi} = \{S_{\text{СТП}}; S_{\text{СХП}}; S_{\text{КП}}; S_{\text{ТП}}\}$$

характеризується множиною такого змісту:

– системотехнічне проектування, яке передбачає аналіз системотехнічних вимог до комплексів, що підлягають проектуванню, визначення основних принципів їх функціонування, розроблення структурних схем;

- схемотехнічне проектування, яке передбачає розроблення функціональних і принципівих схем;
- конструкторське проектування, яке передбачає вибір форми, компонування і розміщення конструктивів, трасування між'єднань, виготовлення конструкторської документації;
- технологічне проектування, яке передбачає розроблення маршрутної та операційної технологій, вибір оснащення, визначення технологічних баз.

Типова послідовність проектування великих інтегральних схем така:

- приладно-технологічне проектування, яке передбачає вибір базової технології, розрахунок дифузійного профілю, вибір топології компонентів;
- схемотехнічне проектування, яке передбачає синтез принципової електричної схеми, оптимізацію параметрів елементів, статистичний аналіз стосовно типових комірок VLSI;
- функціонально-логічне проектування, яке передбачає синтез комбінаційних схем, реалізацію пам'яті, синтез тестів з контролю і діагностування, виявлення критичних значень сигналів;
- конструкторсько-технологічне проектування, яке передбачає розміщення елементів, трасування між'єднань, перевірки відповідності топологічної та електричної схем, розшарування, виготовлення креслень пошарової топології.

Необхідно зазначити, що в цю послідовність інколи невіправдано не входить розроблення програмного забезпечення функціонування і контролю працездатності систем та комплексів як обов'язкового блока системотехнічного проектування або як самостійного етапу.

Відомо й багато інших варіантів структуризації стадій і процесів проектування РЕА.

Вирішення проектних проблем і сьогодні є складним завданням. Тому створення сучасних систем автоматизованого проектування ґрунтується на використанні режиму діалогу проєктанта з ЕОМ, використанні CALS та інших технологій. Право вибору конкретних рішень у найскладніших, неформальних ситуаціях все ще залишається за інженером. Ці питання достатньо відображено в літературі.

Хоч типові технології широко використовують під час виробництва РЕА, типових структур технологічних процесів практично не існує. Впроваджуючи у виробництво нову техніку, структури процесів вибирають так, щоб досягти високих показників якості виробів і ефективності виробництва за мінімуму сумарних виробничих витрат. Характерно, що повний технологічний процес складається з певних його частин – стадій, під час яких виконуються передбачені структурою технологічні та контрольні процедури.

Процеси можуть мати послідовну, паралельну і змішану структури з параметрами $X_{\text{вхСВ}}$ і $X_{\text{вихСВ}}$. Здебільшого в них виділяють стадію вхідного

контролю матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, стадії структуро- і формоутворення, збирання і електричного монтажу, стадію регулювання і технологічного припрацювання виробів $S_{вх.к}$, $S_{то1} \dots S_{топ}$, S_p і $S_{т.п}$, які в сукупності визначають підсистему виробництва S_B :

$$S_B = \{S_{вх.к}, S_{то1}, S_{то2}, \dots, S_{топ}, S_p, S_{т.п}\}. \quad (2.2)$$

Керування процесами формування та контроль заданих властивостей виробів розглянемо в наступних розділах.

На стадії експлуатації РЕА проявляються її властивості, закладені під час проектування і виготовлення. Як відомо, надійність виробів залежить від умов, у яких їх використовують. Тому важливим завданням користувачів РЕА є виконання усіх вимог щодо умов експлуатації, для яких вона призначена, – як зовнішніх умов, так і дотримання передбачених режимів роботи апаратури. Увесь цей комплекс заходів визначає якість експлуатації виробів. У разі порушення цих вимог високі показники якості, закладені під час проектування і виготовлення РЕА, можуть втрачатись під час експлуатації.

Підсистема експлуатації S_E характеризується структурою:

$$S_E = \{S_{НЕ}; S_p; S_{пр}\}, \quad (2.3)$$

де $S_{НЕ}$ – підсистема нормальної експлуатації; $S_{пр}$ – підсистеми профілактики, S_p – підсистема ремонту.

Характерною особливістю експлуатації виробів є те, що на цій стадії життєвого циклу повною або неповною мірою витрачається їх ресурс й виникає більшість відмов. Саме тому під час експлуатації набувають конкретних числових значень показники надійності апаратури – показники її безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності, пристосованості до зберігання тощо. Практично всі показники надійності РЕА є випадковими величинами, тому на стадії експлуатації їх оцінюють переважно статистичними методами.

Отже, функціонування підсистем проектування, виробництва та експлуатації РЕА можна розглядати як результат синтезу підсистем нижчого рівня, кожна з яких описується множинами параметрів, тобто множинами багатовимірних векторів. Суть цих векторів здебільшого стохастична. Частина з них характеризує параметри виробів, які формуються на кожній стадії їх життєвого циклу. Інші відображають потоки інформації, які використовують для забезпечення зворотного зв'язку між окремими стадіями процесу створення нової апаратури та її використання за призначенням. Конкретний зміст цієї інформації пояснимо нижче.

Підсистема $S_R = [S_{R_1}, S_{R_2}, \dots, S_{R_n}]$ – забезпечення ресурсами всіх стадій проектування, виробництва та експлуатації РЕА упродовж її життєвого циклу, формує науковий і техніко-економічний потенціал (П) організацій і підприємств, що розробляють і виготовляють апаратуру із заданим рівнем якості та надійності (рис. 2.2). Ця підсистема структурно складається з множини підсистем, основні з яких – підсистеми забезпечення матеріальними R_1 , енергетичними R_2 , інформа-

ційними R_3 , інтелектуальними R_4 , технологічними R_5 , метрологічними, комунікаційними, трудовими й іншими ресурсами. Зокрема, під інтелектуальними ресурсами, які останнім часом набувають вирішального значення в розвитку економіки країни, розуміють ресурси, що визначаються науково-інтелектуальним потенціалом розробників, виробників і користувачів нової техніки, їх розумом, здатністю масштабно і перспективно мислити, пропонувати і реалізувати нові технології, захищаючи їх авторським та патентним правом.

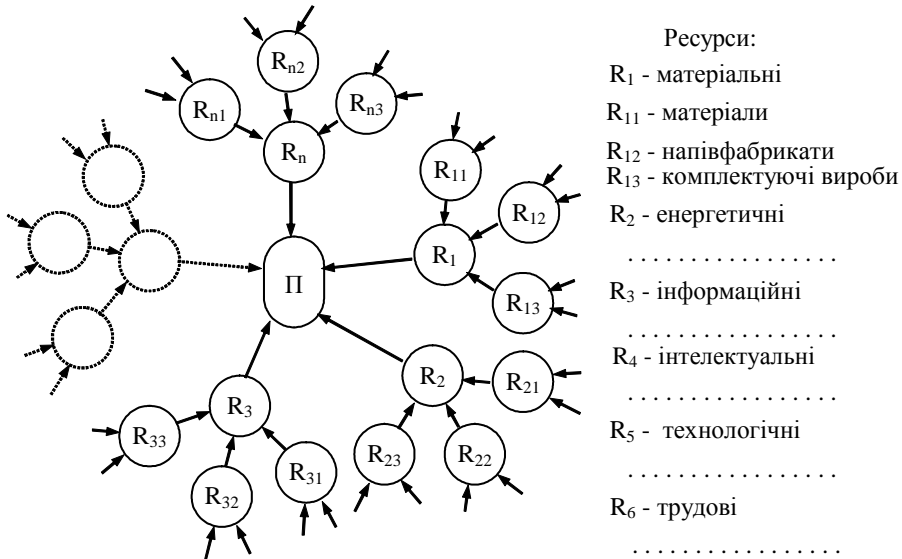


Рис. 2.2. Структура наукового і техніко-економічного потенціалу

Приклад використання ресурсів під час забезпечення якості виробів на стадіях проектування, виробництва й експлуатації РЕА наведено на рис. 2.3. Суцільними лініями позначено основні й регулярні напрями використання ресурсів, пунктирними – неосновні й нерегулярні. В [3] наведено результати досліджень використання ресурсів з погляду їхнього впливу на конкретні показники якості виробів.

Ресурси підприємства можна розглядати як керовані підсистеми, кожна з яких характеризується вектором вихідних параметрів

$$\begin{aligned}
 R_1 &= [R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1k}]; \\
 R_2 &= [R_{21}, R_{22}, \dots, R_{2k}]; \\
 &\dots \dots \dots \\
 R_n &= [R_{n1}, R_{n2}, \dots, R_{nk}],
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

де кожен елемент множин R_{ij} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, k}$ є вектором підсистеми нижчого рівня декомпозиції.

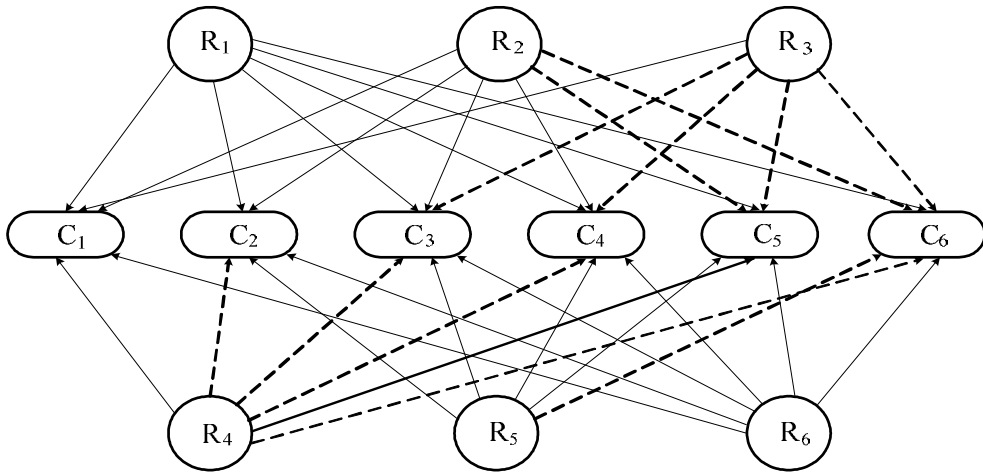


Рис. 2.3. Використання ресурсів у процесі забезпечення якості РЕА на стадіях життєвого циклу: C_1 – проектування; C_2 – виготовлення деталей, збирання, монтаж; C_3 – регулювання; C_4 – технологічне припрацювання; C_5 – контроль якості; C_6 – гарантійне обслуговування

Для розроблення математичних моделей забезпечення якості на всіх стадіях життєвого циклу апаратури потрібно створити необхідне теоретичне й методологічне підґрунтя. Сьогодні теорія, методи і методики математичного моделювання локальних технологічних процесів виробництва РЕА, що в сукупності становлять повні процеси її виробництва, достатньо розроблені. Існує багато підходів до створення таких моделей з високим ступенем адекватності, фізичності й універсальності, з потужним програмним забезпеченням. Відомо немало робіт, що стосуються оптимізації процесів обслуговування виробів під час експлуатації. Теорія і методологія наскрізного моделювання повних технологічних процесів виробництва РЕА перебуває на стадії активних досліджень і пошуків.

Найменш розроблені сьогодні методи моделювання і оптимізації проектування радіоелектронної апаратури за критеріями якості, надійності та сумарних витрат на їхнє забезпечення. Проектування загалом є доволі складним ергатичним процесом, що характеризується великою різноманітністю розв'язуваних задач, структурною складністю, різноманітністю інформаційних потоків, невизначеністю багатьох оцінок якості, складністю формалізації та моделювання. Тому створення досконалої теорії, методів наскрізного моделювання і комплексної оптимізації процесів проектування сучасної складної радіоелектронної апаратури сьогодні все ще залишається доволі проблематичним, хоча роботи в цьому напрямі інтенсивно проводяться.

Системи забезпечення якості радіоелектронної апаратури упродовж її життєвого циклу характеризуються різним рівнем апріорної невизначеності причинно-наслідкових зв'язків між параметрами підсистем, різною фізичною сутністю показників якості, специфічними критеріями її оцінювання, методами і способами забезпечення, а також різномірністю використовуваних ресурсів. Оскільки на властивості виробів і на показники якості постійно впливає велика кількість як внутрішніх, так і зовнішніх дестабілізуючих факторів стохастичної природи, то більшість цих показників також стохастичні. Досліджувати і оптимізувати їх доцільно лише з використанням багатопараметричних імовірнісних моделей, які здатні враховувати парціальні внески кожної підсистеми у формування показників якості готових виробів.

2.2. Формувальна здатність і керованість процесів забезпечення якості

Під час виконання технологічних процедур якість формують, надаючи виробу необхідних властивостей, які уможливають його використання за призначенням. Ці процедури супроводжуються появою виробничих дефектів внаслідок дії на процес великої кількості дестабілізуючих чинників. Рівень дефектності продукції є показником якості виробництва. Тому формувальну здатність технологічних процесів можна оцінювати рівнем сумарної дефектності, який визначається ефективністю проведення технологічних і контрольних процедур на всіх стадіях.

Із урахуванням можливості керувати технологічними процесами, цілеспрямовано змінюючи параметри технологічних і контрольних процедур з метою забезпечення належного рівня якості виробів, більшість процесів можна зарахувати до однієї з трьох груп.

1. Активно керовані процеси з найбільшою формувальною здатністю.

Їх назва визначає основну цільову функцію. Керують цими процесами, змінюючи режими процесів структуро- і формоутворення, складання, монтажу, регулювання виробів тощо, що забезпечує необхідну точність їх параметрів, для формування яких призначені ці процеси. Тут і далі показниками якості є:

P_v – імовірність введення дефектів під час виконання технологічної процедури;

P – імовірність правильного контролю якості виробів;

$P_{пр}$ – імовірність пропуску дефектів;

$P_{вя}$ – імовірність виявлення дефектів;

$P_{деф}$ – імовірність наявності дефектів.

Детально ці показники розглянуто в розділі 3.

Активно керовані процеси характеризуються такими значеннями показників якості:

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

де k – номер кроку технологічного процесу; i – номер показника якості.

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

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

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

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

3. Некеровані процеси без формувальної здатності.

Параметри цих процесів є постійними величинами:

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

Вхідні та вихідні параметри підсистем, а також параметри керування ними для реальних багатокрокових процесів доцільно подавати для розрахунків показників якості виробів у матричному вигляді [17]. Залежно від керованості процесів, їх параметри можна згрупувати в діагональні, смужкові та верхньокутові матриці.

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

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & a_{nn} \end{pmatrix}; \tag{2.5}$$

$$a_{ki} = a_{kk} \delta_{ki} = \begin{cases} a_{kk}, & \text{якщо } k = i \\ 0, & \text{якщо } k \neq i \end{cases}$$

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

У смужкові матриці B групуються параметри пасивно керованих процесів. Тоді

$$B = \begin{pmatrix} 0 & b_{21} & b_{32} & b_{41} & \dots & b_{n1} \\ \vdots & 0 & b_{32} & b_{42} & \dots & b_{n2} \\ \vdots & \vdots & 0 & b_{43} & \dots & b_{n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & b_{n,n+1} \end{pmatrix}; \tag{2.6}$$

$$b_{k,i} = 0, \text{ якщо } i = \overline{1, l};$$

$$b_{k,i} \neq 0, \text{ якщо } i = \overline{l+1, k-l},$$

де l – ціле число, що визначає смуги ненульових елементів матриці B ; $l = \overline{1, k}$.

Верхньокутова матриця C параметрів некерованих процесів характеризується нульовими або ненульовими значеннями своїх елементів $C_{k,i}$. У цьому випадку вони є константами:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & c_{21} & c_{32} & c_{41} & \cdots & c_{n1} \\ \vdots & 0 & c_{32} & c_{42} & \cdots & c_{n2} \\ \vdots & \vdots & 0 & c_{43} & \cdots & c_{n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & c_{n,n-1} \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

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

$$D = [d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0n}]^T. \quad (2.8)$$

Вид матриць параметрів активно керованих, пасивно керованих і некерованих процесів визначається за допомогою табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Характеристика матриць A, B, C, D

	Вид матриці			
П а	$D = \ d_{0,i}\ $	$A = \ a_{k,i}\ $	$B = \ b_{k,i}\ $	$C = \ c_{k,i}\ $
Р а	$P_{\text{деф},0,i} \neq 0$	$P_{\text{пр},0,i} \neq 0$	$P_{\text{пр},k-1,i} \neq 0$	$P_{\text{пр},k-1,i} \neq 0$
М е	$P_{0,i} \neq 0$	$P_{\text{в},k,i} \neq 0$	$P_{\text{в},k,i} \neq 0$	$P_{\text{в},k,i} = 0$
Т р	$P_{\text{пр},0,i} \neq 0$	$P_{k,i} \neq 0$	$P_{k,i} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$	$P_{k,i} = 0$
И	$P_{\text{вя},0,i} \neq 0$	$P_{\text{пр},k,i} = 0$	$P_{\text{пр},k,i} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$	$P_{\text{пр},k,i} \neq 0$
		$P_{\text{вя},k,i} \neq 0$	$P_{\text{вя},k,i} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$	$P_{\text{вя},k,i} = 0$

Повну матрицю параметрів процедур формування якості виробів M отримують, підсумовуючи матриці-складові D, A, B, C :

$$M = D + A + B + C. \quad (2.9)$$

Отже, матриці D, A, B, C можна розглядати як блоки матриці M, а матрицю M – як синтезовану матрицю такого вигляду:

$$M = \begin{pmatrix} d_{01} & a_{11} & b_{21} & b_{31} & b_{41} & c_{51} & c_{61} & \dots & c_{n1} \\ d_{02} & 0 & a_{22} & b_{32} & b_{42} & b_{52} & c_{62} & \dots & c_{n2} \\ d_{03} & \dots & 0 & a_{33} & b_{43} & b_{53} & c_{63} & \dots & c_{n3} \\ d_{04} & \dots & & 0 & a_{44} & b_{54} & b_{64} & \dots & c_{n4} \\ d_{05} & \dots & & \vdots & 0 & a_{55} & b_{65} & \dots & c_{n5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & & & & \vdots \\ d_{0_{n-2}} & \vdots & \vdots & \vdots & & & & & c_{n,n-2} \\ d_{0_{n-2}} & \vdots & \vdots & \vdots & & & & & b_{n,n-2} \\ d_{0_n} & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Як показує дослідження виробництва широкої номенклатури радіовимірювальних приладів, ширина смуги ненульових елементів повної матриці параметрів активно керованих, пасивно керованих і некерованих процесів не є постійною, а змінюється у ході технологічного процесу. Її ширина тим більша, чим істотніший вплив k-ї технологічної або контрольної операції на параметри виробу, сформовані на попередніх кроках технологічного процесу. Значення елементів цієї матриці зменшуються з віддаленням від основної діагоналі.

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

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0.55 & 0.50 & 0.14 & 0.12 & 0.20 & 0.07 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0.80 & 0.40 & 0.30 & 0.20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0.37 & 0.22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0.66 & 0.13 & 0.10 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0.45 & 0.47 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 1 & 0.44 & 0.12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 1 & 0.23 & 0.06 & 0 & & 0 \\ & & & & & & & 1 & 0.17 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 1 & 0.67 & 0.33 & 0 \\ & & & & & & & & & 1 & 0.77 & 0 \\ & & & & & & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 1 \end{pmatrix},$$

де 1 – виготовлення заготовок; 2 – підготовка поверхні механічним способом; 3 – підготовка поверхні хімічним способом; 4 – виконання рисунка; 5 – нанесення

лаку; 6 – свердління отворів; 7 – хімічне міднення; 8 – гальванічне нарощування; 9 – покриття сріблом або олово-свинцем; 10 – травлення міді; 11 – маркування.

З наведеного прикладу бачимо, що за рахунок пасивно керованих процесів глибина контролю якості в першій половині технологічного процесу суттєво більша, ніж у другій. Отже, смуга ненульових значень елементів матриці збіжна. Ця особливість характерна і для інших матриць параметрів реальних технологічних процесів.

Ймовірність пропуску дефектів за кожним з параметрів під час вихідного контролю якості визначаються матрицею-стовпчиком

$$P_{np,n} = [P_{np,n1}, P_{np,n2}, \dots, P_{np,nn}]^T. \quad (2.11)$$

Елементи цієї матриці розраховують за допомогою системи рекурентних залежностей:

$$\begin{aligned} P_{np,n1} &= \{P_{np,n-1,1} + (1 - P_{np,n-1,1})P_{в,n1}\}(1 - P_{n1}); \\ P_{np,n2} &= \{P_{np,n-1,2} + (1 - P_{np,n-1,2})P_{в,n2}\}(1 - P_{n2}); \\ &\dots \\ P_{np,nn} &= \{P_{деф.0,n}(1 - P_{0n}) + [1 - P_{деф.0,n}(1 - P_{0n})]P_{в,nn}\}(1 - P_{nn}). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Стан виробів на виході технологічного процесу характеризується об'єднанням подій А, В, С, D пропуску дефектів за кожним з n параметрів, тому дефектність виробів за всіма параметрами на виході технологічного процесу описується ймовірністю $P_{np,n,(1,2, \dots, n)}$:

$$\begin{aligned} P_{np,n,(1,2, \dots, n)} &= P_{np,n} = \sum_{1 \leq i \leq n} P_{np,ni} - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P_{np,ni_1} P_{np,ni_2} + \dots \rightarrow \\ &\rightarrow \dots + (-1)^{S-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_S \leq n} P_{np,ni_1} P_{np,ni_2} \times \dots \times P_{np,ni_S} + \dots \rightarrow \\ &\rightarrow \dots + (-1)^{n-1} P_{np,n1} P_{np,n2} \times \dots \times P_{np,nn}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

де ймовірності пропуску дефектів на n-му кроці технологічного процесу за i-м параметром, $j = \overline{1, k}$, визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} P_{np,n1} &= \left\langle \left[P_{np,n-2,1} + (1 - P_{np,n-2,1})P_{в,n-1,1} \right] (1 - P_{n-1,1}) + \right. \\ &\quad \left. + \left\{ 1 - \left[P_{np,n-2,1} + (1 - P_{np,n-2,1})P_{в,n-1,1} \right] (1 - P_{n-1,1}) \right\} P_{в,n1} \right\rangle (1 - P_{n1}); \\ P_{np,n2} &= \left\langle \left[P_{np,n-2,2} + (1 - P_{np,n-2,2})P_{в,n-1,2} \right] (1 - P_{n-1,2}) + \right. \\ &\quad \left. + \left\{ 1 - \left[P_{np,n-2,2} + (1 - P_{np,n-2,2})P_{в,n-1,2} \right] (1 - P_{n-1,2}) \right\} P_{в,n2} \right\rangle (1 - P_{n2}); \\ &\dots \\ P_{np,n,n} &= \left\langle P_{np,n-1,n} + (1 - P_{np,n-1,n})P_{в,n,n} \right\rangle (1 - P_{n,n}). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ймовірність виходу бездефектних виробів $P_{\text{бд.п}}$ знаходять з рівняння:

$$P_{\text{бд.п}} = 1 - P_{\text{пр.п.}(1,2, \dots, n)} \quad (2.15)$$

Цю універсальну модель можна використовувати для процесів будь-якої структури і складності.

Наведені ймовірнісні моделі процесів формування дефектності в серійному виробництві радіоелектронних пристроїв є моделями адаптивними, які складають, використовуючи стохастичні залежності показників якості від параметрів технологічних та контрольних процедур на основних стадіях виробництва. Вони характеризуються тим, що їх параметри можна послідовно наближати до параметрів об'єктів без використання таких класичних методів, як, наприклад, метод множинної кореляції, дисперсійного аналізу тощо. Для реальних багатокрокових і багатопараметричних процесів застосовувати такі методи практично неможливо. Матрична структура моделей дає змогу працювати з ними в діалоговому режимі, що підвищує оперативність внесення корекцій, визначення необхідних ресурсів і розв'язання оптимізаційних задач.

2.3. Виконання завдання системами забезпечення якості виробів і його оцінювання

У сучасних умовах серед традиційних техніко-економічних показників найважливішого значення набувають показники якості продукції, які визначають її потенційну конкурентоспроможність як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Проектування, виготовлення і експлуатацію все більше розглядають у ракурсі гарантованого виконання ними вимог щодо забезпечення заданих показників якості виробів за одночасного дотримання норм і вимог стосовно інших показників. На таких концептуальних засадах будується сучасна науково-технічна стратегія створення нової високоякісної техніки. Численні різноманітні задачі, які при цьому виникають, потребують системного підходу до їх формулювання і знаходження оптимальних рішень. Зважаючи на це, потрібно розробити методологію і придатні для практики методи оцінювання, моделювання і комплексної оптимізації технологічних процесів, щоб забезпечити їх ефективність, тобто належний рівень якості виробів за умови раціонального використання усіх видів ресурсів.

Ефективність системи забезпечення якості радіоелектронної апаратури, як і інших технічних пристроїв, – одна з головних її характеристик, що визначається її спроможністю вирішувати поставлене перед нею завдання проектування і виготовлення потрібної кількості продукції із заданими техніко-економічними параметрами. У теорії ефективності цю властивість розглядають у двох аспектах –

як функціональну і як економічну ефективність. У цій роботі функціональну ефективність характеризуватимемо прямим ефектом, який досягається під час функціонування системи, випуском радіоелектронних пристроїв із заданим рівнем якості у широкому розумінні цього слова. Економічна ефективність визначається сумарними витратами на забезпечення якості виробів під час їх проектування, виготовлення та гарантійного обслуговування. Ефективність таких систем є комплексною характеристикою, яка поєднує їх функціональну ефективність з економічною ефективністю і саме у такому вигляді використовується як об'єкт моделювання і комплексної оптимізації виробничих систем. Розгляд цих складових окремо є суто формальним.

Техніко-економічний рівень радіоелектронної апаратури повністю визначається можливостями процесу його створення, тобто якістю проектно-технологічної системи S . Незважаючи на цей цілком очевидний факт, доводиться констатувати, що в літературі моделюванню і оптимізації процесів забезпечення якості приділено недостатньо уваги.

Якість функціонування проектно-технологічної системи можна кількісно оцінювати різними показниками, головним з яких є ефективність. Показником ефективності такої системи здебільшого вибирають таку її числову характеристику, за допомогою якої оцінюють ступінь її пристосованості до виконання поставлених перед нею завдань. Критерієм ефективності слугує умова, яку повинен задовольняти показник ефективності функціонування системи.

Під час дослідження ефективності проектно-технологічної системи виникають як мінімум два завдання: пряме і зворотне. Пряме – завдання аналізу, яке полягає в оцінюванні результату функціонування системи за відомих її властивостей і умов функціонування з обчисленням і аналізуванням показників ефективності. Зворотне – завдання синтезу, що націлене на визначення характеристик системи, за яких ефективність буде максимальною або оптимальною в сенсі вибраного критерію.

Згідно із загальними принципами оцінювання якості складних систем критерію ефективності системи S можна надати такий зміст.

Вектор показників, які характеризують якість процесу проектування і виготовлення апаратури, можна подати багатокомпонентним n -вимірним вектором Q :

$$Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T. \quad (2.16)$$

Фізичний зміст компонент q_1, q_2, \dots, q_n вектора Q визначається метою виконання процесу і його здатністю виконувати поставлені завдання, наприклад: точність розрахунків під час проектування схем, конструкцій і технологічних операцій, оцінювання шорсткості поверхонь деталей після механічної обробки, якісні показники електропровідного рисунка друкованих плат, по-

хибки формування дифузійного шару, дефектність паяних з'єднань тощо. Вектором допустимих значень показників $q_1^d, q_2^d, \dots, q_n^d$ є:

$$Q^d = [q_1^d, q_2^d, \dots, q_n^d]^T. \quad (2.17)$$

Загалом вектори Q і Q^d випадкові, а їх компоненти характеризуються неперервними розподілами і тому як показник ефективності процесу доцільно використовувати імовірність виконання завдання $P_{в.3}$:

$$P_{в.3} = P\{Q \in \{Q^d\}\}. \quad (2.18)$$

Як зазначено вище, створення радіоелектронної апаратури можна розглядати як деяку множину проектних, технологічних і контрольних операцій, які реалізує система забезпечення якості продукції під час її створення. Мета діяльності цієї організаційної сукупності людей та матеріальних засобів одна – виконати цей процес так, щоб забезпечити якість виробів за обумовлених або мінімальних витрат. До того ж визначальною характеристикою такої системи є її ефективність. Імовірність $P_{в.3}$ можна розглядати як універсальну міру ефективності такої проектно-технологічної експлуатаційної системи S . Її універсальність і зручність полягає у тому, що її можна використовувати як показник ефективності формалізованого процесу забезпечення якості під час його покрокового і наскрізного моделювання.

Далі покажемо, що введення поняття такого процесу і його моделювання дає змогу аналітично відобразити динаміку формування якості виробів упродовж усього життєвого циклу, знаходити критичні точки в його структурі в аспекті забезпечення якості, виконувати завдання комплексної оптимізації і прогнозу якості виробів, починаючи з найперших стадій проектування і виробництва, як-от вхідний контроль матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, і закінчуючи завершальними стадіями.

Структура процесу забезпечення якості виробів на стадії виготовлення адекватна технологічному процесу, але, на відміну від нього, зображується послідовністю формалізованих процедур формування та контролю якості на всіх стадіях виробництва з використанням єдиного універсального критерію якості. Таким критерієм є рівень дефектності об'єктів виробництва – деталей, вузлів, блоків та інших конструкційно-технологічних компонентів, а також виробу загалом після виконання відповідних технологічних та контрольних процедур.

Вимоги до якості завжди мають односторонні обмеження і тому, якщо область допустимих значень показників q_1, q_2, \dots, q_n обмежити граничними значеннями $q_1^r, q_2^r, \dots, q_n^r$, вектор яких Q^r , то імовірність виконання системою S поставленого завдання щодо забезпечення якості $P_{в.3}$ визначиться умовою:

$$P_{в.3} = P(Q < Q^r), \quad (2.19)$$

або

$$P_{в.з} = P(Q > Q^r).$$

Виникнення дефектів під час проектування, виробництва й експлуатації виробів є подією, протилежною до події відсутності дефектів, і враховуючи стохастичну природу цих подій, імовірність появи дефектів $P_{\text{деф}}$ можна визначити так

$$P_{\text{деф}} = 1 - P_{в.з},$$

тобто

$$P_{\text{деф}} = 1 - P(Q < Q^r) = P(Q > Q^r), \quad (2.20)$$

або

$$P_{\text{деф}} = 1 - P(Q > Q^r) = P(Q < Q^r). \quad (2.21)$$

Імовірність предиката $\hat{Q} < \hat{Q}^r$, тобто імовірність $P(\hat{Q} < \hat{Q}^r) = P_{в.з}$ з урахуванням в загальному випадку стохастичної суті вектора \hat{Q} і \hat{Q}^r у вигляді інтеграла Стильєса, визначається у такому вигляді [40]:

$$P_{в.з} = \begin{cases} P(\hat{Q} < \hat{Q}^r) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} F_{\hat{Q}}(Q^r) dF_{\hat{Q}^r}(Q^r); \\ P(\hat{Q}^r > \hat{Q}) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{Q}^r}(Q) dF_{\hat{Q}}(Q), \end{cases} \quad (2.22)$$

де $F_{\hat{Q}}(Q^r) = P(\hat{Q} < Q^r)$, $R_{\hat{Q}^r}(Q) = P(\hat{Q}^r > Q)$ – умовні імовірності, а $dF_{\hat{Q}^r}(Q^r) \approx P(\hat{Q}^r = Q^r)$, $dF_{\hat{Q}}(Q) \approx P(\hat{Q} = Q)$ – імовірності відповідних означених гіпотез.

У цьому полягає постановка і розв'язання задачі кількісного n -компонентного оцінювання ефективності системи забезпечення якості виробів. За великої кількості n визначати $P_{в.з}$ за наведеними формулами доволі складно. Задача істотно спрощується, якщо компоненти векторів Q і Q^r незалежні. Тоді формула для визначення імовірності виконання системою завдання $P_{в.з}$ набуває вигляду

$$P_{в.з} = \prod_{i=1}^n P(\hat{q}_i < q_i^r) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} F_{\hat{q}_i}(q_i^r) dF_{q_i^r}(q_i^r) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{q}_i}(q_i) dF_{q_i}(q_i). \quad (2.23)$$

Тобто задача зводиться до обчислення n інтегралів Стильєса і до їхнього перемноження.

Для вибору раціональної кількості параметрів і визначення ймовірностей $P_{в.з}$ можна скористатись теорією головних компонент і теорією статистичної індикації або іншими методиками [40].

2.4. Моделі керування системами забезпечення якості упродовж життєвого циклу РЕА

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

$$S = \{S_{\Pi}(S_{\text{СТП}}, S_{\text{СХП}}, S_{\text{КП}}, S_{\text{ТП}}), S_{\text{В}}(S_{\text{T1}}, S_{\text{T2}}, \dots, S_{\text{ТП}}), S_{\text{К}}(S_{\text{К1}}, S_{\text{К2}}, \dots, S_{\text{Кп}}), S_{\text{Е}}(S_{\text{Е1}}, S_{\text{Е2}}, \dots, S_{\text{Еп}}), S_{\text{R}}(S_{\text{R1}}, S_{\text{R2}}, \dots, S_{\text{Rп}})\}. \quad (2.24)$$

Виконання поставленого завдання системою S зводиться до дотримання умови:

$$P_{\text{ВЗ}} = P\{Q(\Pi, T, K, E, R) \in \{Q^{\text{Д}}\}\} \geq P_{\text{ВЗ.зад.}} \quad (2.25)$$

або

$$P_{\text{ВЗ}} = P\{Q(\Pi, T, K, E, R) > Q^{\text{Г}}\} \geq P_{\text{ВЗ.зад.}}$$

$$P_{\text{ВЗ}} = P\{Q(\Pi, T, K, E, R) < Q^{\text{Г}}\} \geq P_{\text{ВЗ.зад.}}$$

де $P_{\text{ВЗ}}$, $P_{\text{ВЗ.зад.}}$ – імовірність виконання завдання і її задане значення; $Q(\Pi, T, K, E, R)$ – показник якості системи у складі показників якості підсистем проектування Π , технологічних процесів T , процесів контролю якості K , експлуатації E та забезпечення ресурсами R . Їх можна розглядати і використовувати як параметри оптимізації, а імовірності $P_{\text{ВЗ}}$ – як критерії оптимальності; $Q^{\text{Г}}$ – граничне значення показника якості системи, $Q^{\text{Д}}$ – допустиме значення.

Предикати $Q > Q^{\text{Г}}$ і $Q < Q^{\text{Г}}$ визначаються фізичною сутністю показників якості на всіх стадіях життєвого циклу апаратури.

Для керування процесами проектування використовують показник якості підсистеми S_{Π} :

$$\Pi = [\Pi_{\text{СТП}}, \Pi_{\text{СХП}}, \Pi_{\text{КП}}, \Pi_{\text{ТП}}],$$

в якому $\Pi_{\text{СТП}}$ – показник якості підсистеми системотехнічного проектування; $\Pi_{\text{СХП}}$ – показник якості підсистеми схемотехнічного проектування; $\Pi_{\text{КП}}$ – показник якості конструкторського проектування; $\Pi_{\text{ТП}}$ – показник якості технологічного проектування.

Керування цими процесами відбувається за схемою:

$$P_{\text{ВЗ}} = P\{Q(\Pi, T, K, E, R) \geq Q^{\text{Г}}\} \geq P_{\text{ВЗ.зад.}} \quad (2.26)$$

$$\Pi_{\text{СТП}} \in G_{\text{СТП}}; \Pi_{\text{СХП}} \in G_{\text{СХП}}; \Pi_{\text{КП}} \in G_{\text{КП}}; \Pi_{\text{ТП}} \in G_{\text{ТП}};$$

$$(T \in G_{\text{T}}) = \text{const}; (K \in G_{\text{K}}) = \text{const};$$

$$(E \in G_{\text{E}}) = \text{const}; (R \in G_{\text{R}}) = \text{const}.$$

Тут і далі $G_{\text{СТП}}$, $G_{\text{СХП}}$, $G_{\text{КП}}$, $G_{\text{ТП}}$... – області допустимих значень відповідних показників якості підсистем.

Зазначимо, що залежно від кількості наявної інформації моделювання, керування і оптимізація процесів забезпечення якості складних систем дає змогу охоплювати ці процеси на різних ієрархічних рівнях. Тому показник якості проектування апаратури П, що входить у (2.25), можна подати у вигляді функцій з аргументами, крім вказаних, ще і показниками якості параметричного синтезу елементів, що сумісно працюють, показниками якості резервування тощо. Ці питання розглянуто в 3.4.

У процесах забезпечення якості цього виду техніки є певні системні й параметричні відмінності. Це переважно складні багатоопераційні та багатопараметричні процеси з дуже різноманітними механічними, електрофізичними, фізико-хімічними й іншими процедурами обробки матеріалів широкої номенклатури. Вони також характеризуються багатофакторністю як внутрішніх, так і зовнішніх впливів, наявністю на вході і виході великої кількості контрольованих і неконтрольованих параметрів, структурною складністю, а також множиною апріорно невизначених залежностей між ними.

Дослідження показують, що технологічні процеси виробництва РЕА найчастіше характеризуються паралельними, послідовними або комбінованими структурами.

Процеси паралельної структури використовують для одночасної обробки деякої, часто великої кількості виробів. Це процеси хімічної обробки, нанесення покриттів, процеси фотолітографії під час виготовлення ІМС тощо. Вони, як правило, доведені до досконалості, часто використовуються у вигляді типових процесів із детально розробленою нормативною документацією.

Лінійна послідовність переходів характерна для одноінструментної обробки, для операцій, що виконуються на верстатах з програмним керуванням, або для послідовного формування властивостей виробів на різних стадіях технологічного процесу без проведення операцій складання. Прикладами можна назвати технологічні процеси перфорування під час виготовлення друкованих плат, електричного монтажу, формоутворення тощо.

Процеси, в які входять операції складання, здебільшого характеризуються комбінованими структурами. Неоднозначність таких структур великою мірою зумовлена конструкційними особливостями виробів і видом виробництва. Складні комбіновані процеси, на відміну від простої послідовності операцій з тією самою цільовою функцією, дають змогу варіювати структурами в широких межах, створюючи тим самим деяку множину варіантів, кожен з яких характеризується набором відповідних техніко-економічних показників.

У процесах з комбінованими структурами типовими є, як правило, тільки окремі елементи.

Дослідження показали, що наведені варіанти часто суттєво неоптимальні стосовно їх структурної побудови в конкретних виробничих умовах. Цим спричинені нижчий за потенціально можливий рівень якості виробів і невиправдано завищені витрати на їх виготовлення і експлуатацію. Тому проблема підвищення якості продукції, зниження витрат, економне використання виробничого потенціалу і окремих ресурсів підприємств вимагає розроблення і впровадження у практику методів оптимізації технологічних процесів за критеріями якості, надійності та ефективності, а також методів оперативного керування процесами в ході виробництва.

Структури технологічних процесів виробництва РЕА, які є деякою сукупністю послідовно, паралельно і послідовно-паралельно виконуваних технологічних процедур, можна розглядати як складні системи S , що складаються з множин підсистем S_i з різною керованістю. Контур керування такими системами охоплює технологічні процедури, що утворюють i -ту, $i = \overline{1, n}$ гілку технологічного процесу, але може також охоплювати процедури k -го рівня, що належать до різних гілок. У першому випадку керування здійснюється “по горизонталі”, у другому – “по вертикалі”. Найбільш загальним і типовим для багатоміноменклатурного серійного виробництва РЕА є керування технологічними процесами на різних стадіях виробництва і по горизонталі, і по вертикалі одночасно.

У разі керування по горизонталі контур керування охоплює деякі послідовності технологічних переходів, операцій, маршрутів або технологічних процесів загалом. До них належать процедури формоутворення, термообробки, нанесення покриття, виготовлення друкованих плат, формування мікроструктур, складальні процеси.

Структура систем, керованих по горизонталі, має такий вигляд:

$$S^r = [S_1(S_{11}, S_{21}, \dots, S_{q1}^r); S_2^r(S_{12}, S_{22}, \dots, S_{m2}); \dots; S_n(S_{1n}, S_{2n}, \dots, S_{pn})] \quad (2.27)$$

Структура систем керування по вертикалі:

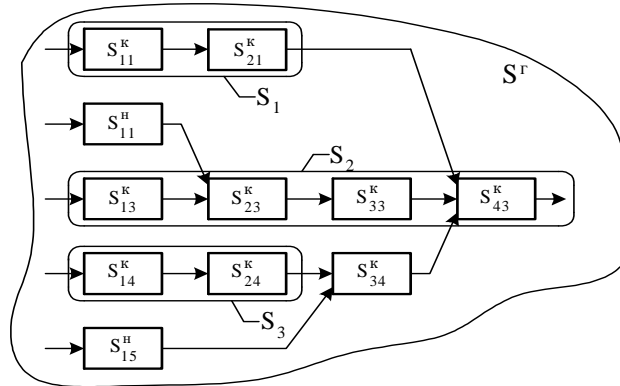
$$S^b = [S_1^b(S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1r}); S_2^b(S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2s}); \dots; S_t^b(S_{t1}, S_{t2}, \dots, S_{tu})]. \quad (2.28)$$

Структура систем керування технологічними системами по горизонталі та по вертикалі:

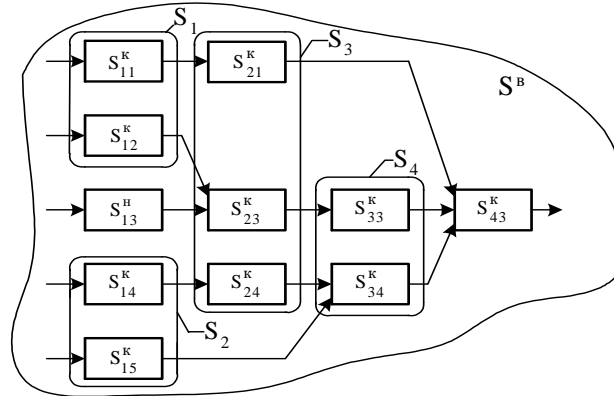
$$S^{rb} = [S_{11}^r, S_{21}^r, \dots, S_{n1}^r, S_{11}^b, S_{12}^b, \dots, S_{nm}^b]. \quad (2.29)$$

Структурно систему керування забезпеченням якості виробів по горизонталі, вертикалі і змішаний варіант наведено на рис. 2.4.

Керування по горизонталі



Керування по вертикалі



Змішаний варіант керування

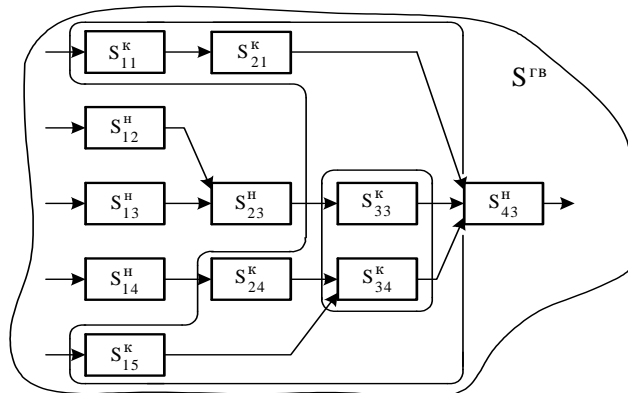


Рис. 2.4. Приклади керування системами забезпечення якості

Підсистеми керування процесами забезпечення якості під час виробництва РЕА, які об'єднані спільними контурами керування, характеризуються різною керованістю і поділяються на повністю керовані, частково керовані, розрізнено керовані та некеровані:

– повністю керовані підсистеми

$$S^{ГК} = [S_1^{ГК} (S_{11}^{ГК}, S_{12}^{ГК}, \dots, S_{q1}^{ГК}); S_2^{ГК} (S_{12}^{ГК}, S_{22}^{ГК}, \dots, S_{m2}^{ГК}); \dots; S_n^{ГК} (S_{1n}^{ГК}, S_{2n}^{ГК}, \dots, S_{pn}^{ГК})]; \quad (2.30)$$

$$S^{БК} = [S_1^{БК} (S_{11}^{БК}, S_{12}^{БК}, \dots, S_{1r}^{БК}); S_2^{ГК} (S_{12}^{БК}, S_{22}^{БК}, \dots, S_{2s}^{БК}); \dots; S_t (S_{t1}, S_{t2}, \dots, S_{tu})]; \quad (2.31)$$

– частково керовані підсистеми

$$S^{ГКЧ} = [S_1^{ГКЧ} (S_{11}^{ГКЧ}, S_{12}^{ГКЧ}, \dots, S_{q1}^{ГКЧ}); S_2^{ГЧ} (S_{12}^{ГЧ}, S_{22}^{ГЧ}, \dots, S_{m2}^{ГЧ}); \dots; S_n^{ГЧ} (S_{1n}^{ГЧ}, S_{2n}^{ГЧ}, \dots, S_{pn}^{ГЧ})]; \quad (2.32)$$

$$S^{БКЧ} = [S_1^{БКЧ} (S_{11}^{БКЧ}, S_{12}^{БКЧ}, \dots, S_{q1}^{БКЧ}); S_2^{БЧ} (S_{12}^{БЧ}, S_{22}^{БЧ}, \dots, S_{2s}^{БЧ}); \dots; S_t (S_{t1}, S_{t2}, \dots, S_{tu})]; \quad (2.33)$$

– розрізнено керовані підсистеми

$$S^{ГКР} = [S_1^Г (S_{11}^{ГК}, S_{12}^{ГК}, \dots, S_{q1}^{ГК}); S_2^Г (S_{12}^{ГЧ}, S_{22}^{ГК}, \dots, S_{2l}^{ГК}, S_{2k}^{ГЧ}); \dots; S_m^Г (S_{1m}^{ГЧ}, S_{2m}^{ГЧ}, \dots, S_{km}^{ГЧ}, S_{lm}^{ГК}, S_{sm}^{ГК})]; \quad (2.34)$$

$$S^{БКР} = [S_1^{БК} (S_{11}^{БК}, S_{12}^{БК}, \dots, S_{1r}^{БК}); S_2^{БЧ} (S_{21}^{БЧ}, S_{22}^{БЧ}, \dots, S_{2k}^{БЧ}); \dots; S_k^{БЧ} (S_{k1}^{БЧ}, S_{k2}^{БЧ}, \dots, S_{kl}^{БЧ}); S_k^{БК} (S_{l1}^{БК}, S_{l2}^{БК}, \dots, S_{lm}^{БК}); \dots; S_m^{БК} (S_{m1}^{БК}, S_{m2}^{БК}, \dots, S_{mn}^{БК}); S_{12}^{БЧ} (S_{n1}^{БЧ}, S_{n2}^{БЧ}, \dots, S_{n0}^{БЧ})]; \quad (2.35)$$

– некеровані підсистеми

$$S^{ГЧ} = [S_1^{ГЧ} (S_{11}^{ГЧ}, S_{21}^{ГЧ}, \dots, S_{q1}^{ГЧ}); S_2^{ГЧ} (S_{12}^{ГЧ}, S_{22}^{ГЧ}, \dots, S_{m2}^{ГЧ}); \dots; S_n^{ГЧ} (S_{1n}^{ГЧ}, S_{2n}^{ГЧ}, \dots, S_{pn}^{ГЧ})]; \quad (2.36)$$

$$S^{БЧ} = [S_1^{БЧ} (S_{11}^{БЧ}, S_{21}^{БЧ}, \dots, S_{1r}^{БЧ}); S_2^{БЧ} (S_{21}^{БЧ}, S_{22}^{БЧ}, \dots, S_{2s}^{БЧ}); \dots; S_t^{БЧ} (S_{t1}, S_{t2}, \dots, S_{tu})]. \quad (2.37)$$

У (2.30)–(2.37) використано такі позначення: $S^{ГК}$, $S^{БК}$ – повністю керовані підсистеми горизонтального і вертикального керування; $S^{ГКЧ}$, $S^{БКЧ}$ – частково керовані підсистеми горизонтального і вертикального керування; $S^{ГКР}$, $S^{БКР}$ – розрізнено керовані підсистеми горизонтального і вертикального керування; $S^{ГЧ}$, $S^{БЧ}$ – некеровані підсистеми.

Математичні моделі процесів забезпечення якості розглянутих структур є формалізованим зображенням процесів формування їх властивостей виконання технологічних та контрольних процедур з використанням матеріальних, технологічних, метрологічних, енергетичних та інших ресурсів, які, своєю чергою, характеризуються множинами показників якості. Серед них найбільшою керованістю характеризуються показники якості матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів та інших ресурсів r_s , показники якості технологічних процесів t_j і показники якості контрольних процедур k_i , які аналітично описані об'єднаннями:

$$\begin{aligned}
 T &= \bigcup_{j=1}^q t_j, & j &= \overline{1, q}, \\
 K &= \bigcup_{l=1}^u k_l, & l &= \overline{1, u}, \\
 R &= \bigcup_{s=1}^v r_s, & s &= \overline{1, v},
 \end{aligned}
 \tag{2.38}$$

де q, u, v – кількість елементів відповідних множин.

Вектор показників якості виробів після виконання технологічних та контрольних процедур має таку структуру:

$$\mathbf{Q}_{\langle n \rangle}(T, K, R) = [q_1(t_1, k_1, r_1), q_2(t_2, k_2, r_2), \dots, q_n(t_n, k_n, r_n)], \tag{2.39}$$

де $q_1(t_1, k_1, r_1), q_2(t_2, k_2, r_2), \dots, q_n(t_n, k_n, r_n)$ – компоненти вектора $\mathbf{Q}_{\langle n \rangle}$.

Фізичний зміст компонентів вектора $\mathbf{Q}_{\langle n \rangle}$ визначається показниками якості виробів, які формуються на кожній стадії технологічного процесу. Наприклад, q_1 – показник точності розмірів деталей, виготовлених штампуванням, литвом, токарною обробкою й іншими методами, q_2 – показник якості структури металу, отриманої під час термічної обробки, q_3 – показник якості струмопровідного рисунка друкованої плати після операції травлення фольги, q_4 – показник якості паяних з'єднань тощо.

Вектор допустимих значень показників якості виробів записується аналогічно:

$$\mathbf{Q}_{\langle n \rangle}^D = [q_1^D, q_2^D, \dots, q_n^D]. \tag{2.40}$$

Виконання умови $\mathbf{Q}_{\langle n \rangle}(T, K, R) \in \{Q^D\}$ є свідченням бездефектного виробництва, натомість невиконання приводить до протилежного висновку.

У загальному випадку вектори $\mathbf{Q}_{\langle n \rangle}$ і \mathbf{Q}^D є випадковими і тому як показник функціональної ефективності процесу виготовлення виробів доцільно використовувати імовірність виконання завдання $P_{в.з}$ такого змісту:

$$P_{в.з} = P[\mathbf{Q}(T, K, R) \in \{Q^D\}] \geq P_{в.з.зад}. \tag{2.41}$$

З наведених виразів видно, що задача встановлення оптимального варіанта технологічного процесу в аспекті забезпечення необхідних показників якості виробів є багатоваріантною і не має однозначного розв'язку. Варіантність її розв'язків визначається ступенем апріорної невизначеності множин T, K, R і можливістю керувати ними під час виробництва. Зважаючи на це, прийнятні викладені підходи до виконання задач комплексної оптимізації технологічних процесів за критеріями якості та надійності виробів і ефективності виробничих систем.

Якщо контур керування виробничим процесом у межах функціонування системи S охоплює лише технологічні процедури (операції, переходи, маршрути й окремі процеси), то у разі апіорної визначеності множин R і K і апіорної невизначеності множини T комплексна оптимізація процесів може відбуватись за такою схемою керування їх функціональною ефективністю:

$$P_{\text{в.з.}} = P[Q(T_{\text{var}}, K, R) \geq Q^r] \geq P_{\text{в.з.зад}}, \quad (2.42)$$

$$t \in G_t,$$

$$(k \in G_k) = \text{const},$$

$$(r \in G_r) = \text{const}.$$

Якщо контур керування виробничим процесом охоплює лише контрольні процедури, то за апіорної визначеності множин R і T і апіорної невизначеності множини K можлива комплексна оптимізація процесів за аналогічною схемою керування ефективністю

$$P_{\text{в.з.}} = P[Q(T, K_{\text{var}}, R) \geq Q^r] \geq P_{\text{в.з.зад}}, \quad (2.43)$$

$$(t \in G_t) = \text{const},$$

$$k \in G_k,$$

$$(r \in G_r) = \text{const}.$$

Якщо контур керування охоплює лише процедури забезпечення якості матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих виробів та інших ресурсів, використаних у виробництві, то за апіорної визначеності множин T і K і апіорної невизначеності множини R керувати ефективністю процесів можна за схемою

$$P_{\text{в.з.}} = P[Q(T, K, R_{\text{var}}) \geq Q^r] \geq P_{\text{в.з.зад}}, \quad (2.44)$$

$$(t \in G_t) = \text{const},$$

$$(k \in G_k) = \text{const},$$

$$r \in G_r.$$

У наведених варіантах керування ефективністю процесів виробництва: $P_{\text{в.з}}$ і $P_{\text{в.з. зад}}$ – імовірність виконання завдання із забезпечення якості виробів та її задане значення; R , T і K – множини оптимальних і неоптимальних техніко-економічних показників ресурсів, технологічних процедур і процедур контролю.

Виробництво РЕА належить до категорії складних виробництв і тому здебільшого у параметричному і структурному сенсі повинно розглядатись як велика і складна ієрархічна система з багатьма контурами керування. Саме тому найефективнішою, хоча і найскладнішою є комплексна оптимізація процесів виробництва, яка передбачає визначення показників якості матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, а також показників якості технологічних і

контрольних процедур, оптимальних з погляду загальної ефективності виробничої системи. Керують такою системою за схемою

$$P_{в.з.} = P[Q(T_{var}, K_{var}, R_{var}) \geq Q^r] \geq P_{в.з.зад}, \quad (2.45)$$

$$t \in G_t,$$

$$k \in G_k,$$

$$r \in G_r.$$

Узагальнений показник якості таких систем характеризується n -вимірною гіперповерхнею у просторі множини показників якості. Це практично унеможливає розв'язання задач параметричної і структурної оптимізації виробничих процесів у повному обсязі й змушує спрощувати саме формулювання задачі та способи її розв'язання.

2.5. Техніко-економічні критерії забезпечення якості виробничими системами

Для наскрізного моделювання процесів забезпечення якості на стадії виробництва необхідно, щоб виробничі системи й окремі підсистеми на всіх ієрархічних рівнях оцінювались загальними показниками якості за загальними критеріями. Комплексність такого підходу забезпечує не тільки можливість синтезу окремих математичних моделей у макромодель, але і можливість за потреби її раціональної декомпозиції за будь-якої складності.

Цим вимогам, зокрема, відповідають статистичні або імовірнісні показники дефектності у вигляді імовірностей появи, виявлення та пропуску виробничих дефектів на всіх стадіях технологічних процесів.

Ступінь відповідності показників якості виробів встановленим нормам розглядають й оцінюють як випадкові події виконання деяких умов, які нижче охарактеризовано як функціональні та економічні критерії якості.

Функціональні критерії якості: $G_{IP}, G_O, G_H, G_C, G_P$.

Критерій придатності:

$$G_{IP} : \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (X_{k,i} \in \{X_{k,i}^d\}). \quad (2.46)$$

Критерій оптимальності:

$$G_O : \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (X_{k,i} \in \{X_{k,i}^d\}) \bigcap \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (X_{k,i} \in \{X_{k,i}^{opt}\}), \quad (2.47)$$

де $\{X_{k,i}^{opt}\}$ – множина квазіоптимальних значень параметрів.

Критерій недосягнення:

$$G_H : \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=1}^m (X_{\text{вих.к-1},i} \in \{X_{\text{вих.к-1},i}^{\text{д}}\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=1}^m (X_{\text{вх.к},i} \in \{X_{\text{вх.к},i}^{\text{д}}\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=1}^m (X_{\text{вих.к-1},i} < X_{\text{вх.к},i}). \quad (2.48)$$

Критерій статистичного збігу:

$$G_C : \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=m+1}^p (X_{\text{вих.к-1},i} \in \{X_{\text{вих.к-1},i}^{\text{д}}\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=m+1}^p (X_{\text{вх.к},i} \in \{X_{\text{вх.к},i}^{\text{д}}\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=m+1}^p (X_{\text{вих.к-1},i} \in \{X_{\text{вх.к},i}\}). \quad (2.49)$$

Критерій перевершення:

$$G_{\Pi} : \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=p+1}^s (X_{\text{вих.к-1},i} \in \{X_{\text{вих.к-1},i}^{\text{д}}\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=p+1}^s (X_{\text{вх.к},i} \in \{X_{\text{вх.к},i}^{\text{д}}\}) \cap \bigcap_{k=2}^n \bigcap_{i=p+1}^s (X_{\text{вих.к-1},i} > X_{\text{вх.к},i}). \quad (2.50)$$

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

Економічний критерій якості G_E :

$$G_E : \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (C_{з\text{к},i} < C_{з\text{к},i}^{\text{д}}) \cap \bigcap_{k=1}^n \bigcap_{i=1}^n (C_{е\text{к},i} < C_{е\text{к},i}^{\text{д}}), \quad (2.51)$$

де $C_{з\text{к},i}$ – витрати на забезпечення якості на k -му кроці технологічного процесу за i -м параметром; $C_{е\text{к},i}$ – витрати, пов'язані з втратою якості на стадії експлуатації; $C_{з\text{к},i}^{\text{д}}$, $C_{е\text{к},i}^{\text{д}}$ – допустимі значення.

Перші два функціональні критерії (2.46, 2.47) використовують для оцінювання якості виробів порівнянням їх вихідних параметрів з встановленими нормами. Наступні три критерії (2.48), (2.49), (2.50) використовують, щоб оцінити безвідмовність систем компонентів, що сумісно працюють, на рівні їх стикувальних параметрів.

З урахуванням стохастичної суті параметрів виробів і витрат, пов'язаних з забезпеченням їх потрібних значень, показниками ефективності процесу можуть бути, наприклад, імовірності виконання завдання з формування необхідних властивостей виробів за допустимих витрат ресурсів.

$$P_{вз.}^{\phi} = P(X \in \{X^d\}); \quad (2.52)$$

$$P_{вз.}^e = P(C_{\Sigma} < C_{\Sigma}^d), \quad (2.53)$$

де $P_{вз.}^{\phi}$ – імовірність виконання завдання стосовно забезпечення функціональної ефективності технологічного процесу; $P_{вз.}^e$ – імовірність виконання завдання стосовно економічної ефективності процесу; \mathbf{X} – вектор параметрів виробів; $\{X^d\}$ – множина встановлених допустимих значень вектора параметрів; C_{Σ} і C_{Σ}^d – сумарні витрати для забезпечення якості виробів і їх допустимі значення.

Отже, функціональну й економічну ефективності процесу забезпечення якості виробів кількісно можна оцінювати відповідними імовірностями виконання поставленого перед ним завдання. У кожному конкретному випадку ці імовірності мають певні обмеження, які встановлюються з міркувань побудови загальної стратегії забезпечення необхідного рівня якості за мінімуму витрат.

Запропоновані універсальні критерії ефективності процесів забезпечення якості на стадіях проектування виробництва та експлуатації виробів, завдяки їх імовірнісній сутності, на відміну від відомих, можуть використовувати всі види наявної внутрішньої і зовнішньої інформації, зокрема і CALS-технології. Це дає змогу істотно підвищити точність оцінок ефективності цих процесів, зокрема за рахунок інформації про реальні розподіли показників якості виробів, і не приймати традиційні необґрунтовані припущення про їх нормальну суть.

2.6. Процеси формування надійності виробів

Сучасне виробництво РЕА здебільшого ґрунтується на використанні типових технологічних процесів, до яких належать процеси структуро- і формоутворення, нанесення покриттів, збирання і монтажу, регулювання, технологічного припрацювання тощо. Загальна мета всіх цих процесів – надати виробам на кожній стадії виробництва необхідних властивостей, які у сукупності визначають їхню кумулятивну якість. Показники цих властивостей мають різну фізичну суть, що практично унеможливає їх зіставлення, а значить, і створення наскрізних математичних моделей, придатних для розв'язання реальних багатоальтернативних оптимізаційних задач. У цих умовах комплексну оптимізацію виробництва апаратури за критеріями якості та надійності можна здійснювати моделюванням та оптимізацією процесів їх забезпечення впродовж усього виробничого циклу з використанням єдиного універсального

критерію якості. Таким критерієм є рівень дефектності об'єктів виробництва – деталей, вузлів, блоків та інших конструкційно-технологічних компонентів, а також виробу загалом після виконання технологічних та контрольних процедур. Втрата фізичності отримуваних математичних моделей частково компенсується їх гнучкістю та універсальністю.

Динаміка формування початкових, проміжних та остаточних показників якості та надійності виробів упродовж всього технологічного процесу відображається послідовністю перетворень, оператори яких можуть мати явну або неявну суть.

Процеси формування якісних показників виробів являють собою структури, які характеризуються активно формувальними, пасивно формувальними і неформувальними перетвореннями показників якості матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів й інших компонентів на показники якості та надійності готових виробів. Активно і пасивно формувальні перетворення, які надалі позначатимемо як події А і В, відбуваються внаслідок виконання технологічних і контрольних процедур. Неформувальні перетворення С, D і E відтворюють об'єктивні 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:

$$\begin{aligned}
 A: \{x_{\text{ном.к.і}}\} &\rightarrow \{\hat{x}_{\text{к.і}}\} \\
 B: \{\hat{x}_{\text{к.і}}\} &\rightarrow \begin{cases} \{\hat{x}_{\text{у.конд.к.і}}\} \in \{\hat{x}_{<n>}^D\} \\ \{\hat{x}_{\text{деф.к.і}}\} \in \overline{\{\hat{x}_{<n>}^D\}} \end{cases} \\
 C: \{x_{\text{у.конд.к.і}}\} &\rightarrow \omega_{\text{деф.к.і}}(\tau) \\
 D: \omega_{\text{деф.к.і}}(\tau) &\rightarrow \omega_{\text{деф.к.і}}(\tau) \rightarrow \omega_{\text{к.і}}(t) \\
 E: \omega_{\text{к.і}}(\tau) &\rightarrow \text{ПН},
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

де $\{x_{\text{ном.к.і}}\}$ – множина номінальних значень показників якості; $\{\hat{x}_{\text{к.і}}\}$ – множина випадкових значень показників якості після А-перетворення; $\{\hat{x}_{\text{у.конд.к.і}}\}$ – множина випадкових значень показників якості, які внаслідок контролю визнані умовно кондиційними; $\{\hat{x}_{\text{деф.к.і}}\}$ – множина випадкових значень показників якості, які визнані дефектними; $\omega_{\text{деф.к.і}}(\tau)$ – параметр потоку дефектів у проміжку 0– τ ; τ – тривалість виготовлення технологічної партії; $\omega_{\text{к.і}}(\tau)$ – параметр потоку відмов виробів у процесі експлуатації; ПН – показник надійності.

Формалізована схема процесу формування показника надійності на k -му кроці технологічного процесу зображена на рис. 2.5.

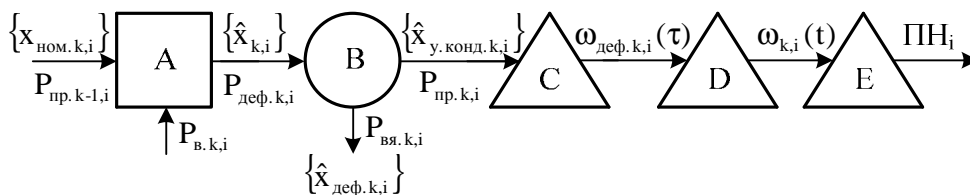


Рис. 2.5. Формування показника надійності на k -му кроці

На цьому рисунку: А – активно формувальне перетворення множини показників якості $\{x_{\text{ном.к.і}}\}$ на множини їх випадкових значень $\{\hat{x}_{\text{к.і}}\}$ під час виконання технологічної операції на k -му кроці під час формування i -го показника; В – пасивно формувальне перетворення множини $\{\hat{x}_{\text{к.і}}\}$ на множини показників якості явно дефектних одиниць продукції $\{\hat{x}_{\text{деф.к.і}}\}$ і множини показників якості умовно кондиційних одиниць продукції $\{\hat{x}_{\text{у.конд.к.і}}\}$, що відбувається під час операції контролю; С – перетворення дефектності умовно кондиційних виробів на параметр потоку дефектів $\omega_{\text{деф.к.і}}(\tau)$; D – перетворення параметра потоку дефектів $\omega_{\text{деф.к.і}}(\tau)$ на параметр потоку відмов $\omega_{\text{к.і}}(t)$; E – перетворення параметра потоку відмов $\omega_{\text{к.і}}(t)$ на показник надійності ПН_i ; ПН_i – i -й показник надійності виробів; $P_{\text{пр.к-1,і}}$ – імовірність пропуску дефектів з $(k-1)$ -го кроку технологічного процесу; $P_{\text{деф.к.і}}$ – імовірність наявності дефектності виробів після виконання k -ї технологічної операції; $P_{\text{вя.к.і}}$ – імовірність виявлення дефектних одиниць продукції після виконання контрольної процедури; $P_{\text{пр.к.і}}$ – імовірність пропуску дефектних одиниць продукції у партії умовно кондиційних виробів.

Перетворення оператором А вектора номінальних значень показників якості виробів на вектор їх випадкових значень відображає реальну можливість виникнення дефектності виробництва на всіх стадіях технологічного процесу. Ця можливість кількісно оцінюється імовірністю виникнення дефектів під час виконання технологічних процедур на k -му кроці технологічного процесу формування i -го параметра виробу і далі позначатиметься $P_{\text{в.к.і}}$. Традиційно рівень якості технологічних процесів прийнято оцінювати за їх точністю та стабільністю. З деяких розроблених для цього кількісних критеріїв найзастосовніші – коефіцієнт розсіювання K_p , коефіцієнт зміщення центра розсіювання параметрів виробів $K_{\text{ц}}$ і показник рівня початкового настроювання $K_{\text{н}}$.

Випадкову складову виробничих похибок оцінюють за коефіцієнтом розсіювання K_p :

$$K_p = \frac{I_\gamma \cdot S}{\delta},$$

де δ – поле допуску на параметр; S – середнє квадратичне відхилення значень показників якості; I_γ – коефіцієнт, який залежить від типу закону розподілу похибок показників якості та рівня довірчої імовірності γ .

Для оцінювання систематичної складової виробничої похибки користуються коефіцієнтом зміщення центра розсіювання параметрів K_α

$$K_\alpha = \frac{\bar{x}_n - \bar{x}_1}{\delta},$$

де \bar{x}_1 – середнє значення параметрів першої вибірки; \bar{x}_n – середнє значення параметрів n -ї вибірки, взятої після виготовлення деякої партії виробів.

Показник рівня початкового настроювання технологічного процесу визначають за першою вибіркою виробів після проведення профілактики і настроювання технологічного обладнання. Цей показник – коефіцієнт настройки K_H є характеристикою його точності:

$$K_H = \frac{x_H - \bar{x}_1}{\delta},$$

де x_H – заданий центр настройки (номінальне значення параметра).

Визначаються ці показники на основі статистичних даних, отриманих під час контролю параметрів виробів, що забезпечує об'єктивність і точність оцінок якості технологічних процесів.

Загалом імовірність виникнення дефектів під час виконання технологічної операції залежно від обмеження показника якості x допусковими значеннями a і b за відомою щільністю $f(x)$ визначається так:

$$\begin{aligned} P_{в.к.і} &= 1 - \int_{\alpha}^{\infty} f_1(x) dx \quad \text{– за обмеження параметра знизу;} \\ P_{в.к.і} &= 1 - \int_{-\infty}^b f_2(x) dx \quad \text{– за обмеження параметра зверху;} \\ P_{в.к.і} &= 1 - \int_{\alpha}^b f_3(x) dx \quad \text{– за двостороннього обмеження.} \end{aligned} \tag{2.55}$$

За умови нормального розподілу параметрів і відомих значень коефіцієнтів K_p і $K_{ц}$ імовірність вводу дефектів визначається залежностями

$$P_{в.к,i} = \varphi(K_p) = 1 - \Phi\left(\frac{\sigma - \bar{x}}{\delta K_p} \cdot 1_\gamma\right) + \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\delta K_p} \cdot 1_\gamma\right) \quad (2.56)$$

$$P_{в.к,i} = \varphi(K_{ц}) = 1 - \Phi\left(\frac{\sigma - \delta K_{ц} - \bar{x}_n}{S}\right) + \Phi\left(\frac{a - \delta K_{ц} - \bar{x}_l}{S}\right) \quad (2.57)$$

$$P_{в.к,i} = \varphi(K_p, K_{ц}) = 1 - \Phi\left(\frac{\sigma - \delta K_{ц} - \bar{x}_l}{\delta K_p} \cdot 1_\gamma\right) + \Phi\left(\frac{a - \delta K_{ц} - \bar{x}_l}{\delta K_p} \cdot 1_\gamma\right). \quad (2.58)$$

Для процесів виробництва апаратури характерна змінність параметрів технологічних процесів упродовж виготовлення окремих технологічних партій виробів. Причинами цього є:

- зношення інструменту, наприклад, свердел для перфорування друкованих плат, що призводить до биття і розкиду діаметра монтажних отворів;
- зміна хімічного складу комбінованих розчинів внаслідок реакції між компонентами і їх непропорційного використання під час оброблення матеріалів;
- зміна вмісту олова в олов'яно-свинцевих припоях, внаслідок чого збільшується температурний інтервал затвердіння припою і, як наслідок, зростає кількість дефектів паяного з'єднання елементів з друкованою платою;
- зміна параметрів дифузійного шару напівпровідника під дією наступних технологічних процедур тощо.

Все це приводить до висновку, що процеси забезпечення якості під час виготовлення апаратури четвертого і п'ятого покоління характеризуються змінністю показників якості в процесі виготовлення і тому традиційні “точкові” оцінки технологічних процесів у сенсі їх точності і стабільності стають малоефективними. На сучасному етапі розвитку радіоелектронного виробництва актуалізуються комбіновані методи автоматизованого керування процесами з використанням як квазістатичних, так і динамічних моделей забезпечення якості.

Далі показники якості $P_{деф.к,i}$, $P_{пр.к,i}$, $P_{вя.к,i}$ й інші розглядатимемо як часові функції:

$$P_{деф.к,i}(t) = P_{пр.к-1,i}(t) + (1 - P_{пр.к-1,i}(t)) P_{в.к,i}(t); \quad (2.59)$$

$$P_{вя.к,i}(t) = [P_{пр.к-1,i}(t) + (1 - P_{пр.к-1,i}(t)) P_{в.к,i}(t)] \cdot P_{к,i}; \quad (2.60)$$

$$P_{пр.к,1}(t) = [P_{пр.к-1,i}(t) + (1 - P_{пр.к-1,i}(t)) P_{в.к,i}(t)] \cdot (1 - P_{к,i}). \quad (2.61)$$

У виразах (2.56), (2.57), (2.58) K_p і $K_{ц}$ є також часовими функціями, оскільки \bar{x} і s залежать від часу t .

Для спрощення у подальших формулах позначення (t) може не використовуватись.

2.7. Параметрично-структурні моделі процесів забезпечення якості та надійності виробів

Здебільшого реальні процеси забезпечення якості та надійності виробів відбуваються за схемами послідовного процесу, паралельного процесу, а також великого розмаїття їх комбінацій. Серед основних варіантів таких моделей виділяються чотири.

Послідовний n-кроковий процес

Структура процесу:

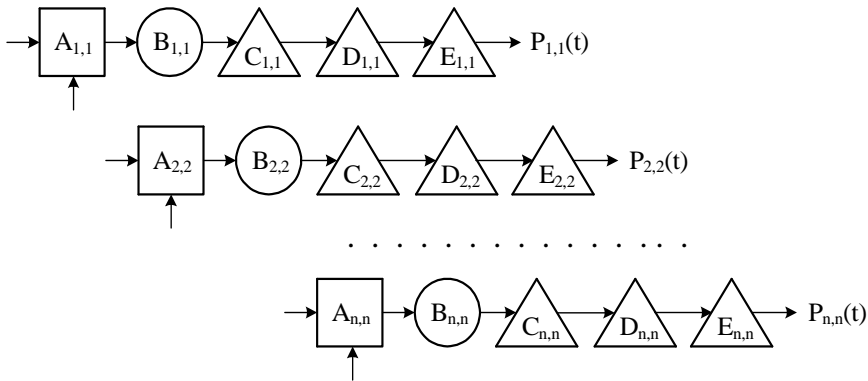


Рис. 2.6. Послідовний n-кроковий процес

Процес наведеної структури характеризується параметрами:

– імовірність утворення дефектності внаслідок А-перетворення:

$$P_{\text{деф}} = \text{diag}[P_{\text{деф}}(A_{11}), P_{\text{деф}}(A_{22}), \dots, P_{\text{деф}}(A_{nn})],$$

де

$$P_{\text{деф}}(A_{j,k}) = P_{\text{деф}}(A_{j,j})\delta_{j,k} = \begin{cases} P_{\text{деф}}(A_{j,j}) & \text{якщо } j = k \\ 0 & \text{якщо } j \neq k \end{cases}, \quad (2.62)$$

де $1 < j, k < n$; $\delta_{j,k}$ – символ Кронекера;

– імовірність виявлення дефектів у результаті В-перетворення:

$$P_{\text{вя}} = \text{diag}[P_{\text{вя}}(B_{11}), P_{\text{вя}}(B_{22}), \dots, P_{\text{вя}}(B_{nn})], \quad (2.63)$$

де

$$P_{\text{вя}}(B_{j,k}) = P_{\text{вя}}(B_{j,j})\delta_{j,k} = \begin{cases} P_{\text{вя}}(B_{j,j}) & \text{якщо } j = k \\ 0 & \text{якщо } j \neq k \end{cases}, \quad (2.64)$$

де $1 < j, k < n$;

– імовірність пропуску дефектів унаслідок В-перетворення:

$$P_{\text{пр}} = \text{diag}[P_{\text{пр}}(B_{11}), P_{\text{пр}}(B_{22}), \dots, P_{\text{пр}}(B_{nn})],$$

де

$$P_{\text{пр}}(B_{j,k}) = P_{\text{пр}}(B_{j,j})\delta_{j,k} = \begin{cases} P_{\text{пр}}(B_{j,j}) & \text{якщо } j = k \\ 0 & \text{якщо } j \neq k \end{cases}, \quad (2.65)$$

де $1 < j, k < p$; зазначимо, що $p + q = n$;

– сумарна дефектність виробів на виході технологічного процесу визначається імовірністю $P_{\text{пр.сум}}$:

$$P_{\text{пр.сум}} = P_{\text{пр}}(B_{11}) \oplus P_{\text{пр}}(B_{22}) \oplus \dots \oplus P_{\text{пр}}(B_{p,p}), \quad (2.66)$$

де \oplus – символ імовірнісного підсумовування;

– параметр потоку виробничих дефектів після С-перетворення:

$$\omega_{\text{деф}}^{(\tau)} = \text{diag}[\omega_{\text{деф}}(C_{11}), \omega_{\text{деф}}(C_{22}), \dots, \omega_{\text{деф}}(C_{pp})],$$

де

$$\omega(D_{j,k}) = \omega_{\text{деф}}(C_{j,j})\delta_{j,k} = \begin{cases} \omega_{\text{деф}}(C_{j,j}) & \text{якщо } j = k \\ 0 & \text{якщо } j \neq k \end{cases}, \quad (2.67)$$

де $1 < j, k < p$;

– параметр потоку відмов після D-перетворення:

$$\omega(t) = \text{diag}[\omega(D_{11}), \omega(D_{22}), \dots, \omega(D_{pp})],$$

де

$$\omega(D_{j,k}) = \omega(D_{j,j})\delta_{j,k} = \begin{cases} \omega(D_{j,j}) & \text{якщо } j = k \\ 0 & \text{якщо } j \neq k \end{cases}, \quad (2.68)$$

де $1 < j, k < p$;

– сумарний потік відмов $\omega_{\text{сум}} = \omega(D_{11}) + \omega(D_{22}) + \dots + \omega(D_{pp})$; (2.69)

– показники надійності виробу після Е-перетворення

$$\text{ПН} = [\text{ПН}(E_{11}), \text{ПН}(E_{22}), \dots, \text{ПН}(E_{pp})]^T. \quad (2.70)$$

Середній час напрацювання на відмову $T_{\text{сер}}$ і коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}$, як найуживаніші показники надійності РЕА, визначають за відомими формулами

$$T_{\text{сер}} = \frac{1}{\omega(t)}; \quad K_{\text{г}} = \frac{T_{\text{сер}}}{T_{\text{сер}} + T_{\text{пр}}}, \quad \text{де } T_{\text{пр}} \text{ – середній час простоювання.}$$

Значення імовірності безвідмовної роботи пристрою, виготовленого в результаті виконання n -крокового послідовного технологічного процесу, визначається імовірнісним перемноженням ймовірностей $P_{1,1}(t) = \varphi[\omega_{1,1}(t)]$, $P_{2,2}(t) = \varphi[\omega_{2,2}(t)]$, ..., $P_{n,n}(t) = \varphi[\omega_{n,n}(t)]$ – характеристик безвідмовності стосовно кожного сформованого показника якості, тобто $P_{\Sigma}(t) = P_{1,1}(t) \cdot P_{2,2}(t) \cdot \dots \cdot P_{n,n}(t)$.

Паралельний однокроковий процес

Структура процесу:

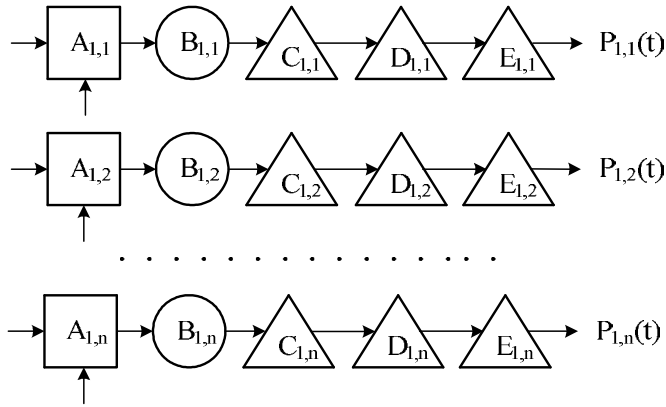


Рис. 2.7. Паралельний однокроковий процес

Процес паралельної структури характеризується параметрами:

– імовірність утворення дефектності на стадії А-перетворення:

$$P_{\text{деф}} = [P_{\text{деф}}(A_{1,1}), P_{\text{деф}}(A_{1,2}), \dots, P_{\text{деф}}(A_{1,n})]^T; \quad (2.71)$$

– імовірність виявлення дефектів у результаті В-перетворення:

$$P_{\text{вя}} = [P_{\text{вя}}(A_{1,1}), P_{\text{вя}}(A_{1,2}), \dots, P_{\text{вя}}(A_{1,q})]^T; \quad (2.72)$$

– імовірність пропуску дефектів у результаті В-перетворення:

$$P_{\text{пр}} = [P_{\text{пр}}(A_{1,1}), P_{\text{пр}}(A_{1,2}), \dots, P_{\text{пр}}(A_{1,p})]^T; \quad (2.73)$$

– сумарна дефектність виробів на виході технологічного процесу:

$$P_{\text{пр.сум}} = P_{\text{пр}}(B_{1,1}) \oplus P_{\text{пр}}(B_{1,2}) \oplus \dots \oplus P_{\text{пр}}(B_{1,n}); \quad (2.74)$$

– параметр потоку виробничих дефектів після С-перетворення:

$$\omega_{\text{деф}}^{(\tau)} = [\omega_{\text{деф}}(C_{1,1}), \omega_{\text{деф}}(C_{2,2}), \dots, \omega_{\text{деф}}(C_{1,n})]^T; \quad (2.75)$$

– параметр потоку відмов після D-перетворення:

$$\omega(t) = [\omega(D_{1,1}) + \omega(D_{2,2}), \dots, \omega(D_{1,n})]^T; \quad (2.76)$$

– сумарний потік відмов виробів:

$$\omega_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^n \omega(D_{1,j}); \quad (2.77)$$

– показники надійності виробу після Е-перетворення:

$$\text{ПН} = [\text{ПН}(E_{1,1}), \text{ПН}(E_{1,2}), \dots, \text{ПН}(E_{1,n})]^T. \quad (2.78)$$

Імовірність безвідмовної роботи визначають аналогічно:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{1,1}(t) \cdot P_{2,2}(t) \cdot \dots \cdot P_{1,n}(t). \quad (2.79)$$

Послідовно-паралельний процес

Структура процесу:

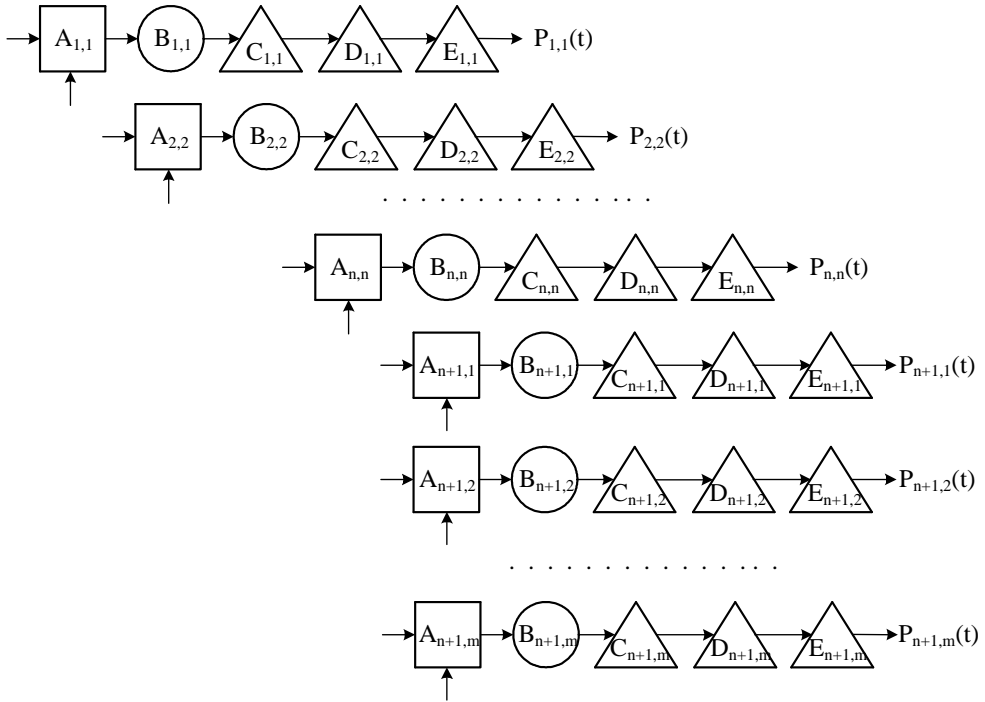


Рис. 2.8. Послідовно-паралельний процес

Комбінований процес такого типу, як і два попередніх, описується відповідними матрицями дефектності, що утворюються під час виконання послідовної складової технологічного процесу і паралельної його складової, а також матрицями виявлення і пропуску виробничих дефектів, параметрами потоків дефектів і потоків відмов:

$$P_{\text{деф}} = \begin{cases} \text{diag}[P_{\text{деф}}(A_{1,1}), P_{\text{деф}}(A_{2,2}), \dots, P_{\text{деф}}(A_{n,n})]; \\ [P_{\text{деф}}(A_{n+1,1}), P_{\text{деф}}(A_{n+1,2}), \dots, P_{\text{деф}}(A_{n+1,m})]^T. \end{cases} \quad (2.80)$$

$$P_{\text{вя}} = \begin{cases} \text{diag}[P_{\text{вя}}(B_{1,1}), P_{\text{вя}}(B_{2,2}), \dots, P_{\text{вя}}(B_{n,n})]; \\ [P_{\text{вя}}(B_{n+1,1}), P_{\text{вя}}(B_{n+1,2}), \dots, P_{\text{вя}}(B_{n+1,m})]^T. \end{cases} \quad (2.81)$$

$$P_{\text{пр}} = \begin{cases} \text{diag}[P_{\text{пр}}(B_{1,1}), P_{\text{пр}}(B_{2,2}), \dots, P_{\text{пр}}(B_{n,n})]; \\ [P_{\text{пр}}(B_{n+1,1}), P_{\text{пр}}(B_{n+1,2}), \dots, P_{\text{пр}}(B_{n+1,m})]^T. \end{cases} \quad (2.82)$$

$$\omega_{\text{деф}}^{(\tau)} = \begin{cases} \text{diag}[\omega_{\text{деф}}(C_{1,1}), \omega_{\text{деф}}(C_{2,2}), \dots, \omega_{\text{деф}}(C_{n,p})]; \\ [\omega_{\text{деф}}(C_{n+1,1}), \omega_{\text{деф}}(C_{n+1,2}), \dots, \omega_{\text{деф}}(C_{n+1,m})]^T. \end{cases} \quad (2.83)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} \text{diag}[\omega(D_{1,1}), \omega(D_{2,2}), \dots, \omega(D_{n,p})]; \\ [\omega(D_{n+1,1}), \omega(D_{n+1,2}), \dots, \omega(D_{n+1,m})]^T. \end{cases} \quad (2.84)$$

Імовірність безвідмовної роботи виробів $P_{\Sigma}(t)$, виготовлених у результаті проведення послідовно-паралельного технологічного процесу, визначиться так:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{1,1}(t) \cdot P_{2,2}(t) \cdot \dots \cdot P_{n,n}(t) \cdot P_{n+1,2}(t) \cdot \dots \cdot P_{n+1,m}(t). \quad (2.85)$$

Паралельно-послідовний процес

Структура процесу:

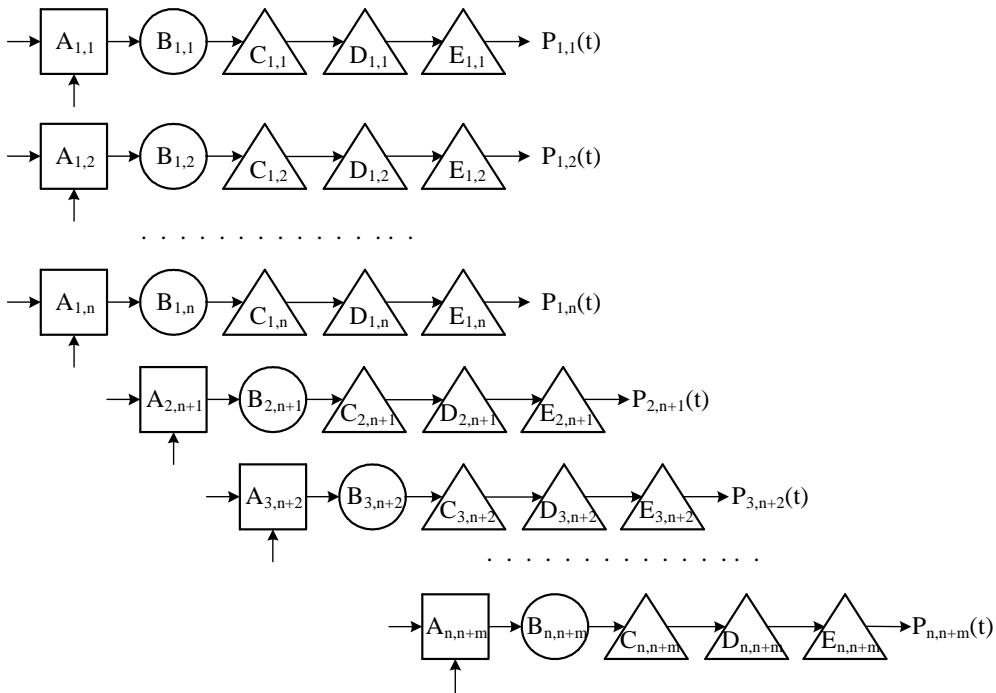


Рис. 2.9. Паралельно-послідовний процес

Наведена структура є також комбінацією n -крокового паралельного і m -крокового послідовного процесів формування заданих показників якості виробів з аналогічними ймовірнісними характеристиками, які наводять без додаткових пояснень:

$$P_{\text{деф}} = \begin{cases} [P_{\text{деф}}(A_{1,1})P_{\text{деф}}(A_{1,2}), \dots, P_{\text{деф}}(A_{1,n})]^T; \\ \text{diag}[P_{\text{деф}}(A_{2,n+1}), P_{\text{деф}}(A_{3,n+2}), \dots, P_{\text{деф}}(A_{n,n+m})]. \end{cases} \quad (2.86)$$

$$P_{\text{вя}} = \begin{cases} [P_{\text{вя}}(B_{1,1})P_{\text{вя}}(B_{1,2}), \dots, P_{\text{вя}}(B_{1,n})]^T; \\ \text{diag}[P_{\text{вя}}(B_{2,n+1}), P_{\text{вя}}(B_{3,n+2}), \dots, P_{\text{вя}}(B_{n,n+m})]. \end{cases} \quad (2.87)$$

$$P_{\text{пр}} = \begin{cases} [P_{\text{пр}}(B_{1,1})P_{\text{пр}}(B_{1,2}), \dots, P_{\text{пр}}(B_{1,n})]^T; \\ \text{diag}[P_{\text{пр}}(B_{2,n+1}), P_{\text{пр}}(B_{3,n+2}), \dots, P_{\text{пр}}(B_{n,n+m})]. \end{cases} \quad (2.88)$$

$$\omega_{\text{деф}}^{(\tau)} = \begin{cases} [\omega_{\text{деф}}(C_{1,1})\omega_{\text{деф}}(C_{1,2}), \dots, \omega_{\text{деф}}(C_{1,n})]^T; \\ \text{diag}[\omega_{\text{деф}}(C_{2,n+1}), \omega_{\text{деф}}(C_{3,n+2}), \dots, \omega_{\text{деф}}(C_{n,n+m})]. \end{cases} \quad (2.89)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} [\omega(D_{1,1})\omega(D_{1,2}), \dots, \omega(D_{n,p})]; \\ \text{diag}[\omega(D_{2,n+1}), \omega(D_{3,n+2}), \dots, \omega(D_{n,n+m})]. \end{cases} \quad (2.90)$$

Імовірність безвідмовної роботи виробів у разі паралельно-послідовного процесу їх виготовлення визначають за формулою:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{1,1}(t) \cdot P_{2,2}(t) \cdot \dots \cdot P_{1,n}(t) \cdot P_{2,n+1}(t) \cdot P_{3,n+2}(t) \cdot \dots \cdot P_{n,n+m}(t). \quad (2.91)$$

Запропонований підхід, схеми і характеристики процесів забезпечення якості та надійності виробів дають змогу моделювати реальні процеси будь-якої структурної складності і розмірності.

Для наведених варіантів структур процесів сумарне значення імовірності безвідмовної роботи пристрою за відомими припущеннями розраховують за загальним правилом підсумовування ймовірностей сумісних незалежних подій.

Припущення про незалежність подій формування показників якості виробів на всіх стадіях технологічних процесів не завжди виправдане. У [25] показано, що саме ці зв'язки визначають вплив на якість формування показників на k -му кроці технологічного процесу дефектів, пропущених на попередніх кроках. Ці дефекти можуть спричинити появу не тільки адитивної, але й мультиплікативної дефектності, що негативно впливає на надійнісні показники готових виробів.

РОЗДІЛ 3

ПРОЦЕСИ УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТНОСТІ І ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Сутність і структура дефектності РЕА

На всіх стадіях життєвого циклу РЕА під час виконання процедур проектування, виробництва і підтримування належного технічного рівня апаратури упродовж експлуатації завжди існує реальна можливість виникнення дефектності – стану, що характеризується відхиленням параметрів РЕА від встановлених норм.

У наведеному далі варіанті наскрізного моделювання і оптимізації процесу забезпечення якості під час проектування, серійного виробництва та експлуатації апаратури узагальненим і універсальним показником якості прийнято імовірнісний показник відносного вмісту дефектів у відповідному вихідному продукті. Цей показник надалі позначається $P_{\text{деф}}$ з додаванням відповідного індексу.

Дефектами на стадії проектування є:

- дефекти, пов'язані з недоліками ресурсного забезпечення: кадрового, інтелектуального, інформаційного, метрологічного тощо;
- дефекти схемотехнічного проектування, які визначаються дефектами застосування схемних варіантів, елементної бази, режимів експлуатації;
- дефекти системотехнічного проектування, спричинені дефектами параметричного синтезу компонентів, дефектами резервування і дефектами програмного забезпечення функціонування і діагностики систем;
- дефекти конструкторського проектування;
- дефекти технологічного проектування.

Дефекти на стадії виробництва:

- дефекти матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів;
- дефекти під час проведення технологічних операцій формоутворення;
- дефекти під час проведення операцій структуроутворення;
- дефекти під час виготовлення типових елементів заміни;
- дефекти під час проведення операцій збирання і монтажу;
- дефекти блочного і комплексного регулювання;
- дефекти технологічного припрацювання готових виробів.

Дефекти на стадії експлуатації:

- дефекти, спричинені помилками оператора під час експлуатації РЕА;
- дефекти, зумовлені порушенням режиму і обсягу профілактики, неякісним ремонтом тощо.

Узагальнено структуру дефектності РЕА показано на рис. 3.1.

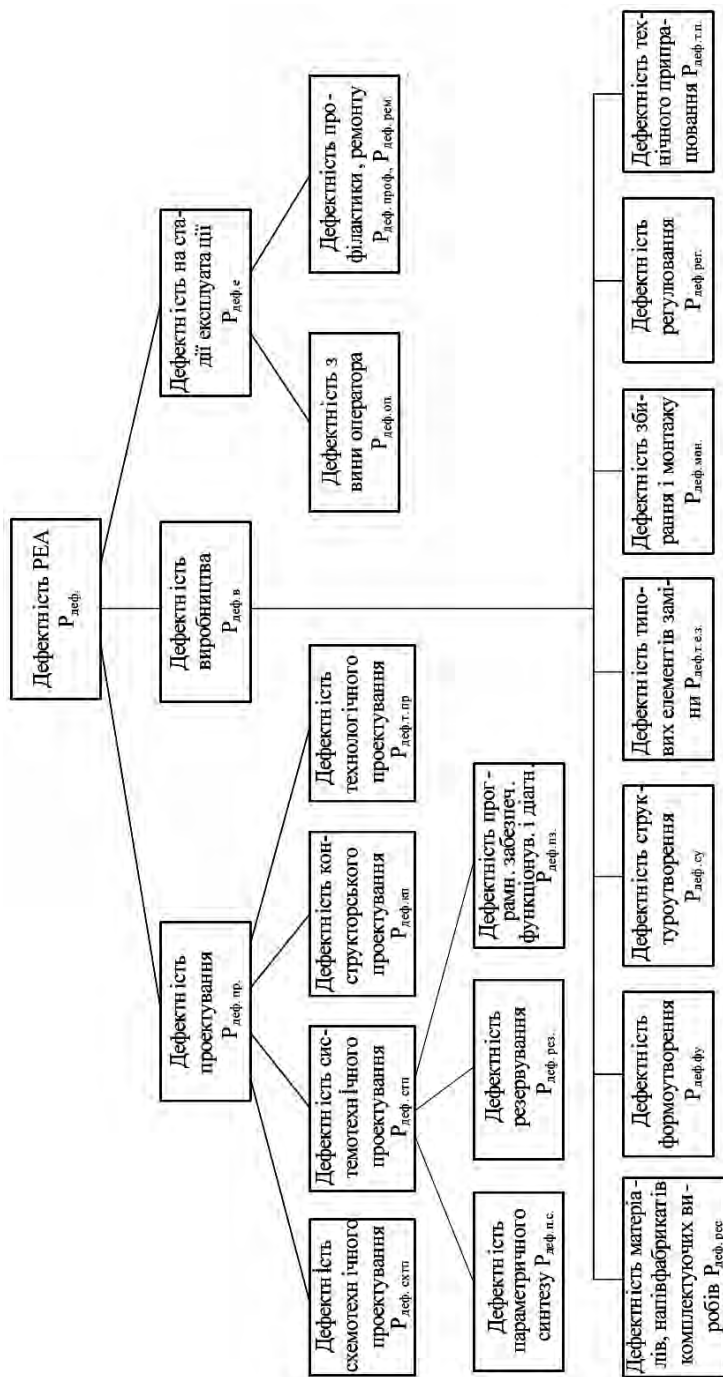


Рис. 3.1. Структура дефектності РЕА

Дефектність, що виникає в процесі проектування, виробництва і експлуатації виробів, описується адитивною імовірнісною функцією вигляду:

$$P_{\text{деф}} = P(P_{\text{деф.пр}}, P_{\text{деф.в}}, P_{\text{деф.е}}), \quad (3.1)$$

параметрами якої є:

$$P_{\text{деф.пр}} = P_{\text{пр}}[P_{\text{деф.схтп}}, P_{\text{стп}}(P_{\text{деф.пс}}, P_{\text{деф.рез}}, P_{\text{деф.пз}}), P_{\text{деф.кп}}, P_{\text{деф.тп}}]; \quad (3.2)$$

$$P_{\text{деф.в}} = P_{\text{в}}(P_{\text{деф.рес}}, P_{\text{деф.фу}}, P_{\text{деф.су}}, P_{\text{деф.тез}}, P_{\text{деф.мон}}, P_{\text{деф.рег}}, P_{\text{деф.тп}}]; \quad (3.3)$$

$$P_{\text{деф.е}} = P_{\text{е}}(P_{\text{деф.оп}}, P_{\text{деф.проф}}, P_{\text{деф.р}}, P_{\text{деф.оп}}). \quad (3.4)$$

Індекси в наведених залежностях означають: *деф* – дефектність; *пр* – проектування; *схтп* – схемотехнічне проектування; *стп* – системотехнічне проектування; *пс* – параметричний синтез; *рез* – резервування; *пз* – програмне забезпечення; *кп* – конструкторське проектування; *тп* – технологічне проектування; *рес* – ресурси; *фу* – формоутворення; *су* – структуроутворення; *тез* – типові елементи заміни; *мон* – монтаж; *рег* – регулювання, *тп* – технологічне припрацювання; *деф.е* – дефектність на стадії експлуатації; *деф. проф* – дефектність профілактики; *деф. р* – дефектність ремонту; *деф. оп* – дефектність з вини оператора.

Причини дефектів, які виникають упродовж життєвого циклу технічних пристроїв, вивчено не однаково. Ґрунтовні наукові дослідження проведено з питань забезпечення точності й запобігання дефектності виробництва в машинобудуванні та приладобудуванні [38]. Значно менше відомо наукових праць з проблем дефектності проектних робіт і, зокрема, питань системотехнічного проектування, серійного виробництва й експлуатації РЕА. Під час створення апаратури четвертого і п'ятого поколінь проектування все більше набуває ознак процесу системотехнічного проектування, втрачаючи ознаки традиційного схемотехнічного проектування, що було характерним для апаратури попередніх поколінь. Крім того, загострюється проблема забезпечення безвідмовності систем компонентів РЕА, що сумісно працюють [2, 3].

Надалі стан виробів, які визначаються наявністю дефектів різного походження, кількісно оцінюється такими показниками:

$P_{\text{в}}$ – імовірність вводу дефектів під час виконання процедур формування заданих показників якості;

$P_{\text{деф}}$ – імовірність наявності дефектів після виконання процедур формування заданих показників якості;

$P_{\text{вя}}$ – імовірність виявлення дефектів під час проведення процедури контролю якості;

$P_{\text{пр}}$ – імовірність пропуску дефектів під час проведення процедури контролю якості;

P – імовірність правильного контролю.

Наведені показники якості пов'язані із загальноприйнятим показником бездефектності $P_{бд}$ очевидними залежностями:

$$P_{бд} = 1 - P_{деф}; \quad (3.5)$$

$$P_{вя} = P_{деф} \cdot P; \quad (3.6)$$

$$P_{пр} = P_{деф}(1 - P); \quad (3.7)$$

$$P_{деф} = P_{пр} + P_{вя}. \quad (3.8)$$

Для k -го кроку процесу й i -го параметра дефектність і бездефектність визначаються рівняннями:

$$P_{деф.к,i} = P_{пр.к,i} + P_{вя.к,i} = P_{пр.к-1,i} + (1 - P_{пр.к-1,i})P_{в.к,i} \quad (3.9)$$

$$P_{Б.деф.к,i} = 1 - [P_{пр.к-1,i} + (1 - P_{пр.к-1,i})P_{в.к,i}]. \quad (3.10)$$

Використовуватись можуть й інші показники якості виробів. Сенс введення перелічених показників якості стане зрозумілим під час розгляду питань практичного використання цього підходу для розв'язання задач оптимізації процесів за критерієм якості та сумарних витрат.

Формалізовані підсистеми проектування, виробництва і експлуатації РЕА надалі описуються залежностями їх параметрів від параметрів нижчого рівня – підсистем системотехнічного, схемотехнічного, конструкторського, технологічного проектування, а також підсистем виробництва та експлуатації:

підсистема проектування $S_{п}$:

$$\begin{aligned} P_{в.S_{п}} &= F_{в.S_{п}}(P_{в.схп}, P_{в.стп}, P_{в.кп}, P_{в.тп}), \\ P_{вя.S_{п}} &= F_{вя.S_{п}}(P_{вя.схп}, P_{вя.стп}, P_{вя.кп}, P_{вя.тп}), \\ P_{пр.S_{п}} &= F_{пр.S_{п}}(P_{пр.схп}, P_{пр.стп}, P_{пр.кп}, P_{пр.тп}), \end{aligned} \quad (3.11)$$

підсистема виробництва $S_{в}$:

$$\begin{aligned} P_{в.S_{в}} &= F_{в.S_{в}}(P_{в.то1}, P_{в.то2}, \dots, P_{в.топ}), \\ P_{вя.S_{в}} &= F_{вя.S_{в}}(P_{вя.то1}, P_{вя.то2}, \dots, P_{вя.топ}), \\ P_{пр.S_{в}} &= F_{пр.S_{в}}(P_{пр.то1}, P_{пр.то2}, \dots, P_{пр.топ}), \end{aligned} \quad (3.12)$$

підсистема експлуатації $S_{е}$:

$$\begin{aligned} P_{в.S_{е}} &= F_{в.S_{е}}(P_{в.НЕ}, P_{в.р}, P_{в.пр}), \\ P_{вя.S_{е}} &= F_{вя.S_{е}}(P_{вя.НЕ}, P_{вя.р}, P_{вя.пр}), \\ P_{пр.S_{е}} &= P_{пр.S_{е}}(P_{пр.НЕ}, P_{пр.р}, \dots, P_{вя.пр}). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Імовірнісні показники якості, що входять у ці залежності, є безрозмірними величинами. Це дало можливість створити апарат математичного моделювання, придатний для наскрізного моделювання процесів забезпечення якості на основних стадіях життєвого циклу і розв'язання оптимізаційних задач, які розглянуто у наступних підрозділах.

3.2. Імовірнісна формалізація процесів виявлення і пропуску дефектів на стадіях життєвого циклу РЕА

Розглядаючи життєвий цикл радіоелектронної апаратури, виділяють стадії її проектування, вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, необхідних для її виготовлення, крокових підсистем технологічних та контрольних процедур стадії виробництва і стадію експлуатації. Формалізовані структури підсистем проектування – $S_{п}$, вхідного контролю – $S_{вх.к}$, крокових підсистем технологічних та контрольних процедур – $S_{к.і}$, а також підсистеми експлуатації виробів – S_e зображено на рисунках, які подано нижче.

Підсистема проектування РЕА

Якість проектування РЕА визначається якістю схмотехнічного, системотехнічного, конструкторського та технологічного проектування, які поетапно проводяться за схемою, наведеною на рис. 3.2, або за іншими схемами.

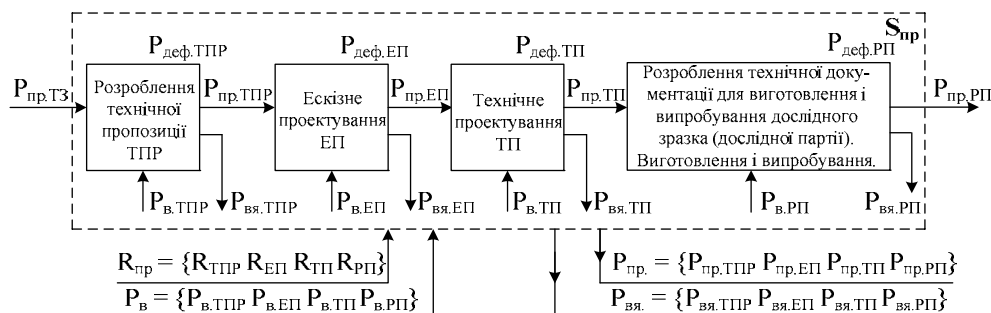


Рис. 3.2. Підсистема проектування РЕА

Стадія проектування характеризується такими імовірнісними показниками якості:

$P_{в}$ – імовірність виникнення дефектів у процесі проведення проектних процедур;

$R_{деф}$ – імовірність наявності дефектності в об'єктах проектування;

P – імовірність правильного контролю якості об'єктів проектування;

$P_{пр}$ – імовірність пропуску дефектів через неякісний контроль;

$P_{вя}$ – імовірність виявлення дефектів під час контролю якості об'єктів проектування.

У загальному випадку ці показники якості описуються діагональними матрицями з елементами їх покрокових оцінок:

$$P_v = \text{diag}[P_{v,тпр} P_{v,еп} P_{v,тп} P_{v,рп}]$$

$$P_{\text{деф}} = \text{diag}[P_{\text{деф.тпр}} P_{\text{деф.еп}} P_{\text{деф.тп}} P_{\text{деф.рп}}]$$

$$P = \text{diag}[P_{\text{тпр}} P_{\text{еп}} P_{\text{тп}} P_{\text{рп}}]$$

$$P_{\text{пр}} = \text{diag}[P_{\text{пр.тпр}} P_{\text{пр.еп}} P_{\text{пр.тп}} P_{\text{пр.рп}}]$$

$$P_{\text{вя}} = \text{diag}[P_{\text{вя.тпр}} P_{\text{вя.еп}} P_{\text{вя.тп}} P_{\text{вя.рп}}]$$

Розроблення технічної пропозиції (ТПР) – початковий етап процесу проектування, в якому беруть участь замовники конкретного виду апаратури, розробники, представники виробництва, експлуатації та інших служб. На цій стадії приймають колективні рішення, які зводять до мінімуму дефектність цього документа. Технічна пропозиція після узгодження і затвердження стає основним документом для розроблення ескізного проекту. Переважна частина дефектів проектування виникає на стадіях ескізного, технічного і робочого проектів, а також під час розроблення відповідної документації для серійного виробництва. На цих стадіях зазвичай виникають дефекти схемотехнічного, системотехнічного, конструкторського та технологічного проектування.

Отже, в наведеній системі матриць значущими елементами залишаються три останні члени, які описуються матрицями пропуску і виявлення дефектів проектування такого вигляду:

$$P_{\text{пр.еп}} = \left\| P_{\text{деф.еп.і, j}} \right\|_n^m \bullet \left\| 1 - P_{\text{еп.і, j}} \right\|_n^m ; \quad (3.14)$$

$$P_{\text{пр.тп}} = \left\| P_{\text{деф.тп.і, j}} \right\|_n^m \bullet \left\| 1 - P_{\text{тп.і, j}} \right\|_n^m ; \quad (3.15)$$

$$P_{\text{пр.рп}} = \left\| P_{\text{деф.рп.і, j}} \right\|_n^m \bullet \left\| 1 - P_{\text{рп.і, j}} \right\|_n^m ; \quad (3.16)$$

$$P_{\text{вя.еп}} = \left\| P_{\text{деф.еп.і, j}} \right\|_n^m \bullet \left\| P_{\text{еп.і, j}} \right\|_n^m ; \quad (3.17)$$

$$P_{\text{вя.тп}} = \left\| P_{\text{деф.тп.і, j}} \right\|_n^m \bullet \left\| P_{\text{тп.і, j}} \right\|_n^m ; \quad (3.18)$$

$$P_{\text{вя.рп}} = \left\| P_{\text{деф.рп.і, j}} \right\|_n^m \bullet \left\| P_{\text{рп.і, j}} \right\|_n^m , \quad (3.19)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$; i – номер стовпцевих значень елементів матриць-співмножників;
 $j = 1, 2, \dots, m$; j – номер рядкових значень елементів матриць-співмножників;

• – позначення поелементного перемноження матриць.

Пропущені дефекти проектування можуть проявитись на наступних стадіях життєвого циклу – під час виробництва та експлуатації РЕА.

Підсистема вхідного контролю

Підсистема цієї стадії $S_{\text{вх.к}}$ характеризується вхідними параметрами у вигляді множини імовірностей дефектності матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, задіяних у виробництві РЕА як основні й допоміжні ресурси, а також множини дефектностей інформаційного і апаратурного забезпечення процесу контролю (рис. 3.3).

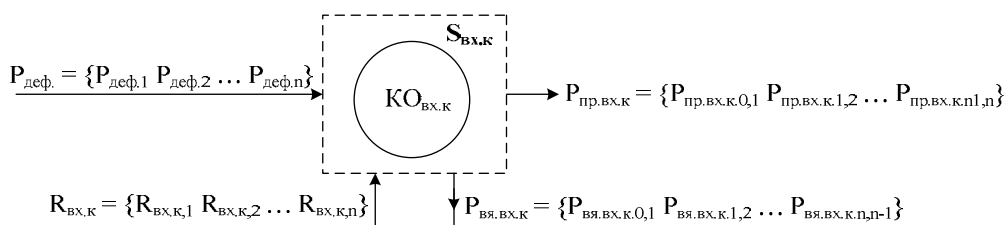


Рис. 3.3. Підсистема вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів, електрорадіовиробів

Матриці імовірностей пропущення та виявлення дефектів $P_{\text{пр.вх.к}}$ та $P_{\text{вя.вх.к}}$ в результаті проведення вхідного контролю є діагональними матрицями вигляду:

$$P_{\text{пр.вх.к}} = \text{diag} \left\| P_{\text{пр.вх.к}0,1}, P_{\text{пр.вх.к}1,2}, \dots, P_{\text{пр.вх.к}n-1,n} \right\|; \quad (3.20)$$

$$P_{\text{вя.вх.к}} = \text{diag} \left\| P_{\text{вя.вх.к}0,1}, P_{\text{вя.вх.к}1,2}, \dots, P_{\text{вя.вх.к}n-1,n} \right\|, \quad (3.21)$$

у яких перший числовий індекс означає нульовий крок технологічного процесу (крок вхідного контролю), а другий визначає порядковий номер матеріалу, напівфабрикату чи комплектуючого виробу, що підлягає контролю на цій стадії.

У наведених матрицях $P_{\text{пр.вх.к}}$ та $P_{\text{вя.вх.к}}$

$$P_{\text{пр.вх.к}} = \left\| P_{\text{деф.вх.к}i,j} \right\|_n^m \cdot \left\| 1 - P_{\text{вх.к}i,j} \right\|_n^m; \quad (3.22)$$

$$P_{\text{вя.вх.к}} = \left\| P_{\text{деф.вх.к}i,j} \right\|_n^m \cdot \left\| P_{\text{вх.к}i,j} \right\|_n^m, \quad (3.23)$$

де $P_{\text{вх.к}i,j}$ – елемент матриці імовірностей правильного вхідного контролю; $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ – номер стовпцевих значень елементів матриць-співмножників; $j = 1, 2, \dots, m$ – номер рядкових значень елементів матриць-співмножників.

Підсистема виробництва РЕА

Цю підсистему розглядають як сукупність крокових підсистем технологічних та контрольних процедур. Фрагмент n -крокової виробничої підсистеми $S_{\text{в}}$ формування i -го параметра зображено на рис. 3.4.

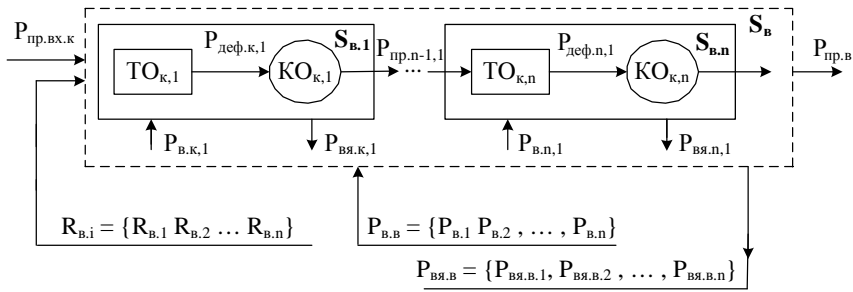


Рис. 3.4. Крокова виробнича підсистема S_v технологічних $ТО$ та контрольних $КО$ процедур

Підсистема S_v , характеризується матрицями ймовірностей пропущених та виявлених дефектів $P_{пр.в}$, і $P_{вя.в}$, які мають верхньотрикутну структуру, а саме:

$$P_{пр.в} = \begin{pmatrix} P_{пр.в11} & P_{пр.в21} & P_{пр.в31} & \dots & P_{пр.вn1} \\ & P_{пр.в22} & P_{пр.в32} & \dots & P_{пр.вn2} \\ & & P_{пр.в33} & \dots & P_{пр.вn3} \\ & & & \dots & \vdots \\ & & & & P_{пр.вnn} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

$$P_{вя.в} = \begin{pmatrix} P_{вя.в11} & P_{вя.в21} & P_{вя.в31} & \dots & P_{вя.вn1} \\ & P_{вя.в22} & P_{вя.в32} & \dots & P_{вя.вn2} \\ & & P_{вя.в33} & \dots & P_{вя.вn3} \\ & & & \dots & \vdots \\ & & & & P_{вя.вnn} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Елементи цих матриць визначаються за умовами (3.6)–(3.9). Аналіз та моделювання процесів утворення дефектності під час виробництва РЕА розглянуто у підрозділі 3.7.

Підсистема експлуатації РЕА

Підсистема експлуатації апаратури S_E , зображена на рис. 3.5, відображає процес виникнення відмов, спричинених дефектами проектування і виробництва, що надходять з n -го кроку технологічного процесу.

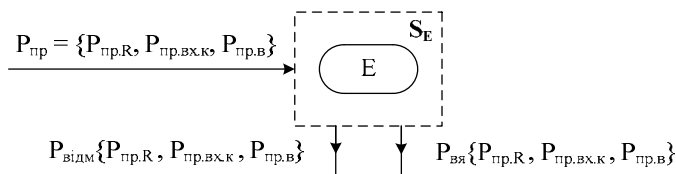


Рис. 3.5. Підсистема експлуатації РЕА S_E :

$P_{відм}(t_0-t_1), P_{відм}(t_1-t_2) \dots P_{відм}(t_{n-1}-t_n)$ – показники відмов

Причинами відмов виробів під час експлуатації є також незадовільна якість ресурсів, помилки операторів і порушення режимів і правил профілактики та ремонтів. Теоретичні й експериментальні дослідження процесів перетворення потоків дефектів на потоки відмов апаратури, а також концепцію прогнозування надійності за даними про рівень дефектності розглянуто в розділі 4.

На стадії експлуатації імовірність пропуску дефектів $P_{пр.е}$ є основним показником для визначення параметрів надійності апаратури, зокрема імовірності її відмов.

Матриці імовірностей пропуску і виявлення дефектів на стадії експлуатації мають вигляд:

$$P_{вя.е} = \left\| P_{вя.пр}, P_{вя.вх.к}, P_{вя.в}, P_{вя.р}, P_{вя.проф} \right\|^T \quad (3.26)$$

$$P_{пр.е} = \left\| P_{пр.пр}, P_{пр.вх.к}, P_{пр.в}, P_{пр.р}, P_{пр.проф} \right\|^T. \quad (3.27)$$

Причини і наслідки допущення і неусунення дефектів розглянуто в наступних розділах.

3.3. Дефектність і працездатність систем компонентів при їх сумісному функціонуванні

Працездатний стан радіоелектронного пристрою визначається спроможністю його складових частин (компонентів) виконувати задані функції згідно з призначенням, яке здебільшого апріорно визначене. Норми на параметри компонентів широкого використання не визначають для конкретного об'єкта, де їх можна застосовувати, а встановлюють з урахуванням потреб багатьох замовників, а також схемних, конструкційних та технологічних можливостей розробників та виробників компонентів. Враховуються також і суто маркетингові аспекти.

Якість компонентів визначається імовірністю того, що їх параметри містяться у заданій зоні, яка може бути обмеженою одним або двома граничними значеннями x_H^d і x_B^d (рис. 3.6).

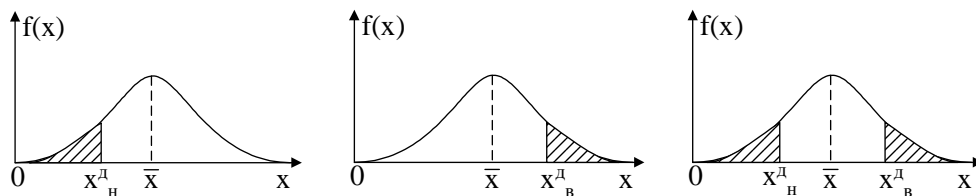


Рис. 3.6. Одностороннє та двостороннє допускове обмеження параметрів компонентів із заштрихованою зоною дефектності

Якість системи компонентів, що сумісно працюють, визначається взаємним положенням вектора їх стикувальних параметрів і області працездатного стану (див. розділ другий).

Це розміщення необхідно розглядати у динаміці, оскільки показники надійності тісно пов'язані з часовими параметричними змінами, які відбуваються у пристроях на стадіях виробництва та експлуатації. Тому параметри компонентів, їх вектори й області працездатності надалі розглядаються як функції часу, які змінюються під впливом комплексу дестабілізуючих факторів.

Типові приклади узгодження (і неузгодження) вектора стикувальних параметрів компонентів з областю працездатного стану системи показано на рис. 3.7–3.9, де: $X_{вд}$ – вектор стикувальних параметрів, розміщений у внутрішньодопусковій області $D_{вд}$; $X_{пд}$ і $X_{нп}$ – вектори стикувальних параметрів, розташованих у позадopusковій області $D_{пд}$ та області непрацездатності $D_{нп}$.

Умова перевершення

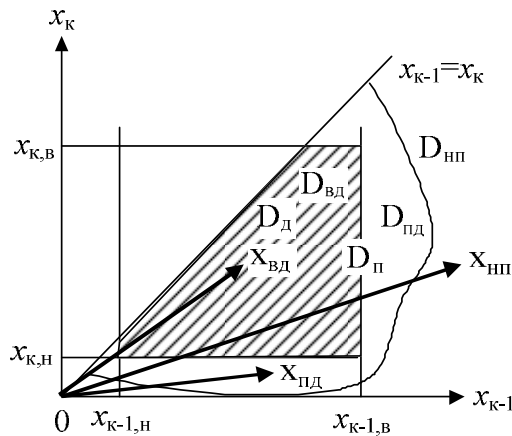


Рис. 3.7. Визначення областей працездатності системи за умови перевершення: $x_{k-1} > x_k$:

$x_{k-1,н}$, $x_{k-1,в}$ і $x_{k,н}$, $x_{k,в}$ – допускові значення стикувальних параметрів;

$D_{д}$ – допускова область параметрів;

$X_{нп}$ – вектор параметрів, за яких умови працездатності не виконуються

Область працездатності системи

$$D_{п} = D_{вд} + D_{пд}, \quad (3.28)$$

де $D_{вд}$ – внутрішньодopusкова область працездатності; $D_{пд}$ – позадopusкова область працездатності.

Області D_{Π} , $D_{Вд}$ і $D_{Пд}$ визначаються умовами:

$$D_{\Pi} : \begin{cases} (x_{k-1} \in \{x_{k-1,n}\}) \cup (x_k \in \{x_{k,\Pi}\}) \\ x_{k-1} > x_k \end{cases} \quad (3.29)$$

$$D_{Вд} : \begin{cases} x_{k-1,n} \leq x_{k-1} \leq x_{k-1,B} \\ x_{k,n} \leq x_k \leq x_{k,B} \\ x_{k-1} > x_k \end{cases} \quad (3.30)$$

$$D_{Пд} : \begin{cases} (x_{k-1} < x_{k-1,n}^{Пд}) \cup (x_{k-1} > x_{k-1,B}^{Пд}) \\ (x_k < x_{k,n}^{Пд}) \cup (x_k > x_{k,B}^{Пд}) \\ x_{k-1} > x_k \end{cases} \quad , \quad (3.31)$$

де $x_{k-1,\Pi}$ і $x_{k,\Pi}$ – стикувальні параметри, значення яких забезпечують стан працездатності системи, $x_{k-1,n}^{Пд}$ і $x_{k-1,B}^{Пд}$ – позадопускові граничні значення.

Умова недосягнення

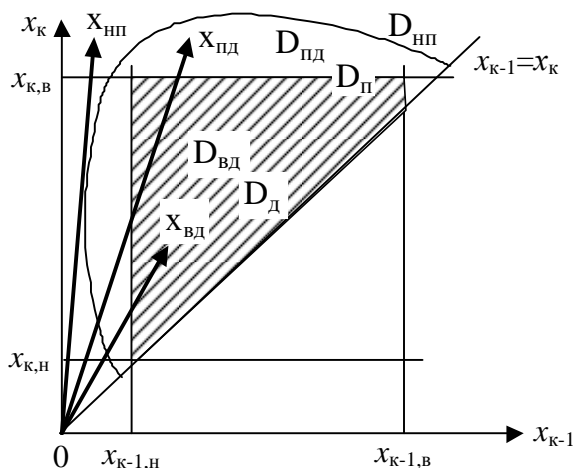


Рис. 3.8. Визначення областей працездатності системи за умови недосягнення: $x_{k-1} < x_k$

Аналогічно до попереднього випадку області працездатності визначаються умовами:

$$D_{\Pi} : \begin{cases} (x_{k-1} \in \{x_{k-1,n}\}) \cup (x_k \in \{x_{k,\Pi}\}) \\ x_{k-1} < x_k \end{cases} \quad (3.32)$$

$$D_{\text{вд}} : \begin{cases} x_{k-1,H} \leq x_{k-1} \leq x_{k-1,B} \\ x_{k,H} \leq x_k \leq x_{k,B} \\ x_{k-1} < x_k \end{cases} \quad (3.33)$$

$$D_{\text{пд}} : \begin{cases} (x_{k-1} < x_{k-1,H}^{\text{пд}}) \cup (x_{k-1} > x_{k-1,B}^{\text{пд}}) \\ (x_k < x_{k,H}) \cup (x_k > x_{k,B}) \\ x_{k-1} < x_k \end{cases} \quad (3.34)$$

Імовірності працездатності системи в межах областей $D_{\text{вд}}$ і $D_{\text{пд}}$ для випадку незалежності параметрів x_{k-1} і x_k :

$$P_{D_{\text{вд}}} = \iint_{D_{\text{вд}}} f(x_{k-1})f(x_k)dx_{k-1}dx_k \quad (3.35)$$

$$P_{D_{\text{пд}}} = \iint_{D_{\text{пд}}} f(x_{k-1})f(x_k)dx_{k-1}dx_k \quad (3.36)$$

Умова статистичного збігу

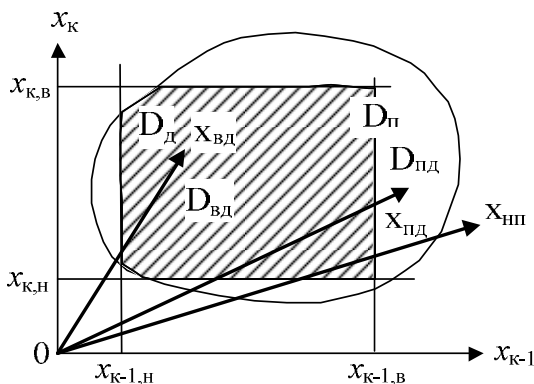


Рис. 3.9. Визначення областей працездатності за умови статистичного збігу параметрів ($f(x_{k-1}) \approx f(x_k)$)

У цьому разі області працездатності визначаються умовами

$$D_{\text{п}} : \begin{cases} (x_{k-1} \in \{x_{k-1,л}\}) \cup (x_k \in \{x_{k,п}\}) \\ f(x_{k-1}) \approx f(x_k) \end{cases} \quad (3.37)$$

$$D_{\text{вд}} : \begin{cases} x_{k-1,н} \leq x_{k-1} \leq x_{k-1,в} \\ x_{k,н} \leq x_k \leq x_{k,в} \\ f(x_{k-1}) \approx f(x_k) \end{cases} \quad (3.38)$$

$$D_{\text{пд}} : \begin{cases} (x_{k-1} < x_{k-1,н}^{\text{пд}}) \cup (x_{k-1} > x_{k-1,в}^{\text{пд}}) \\ (x_k < x_{k,н}^{\text{пд}}) \cup (x_k > x_{k,в}^{\text{пд}}) \\ f(x_{k-1}) \approx f(x_k) \end{cases} \quad (3.39)$$

Користуючись поняттям евклідового простору E_x , в якому містяться стикувальні параметри компонентів, можемо визначити дефектність системи $S_{k-1,к}$ областю дефектності $D_{\text{деф}}$:

$$D_{\text{деф}} = E_x - D_{\text{вд}} - D_{\text{пд}}. \quad (3.40)$$

В імовірнісному зображенні загальна умова забезпечення працездатного стану системи виглядає так:

$$P \left[(x_{k-1} \in D_{x_{k-1}}^{\text{ду}}) \cap (x_k \in D_{x_k}^{\text{ду}}) \right] \geq P_{\text{задане}}, \quad (3.41)$$

$$D_{x_{k-1}}^{\text{ду}} \subset D_{x_{k-1}}^{\text{д}}, \quad D_{x_k}^{\text{ду}} \subset D_{x_k}^{\text{д}}$$

де $D_{x_{k-1}}^{\text{д}}$ і $D_{x_k}^{\text{д}}$ – нормативні (допустимі) області розсіяння параметрів компонентів; $D_{x_{k-1}}^{\text{ду}}$ і $D_{x_k}^{\text{ду}}$ – області розсіяння параметрів компонентів, які визначаються з умови працездатного стану системи $S_k(K_{k-1}, K_k)$, обмежені позадопусковими, граничними, умовно-допустимими значеннями $x_{x_{k-1,н}}^{\text{ду}}$ і $x_{x_{k-1,в}}^{\text{ду}}$, $x_{x_{кн}}^{\text{ду}}$ і $x_{x_{кв}}^{\text{ду}}$;

$P_{\text{задане}}$ – задане значення імовірності працездатного стану системи.

Зазначимо, що умови включення $D_{x_{k-1}}^{\text{ду}} \subset D_{x_{k-1}}^{\text{д}}$, $D_{x_k}^{\text{ду}} \subset D_{x_k}^{\text{д}}$ не є абсолютно жорсткими, оскільки за збереження певного співвідношення стикувальних параметрів компонентів працездатність системи може не втрачатись і у разі виходу параметрів за межі встановлених норм.

Отже, втрата працездатності радіоелектронної апаратури може бути наслідком дефектності параметричного синтезу її компонентів, що сумісно

працюють. Ця дефектність формується як на стадії проектування апаратури у разі неоптимального встановлення допусків на стикувальні параметри компонентів, так і на стадії виробництва, якщо не дотримано оптимально встановлених допусків.

3.4. Оцінювання якості параметричного синтезу компонентів РЕА

Вимірювання параметрів компонентів, які виконують під час оцінювання їх якості, супроводжуються похибками, причинами яких є неточність контрольно-вимірювальної техніки й обмежені обсяги контрольованих вибірок. Ці похибки зумовлюють так звані ризики виробника і споживача компонентів.

Однак зауважимо, що похибки сучасної вимірювальної апаратури набагато менші, ніж розкиди параметрів виробів, і тому ризиками, пов'язаними з неточністю вимірювань, здебільшого можна нехтувати. Суцільний (100 %), а не вибірковий контроль компонентів збільшує вірогідність їх розподілу на придатні й непридатні, але і у цьому випадку такий контроль є вибірковим за кількістю контрольованих параметрів. Проблема оцінювання якості компонентів і, зокрема, вибору контрольованих параметрів все ще залишається недостатньо вирішеною.

Одночасно з вимогами до компонентів умова забезпечення безвідмовності апаратури встановлює вимоги до їх спроможності сумісно працювати у складі систем, з яких вона складається. Ця здатність, на відміну від попередньої, апріорно не визначена і тому на стадіях проектування та виробництва пристроїв виконують спеціальні дослідження, щоб забезпечити працездатність зазначених систем і пристроїв загалом. Якість окремо взятих компонентів визначається відповідністю їх параметрів до встановлених норм, а якість систем компонентів, що сумісно працюють, – ще й узгодженістю їх стикувальних параметрів.

З відомих причин за результатами контролю системи компонентів, що сумісно працюють, замість істинних показників якості отримують її оцінки, які ґрунтуються на добре розробленій сьогодні теорії прийняття статистичних рішень. Для досліджуваної системи характерні два можливі стани, які визначаються тим, чи її показники якості відповідають вимогам оптимального параметричного синтезу, чи ні. Враховуючи це, природно прийняти нульову гіпотезу про те, що показники якості містяться в допустимій області, й альтернативну гіпотезу про те, що хоча б один з показників якості виходить за межі робочої області. За результатами контролю ці гіпотези перевіряють. При цьому можливі помилки двох видів: помилка першого роду – відкидання нульової

гіпотези у тому випадку, коли вона є правильною, і помилка другого виду – прийняття нульової гіпотези тоді, коли правильна альтернативна.

Отже, оцінювання якості системи компонентів, що сумісно працюють, істотно відрізняється від оцінювання окремих компонентів. Оцінюють якість системи не тільки порівнюючи фактичні значення параметрів компонентів з апіорі встановленими для усїєї технологічної партії допустимими значеннями, але й зіставленням значень стикувальних параметрів, співвідношення яких визначає ефективність параметричного синтезу компонентів, тобто якості і, зокрема, надійності системи загалом. Звідси очевидний логічний висновок про те, що завдання оцінювання систем компонентів, що сумісно працюють, повинно об'єднувати і завдання індивідуального і групового прогнозування надійності, тобто завдання прогнозувального контролю.

Інформація, отримувана у результаті прогнозувального контролю, дає змогу розв'язувати задачі підвищення ефективності параметричного синтезу компонентів корекцією областей $D_{x_{k-1}}^{д у}$ і $D_{x_k}^{д у}$.

Як зазначено у підрозділі 2.5, критеріями оцінювання якості систем компонентів, що сумісно працюють, можуть слугувати умови (2.48)–(2.50). Невиконання цих умов свідчить, що не виконані поставлені перед системою завдання, є свідченням її дефектності, що згідно з (2.20) записується у вигляді:

$$\begin{aligned} P_{\text{деф.н}} &= 1 - P_n(G_n); \\ P_{\text{деф.с}} &= 1 - P_c(G_c); \\ P_{\text{деф.п}} &= 1 - P_n(G_n). \end{aligned} \tag{3.42}$$

Графічно інтерпретацію стану системи $S_k(K_{k-1}, K_k)$, що оцінюється критерієм недосагнення G_n , показано на рис. 3.10.

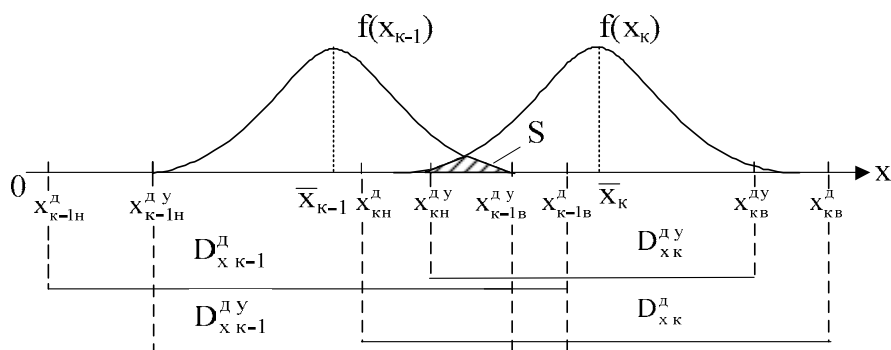


Рис. 3.10. Графічна інтерпретація працездатного стану системи $S_k(K_{k-1}, K_k)$, K_{k-1} -го і K_k -го компонентів, що сумісно працюють

Особливістю оцінювання якості системи $S_K(K_{k-1}, K_k)$ є невизначеність її працездатності або непрацездатності під час знаходження значень стикувальних параметрів обох компонентів у зоні S . З погляду можливих підходів до такого оцінювання і отримування результатів це поліваріантна задача.

Якщо відома густина сумісного розподілу n стикувальних параметрів $f(x_{k-11}, x_{k-12}, \dots, x_{k-1n}, x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn})$, імовірність працездатного стану системи визначається n -вимірним інтегралом:

$$P = \int \underbrace{n}_{D} f(x_{k-11}, x_{k-12}, \dots, x_{k-1n}, x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}) dx_{k-11} dx_{k-12} \dots dx_{k-1n} dx_{k1} dx_{k2} \dots dx_{kn}, \quad (3.43)$$

де D – n -вимірна область працездатності системи.

Для двокомпонентного варіанта системи зі стикувальними параметрами x_{k-1} і x_k імовірність працездатного стану визначається

$$P(x_{x_{k-1,H}}^{ду} < x_{k-1} < x_{x_{k-1,B}}^{ду}; x_{x_{k,H}}^{ду} < x_k < x_{x_{k,B}}^{ду}) = \int_{x_{x_{k-1,H}}^{ду}}^{x_{x_{k-1,B}}^{ду}} \int_{x_{x_{k,H}}^{ду}}^{x_{x_{k,B}}^{ду}} f(x_{k-1}, x_k) dx_{k-1} dx_k. \quad (3.44)$$

Загального методу розв'язування багатовимірних інтегралів для різних законів розподілу параметрів апаратури і її компонентів поки що не існує. Реально він реалізується при маловимірних сумісних розподілах.

Методами подвійного інтегрування густин $f(x_{вих.k-1})$ і $f(x_{в.к})$ цю задачу можна розв'язати у такому вигляді:

$$P_1(x_{вих.k-1} < x_{в.к}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_{в.к}) \left[\int_{-\infty}^{x_{в.к}} f(x_{вих.k-1}) dx_{вих.k-1} \right] dx_{в.к}; \quad (3.45)$$

$$P_2(x_{вих.k-1} \in \{x_{в.к}\}) = \int_{x_{в.к \min}}^{x_{в.к \max}} f(x_{вих.k-1}) dx_{вих.k-1};$$

$$P_3(x_{вих.k-1} > x_{в.к}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_{в.к}) \left[\int_{x_{в.к}}^{\infty} f(x_{вих.k-1}) dx_{вих.k-1} \right] dx_{в.к}. \quad (3.46)$$

Складність такого підходу до визначення імовірності працездатності або непрацездатності системи компонентів, що сумісно працюють, пояснює традиційне використання простіших числових та аналітичних методів, які ґрунтуються на деяких припущеннях і малообґрунтованих спрощеннях.

Зазначені методи оцінювання безвідмовності основані на використанні моделей розподілів стиковальних параметрів, тобто густин $f(x_{\text{вхк}-1})$ і $f(x_{\text{вхк}})$. Результати проведених експериментальних досліджень цих розподілів ряду компонентів на початку і під час експлуатації, а також отримані іншими дослідниками, засвідчили, що значна їх частина (понад 50 %) може істотно не узгоджуватися з нормальним законом з причин асиметричності та гостровершинності. Вони виникають внаслідок одностороннього або двостороннього обмеження параметрів під час виготовлення, а також впливу на компоненти деяких дестабілізуючих факторів, таких як температурне перевантаження, радіаційне та електромагнітне опромінення тощо.

3.5. Розподіли параметрів РЕА та їх моделювання

Розроблення математичних моделей розподілів параметрів РЕА традиційно зводиться до визначення виду розподілу за експериментальними даними. Такий підхід до вибору моделі та її використання для оцінювання надійності пристроїв та їх компонентів, що сумісно працюють, потребує достатнього обсягу статистичних даних. Встановлення виду розподілу параметрів з позиції суто імовірнісних концепцій передбачає підбір на підставі загальних міркувань одного із законів розподілу випадкових величин, найпридатнішого у кожному конкретному випадку згідно з вибраними критеріями узгодженості.

У більшості робіт вид теоретичного розподілу, тобто вид математичної моделі вибирають, враховуючи не фізичну сутність явищ, які визначають певний конкретний технологічний процес, а попередньо прийняте припущення, що розсіювання параметрів є результатом сумарної дії на нього великої кількості дестабілізуючих факторів, кожний з яких справляє на них незначний і майже однаковий вплив. Результуюче значення параметра розглядається як деяка сума окремих складових. Якщо ці складові узгоджуються з центральною граничною теоремою теорії ймовірностей, то закон розподілу такої суми вважається нормальним.

Під час виготовлення складних радіоелектронних пристроїв часто неможливо із численних дестабілізуючих факторів, які в сукупності впливають на формування розподілів параметрів виробів, виявити ті, що домінують. А якщо такі фактори і виявлено, то не завжди можливо встановити закономірності формування розподілів під їх дією. І хоча методів дослідження таких законо-

мірностей сьогодні достатньо, кількісні оцінки факторів, що впливають на формування розподілів параметрів виробів, а тим паче ідентифіковані моделі більшості таких процесів у радіоелектроніці, залишаються майже невідомими.

Поширеним напрямом наближеного подання реальних розподілів параметрів виробів є апроксимація їх відомими теоретичними розподілами. Усталенню цього напрямку сприяли праці багатьох авторів, а також поява низки нормативних документів і державних стандартів. Емпіричні розподіли випадкових величин рекомендовано подавати відомими класичними законами – експоненціальним, нормальним, логарифмічно-нормальним, Вейбулла, Релея, Пірсона, Джонсона й іншими законами. Особливе місце у низці моделей належить нормальному закону. Донедавна вважали, що розподіли параметрів радіоелектронних пристроїв і їх компонентів є переважно нормальними. Існувало аксіоматичне твердження, що у разі їх “ненормальності” (квазінормальності) проявляється фактор недостатнього обсягу статистичних даних, за якими побудовано емпіричні розподіли. Деякі автори дотримуються такої думки і сьогодні. Виконані останніми роками, зокрема і авторами монографії, численні дослідження розподілів параметрів радіоелектронних пристроїв і їх компонентів засвідчили, що лише половину з них можна вважати нормальними. Решта розподілів відрізняється від нормального закону істотними і статистично стійкими асиметричностями та гостровершинностями, нехтувати якими немає підстав. З’ясовано, що закони розподілів інтегрованих схем і їх елементів меншою мірою відрізняються від нормального закону, ніж розподіли параметрів компонентів радіоелектронних пристроїв, таких як функціональні вузли, модулі та блоки. Це пояснюється тим, що здебільшого сучасні технології виробництва ІМС не використовують таких впливових на закони розподілу параметрів технологічних операцій, як регулювання, настроювання, припасування тощо. У разі виробництва інших компонентів такі операції можуть становити значну частину від загальної кількості й тому параметри цих виробів розподіляються за законами, відмінними від нормального. Крім того, дослідження засвідчили, що зміна початкового значення параметра під час регулювання пристрою може призводити і до зміни характеру дрейфу в разі подальшої експлуатації. І хоча закономірностей у цьому явищі поки що не виявлено, необхідно зважати на факт впливу окремих операцій на формування розподілів параметрів пристроїв.

Результати деяких досліджень початкових розподілів параметрів радіовимірювальних приладів, блоків та інтегрованих мікросхем наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

РЕП	Параметр пристрою	Обсяг статистики	Критерій Колмогорова	Критерій Пірсона	Коеф. асиметрії	Коеф. ексцесу
Електронний частотомір IV покоління	Похибка частоти кварцового генератора	231	0,98		0	0
	Амплітуда напруги кварцового генератора	231	0,91		0,06	0,24
Електронний осцилограф IV покоління	Похибка калібратора амплітуди	116		0,16	1,03	1,31
	Похибка коефіцієнта відхилення по каналу У	112		0,66	0,41	0,93
	Похибка коефіцієнта відхилення по каналу Х	96		0,88	0,12	0,71
	Похибка тривалості розгортки	98		0,34	0,33	1,21
Кварцовий генератор блока єдиного часу	Похибка частоти	329		0,71	-0,6	0,4
	Амплітуда вихідної напруги	329		0,29	0,9	1,34
Кварцовий резонатор "Тантал" 1.0 МГц	Частота резонансу	350			0,7	2,05
Кварцовий резонатор "Топаз" 5.0 МГц	Частота резонансу	300			-0,3	1,41
LM78L06 Стабілізатор напруги	Вихідна напруга	280			0,5	1,48

Дослідження радіоелектронних та електронно-обчислювальних пристроїв різного призначення і їх компонентів свідчать про істотні розкиди їх вхідних та вихідних параметрів. Відхилення параметрів від номінальних значень є наслідком дії на технологічні процеси комплексу дестабілізуючих факторів, а також передбачених технологією процедур регулювання, калібрування, техно-

логічного припрацювання тощо. Під час експлуатації спостерігається помітний дрейф параметрів. Внаслідок цього умови центральної граничної теореми теорії ймовірностей не виконуються і тому розподіли параметрів виробів, залишаючись одномодальними, можуть істотно відрізнятись від закону Гаусса. З математичного погляду такі відхилення зумовлені появою центральних моментів вищих порядків, які є свідченням асиметричності та гостровершинності розподілів і кількісно оцінюються коефіцієнтами асиметрії та ексцесу. Ці коефіцієнти можуть набувати як додатних, так і від'ємних значень, тобто можуть фіксувати як правосторонню, так і лівосторонню асиметричність, а також їх плосковершинність та гостровершинність.

Враховуючи результати виконаних досліджень, логічно обґрунтованим є висновок, що нормальний закон потрібно розглядати як зручну, але часто недосконалу математичну модель реальних розподілів параметрів радіоелектронних пристроїв та їх компонентів.

Приклади розподілів коефіцієнтів A та E компонентів серійних електронних осцилографів та частотомірів, а також деяких інтегрованих схем показано на рис. 3.11.

Виконані дослідження засвідчили, що коефіцієнт асиметрії більшості розподілів лежить у межах $-1,0 \div 1,0$, а коефіцієнт ексцесу у межах $0 \div 4,0$. Доведено також, що коефіцієнти асиметрії та ексцесу є значущими і нехтування ними під час визначення показників надійності призводить до істотних похибок.

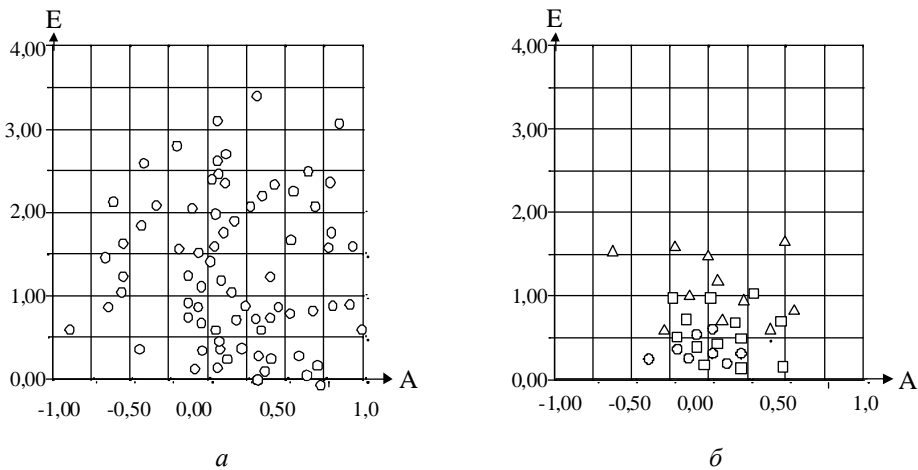


Рис. 3.11. Поля розсіювання коефіцієнтів асиметрії A та ексцесу E розподілів параметрів приладів і компонентів:
 а – електронні частотоміри та осцилографи;
 б – три типи інтегрованих схем

Основним недоліком традиційного підходу до створення математичних моделей квазінормальних розподілів параметрів виробів з використанням класичних законів, таких як закони Гаусса, Релея, Вейбулла, Пірсона та інших, є їх не завжди задовільна адекватність. Жорсткий та неявний зв'язок між параметрами форми цих функцій, а саме між коефіцієнтами асиметрії A та ексцесу E , не дає змоги під час ідентифікації незалежно встановлювати їх значення та знак і тому, здебільшого, унеможливорює задовільне аналітичне відображення такими моделями особливостей реальних розподілів параметрів пристроїв.

Узагальнено вимоги до математичних моделей квазінормальних розподілів параметрів пристроїв та їх компонентів можна подати у вигляді сукупності умов

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, m, \sigma, A, E) dx = 1 \\ f(x, m, \sigma, A, E) \geq 0, x \in [-\infty, \infty] \\ \frac{d}{dx} f(x, m, \sigma, A, E) \geq 0, x \in [-\infty, m] \\ \frac{d}{dx} f(x, m, \sigma, A, E) \leq 0, x \in [m, \infty] \end{array} \right. \quad (3.47)$$

Зрозуміло, що функція $f(x, m, \sigma, A, E)$ повинна бути неперервною в часі й диференційованою.

Перші дві умови загальні для будь-якої густини розподілу імовірності випадкової величини, дві останні визначають вимоги щодо їх монотонності на периферійних ділянках, які відповідно розділені математичним очікуванням m . Необхідно зазначити, що хоча кожна з цих умов реалізується доволі легко, їх сумісне виконання є жорсткою вимогою до таких моделей.

Одним з можливих способів наближеного описання реальних розподілів параметрів РЕА є спосіб, що ґрунтується на розкладанні у ряд деяких відомих функцій. При цьому густину розподілу імовірностей $f(x)$ можна зобразити так:

$$f(x) = f_{\delta}(x) [C_0 \Pi_0(x) + C_1 \Pi_1(x) + \dots], \quad (3.48)$$

де $f_{\delta}(x)$ – базова густина розподілу параметра x ; C_0, C_1, \dots – коефіцієнти; $\Pi_0(x), \Pi_1(x), \dots$ – система поліномів, ортонормованих щодо $f_{\delta}(x)$.

З використанням ортогональних поліномів Ерміта цей ряд можна подати у вигляді [26]:

$$\begin{aligned} f(x) = C_0 \varphi(x) + \frac{C_1}{1!} \cdot \varphi^{(1)}(x) + \frac{C_2}{2!} \cdot \varphi^{(2)}(x) + \frac{C_3}{3!} \cdot \varphi^{(3)}(x) + \\ + \frac{C_4}{4!} \cdot \varphi^{(4)}(x) + \frac{C_5}{5!} \cdot \varphi^{(5)} \dots, \end{aligned} \quad (3.49)$$

де C_i , $i = \overline{0, n}$ – постійні коефіцієнти, що визначаються за формулою

$$C_i = (-1)^i \int_{-\infty}^{\infty} H_i(x) f(x) dx. \quad (3.50)$$

Поліноми Ерміта $H_i(x)$ обчислюються зі співвідношення:

$$\left(\frac{d}{dx} \right)^i \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = (-1)^i H_i(x) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (3.51)$$

і набувають таких значень:

$$H_0(x) = 1, H_1(x) = x, H_2(x) = x^2 - 1, H_3(x) = x^3 - 3x, \\ H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3, H_5(x) = x^5 - 10x^3 + 15x, \dots$$

Оскільки функція щільності $f(x)$ є функцією нормованої величини x , коефіцієнти C_i набувають значень

$$C_0 = 1, C_1 = 0, C_2 = 0, C_3 = -\frac{\mu_3}{\sigma^3}, C_4 = -\frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, C_5 = -\frac{\mu_5}{\sigma^5} + 10\frac{\mu_3}{\sigma^3}, \dots$$

де μ_i , $i = \overline{1, n}$ – центральний момент i -го порядку, σ – середнє квадратичне відхилення ненормованого значення параметра. На основі цього ряд (3.49) можна подати рядами Грама–Шарльє або Еджворта [15]:

$$f(x) = \varphi(x) - \frac{1}{3!} \frac{\mu_3}{\sigma^3} \varphi^{(3)}(x) + \frac{1}{4!} \left(\frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \right) \varphi^{(4)}(x) - \frac{1}{5!} \left(\frac{\mu_5}{\sigma^5} - 10 \frac{\mu_3}{\sigma^3} \right) \varphi^{(5)}(x) + \dots \quad (3.52)$$

Ряди Грама–Шарльє і Еджворта ґрунтуються на функції Гаусса і тому є зручними для апроксимації розподілів, що наближаються до нормального закону, але характеризуються певною асиметрією та гостровершинністю. Саме цим пояснюється їх популярність під час розв'язання широкого спектра інженерних та неінженерних задач.

Обмежуючись членами ряду з центральними моментами, не вищими від четвертого, тобто враховуючи найістотніші відмінності реального розподілу від нормального закону, ряд Грама–Шарльє, Еджворта використовують у вигляді:

$$f(x, m, \sigma, A, E) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x-m)^2\right] \times \\ \times \left[1 - \frac{A}{6} H_3\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) + \frac{E}{24} H_4\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) \right], \quad (3.53)$$

де x – ненормоване значення параметра, $A = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$ – коефіцієнт асиметрії

розподілу, $E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$ – коефіцієнт ексцесу.

Сьогодні відомо багато теоретичних розробок, що стосуються рядів Грама–Шарльє, Еджворта.

Виконані дослідження цього ряду дають підстави зробити деякі висновки.

Ряди Грама–Шарльє, Еджворта мають важливі позитивні властивості з погляду використання їх як математичних моделей розподілів параметрів пристроїв та їх компонентів. Основні з них такі:

1. Коефіцієнти рядів Грама–Шарльє, Еджворта визначаються через числові характеристики емпіричних розподілів, які можна розрахувати під час опрацювання статистичного матеріалу.

2. Універсальність моделей, побудованих на рядах Грама–Шарльє, Еджворта, забезпечується тим, що густина нормального розподілу (як базова функція $f_g(x)$), є першим та основним членом цих рядів. Це дає можливість апроксимувати широкий клас розподілів, близьких до нормального.

3. Структурна незалежність коефіцієнтів асиметрії та ексцесу забезпечує гнучкість моделей у вигляді рядів Грама–Шарльє, Еджворта, тобто забезпечує їх здатність адекватно описувати реальні розподіли параметрів з істотним розкидом характеристик форми. Структурної незалежності вказаних характеристик позбавлені більшість класичних розподілів випадкових величин.

Разом з цим, під час виконання досліджень виявлено недоліки цих рядів у разі використання їх як моделей розподілів параметрів РЕА і їх компонентів. До них належать:

1. Сума обмеженої кількості членів ряду Грама–Шарльє, Еджворта за певних значень коефіцієнтів асиметрії та ексцесу може набувати від'ємних значень, що несумісно з поняттям густини розподілу випадкових величин.

2. Ряди Грама–Шарльє, Еджворта можуть поводитись нерегулярно. Сума перших n членів не завжди забезпечує кращу апроксимацію емпіричних розподілів, ніж сума $n-1$ їх членів.

3. Коефіцієнти цих рядів залежать від центральних моментів вищих порядків, точність визначення яких, через обмеженість статистичних даних, тим менша, чим вищим є порядок центральних моментів. Вплив похибки оцінок асиметричності та гостровершинності розподілів на адекватність моделей сьогодні достатньо не досліджено.

Недостатньо вивчені властивості рядів Грама–Шарльє, Еджворта є причиною дещо настороженого ставлення до них у разі вибору математичних моделей розподілів параметрів технічних пристроїв та інших об'єктів, хоча їхні очевидні позитивні властивості останнім часом все більше привертають увагу спеціалістів. Цей факт, безперечно, свідчить, що необхідні подальші дослідження як позитивних, так і негативних властивостей цих рядів, визначення на цій основі областей їх доцільного використання і відповідних обмежень.

3.6. Моделювання дефектності в разі квазінормальних розподілів стикувальних параметрів компонентів

Як зазначено вище, надійне функціонування компонентів системи, що сумісно працюють, забезпечується за певних співвідношень їх вхідних і вихідних параметрів. Ці співвідношення, залежно від особливостей системи, можуть бути такими

$$\begin{aligned} X_{\text{вих.к-1}} &< X_{\text{вх.к}}; \\ X_{\text{вих.к-1}} &\approx X_{\text{вх.к}}; \\ X_{\text{вих.к-1}} &> X_{\text{вх.к}}. \end{aligned} \quad (3.54)$$

Перше з них характерне для компонентів, один з яких є джерелом завад, пульсацій тощо, однак пульсація напруги живлення $X_{\text{вих.к-1}}$ не повинна перевищувати величину $X_{\text{вх.к}}$ і має бути якомога меншою.

Друге співвідношення між вхідними і вихідними параметрами компонентів характерне для аналогових схем з майже фіксованими рівнями цих параметрів.

Третє співвідношення є умовою надійної сумісної роботи системи дискретної дії, у якій перший компонент виробляє імпульс запуску для другого.

Оскільки у серійному виробництві завжди використовується елементна база з великим розкидом параметрів, вхідні й вихідні параметри компонентів необхідно розглядати як множини $\{X_{\text{вих.к-1}}\}$ і $\{X_{\text{вх.к}}\}$, які також повинні задовольняти відповідні умови.

Наведені умови доволі жорсткі, і їх виконання у реальному виробництві пов'язане із істотними складнощами. Це особливо стосується другої умови, оскільки повний перетин множин $\{X_{\text{вих.к-1}}\}$ і $\{X_{\text{вх.к}}\}$ вимагає для забезпечення надійної роботи компонентів ще й рівності $X_{\text{вих.к-1},i}$ і $X_{\text{вх.к},i}$. Ця умова передбачає індивідуальний підбір цих компонентів з відповідними значеннями вхідних і вихідних параметрів, що значно ускладнює технологічний процес збирання і регулювання виробів. Тому цю умову схемними способами намагаються звести до першої або третьої, використовуючи регулювальні процедури.

Невиконання зазначених умов свідчить про дефектність системи компонентів, що сумісно працюють, яка в загальному оцінюється такими імовірностями:

$$P_{\text{деф}} = 1 - P(\{X_{\text{вих.к-1},i}\} \cap \{X_{\text{вх.к},i}\}), \quad (3.55)$$

$$\text{за умови } X_{\text{вих.к-1},i} < X_{\text{вх.к},i},$$

$$P_{\text{деф}} = 1 - P(\{X_{\text{вих.к-1},i}\} \cap \{X_{\text{вх.к},i}\}),$$

$$\text{за умови } X_{\text{вих.к-1},i} \approx X_{\text{вх.к},i},$$

$$i = \overline{1, n}, \quad n - \text{кількість стикувальних параметрів.}$$

Якщо відомі щільності $f(x_{\text{вих.к-1},i})$ і $f(x_{\text{вх.к},i})$, то

$$P_{\text{деф}} = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(x_{\text{вих.к-1},i}) \left[\int_{-\infty}^{x_{\text{вих.к-1},i}} f(x_{\text{вх.к},i}) dx_{\text{вх.к},i} \right] dx_{\text{вих.к-1},i}. \quad (3.56)$$

Максимальне значення ймовірності $P_{\text{деф}}$ для першої умови визначається площею заштрихованої фігури (рис. 3.12).

$$P_{\text{деф}} = \int_a^b f(x_{\text{вх.к}}) dx + \int_b^c f(x_{\text{вих.к}}) dx. \quad (3.57)$$

У випадку нормальних розподілів $x_{\text{вих.к-1}}$ і $x_{\text{вх.к}}$ ймовірність $P_{\text{деф}}$ знаходять за допомогою функції Лапласа

$$P_{\text{деф}} = \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) - \Phi\left(\frac{a - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) + \Phi\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right), \quad (3.58)$$

де $m_{x_{\text{вих.к-1}}}$, $m_{x_{\text{вх.к}}}$, $\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}$, $\sigma_{x_{\text{вх.к}}}$ – математичні очікування і середні квадратичні відхилення вихідних і вхідних параметрів компонентів.

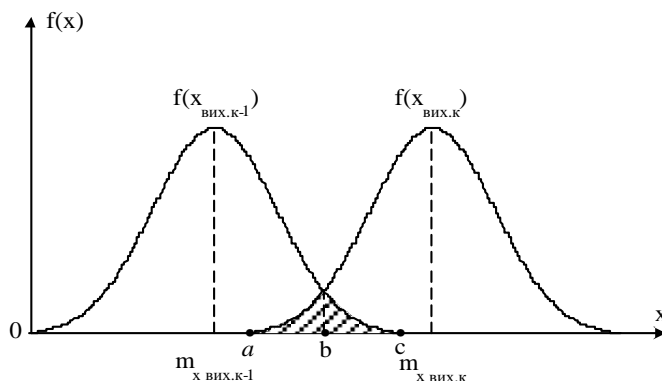


Рис. 3.12. Визначення ймовірності виникнення дефектів $P_{\text{деф}}$ у разі порушення умови $x_{\text{вих.к-1}} < x_{\text{вх.к}}$

Якщо розподіли параметрів $x_{\text{вих.к-1}} < x_{\text{вх.к}}$ характеризуються асиметричністю і гостровершинністю, які оцінюють коефіцієнтами асиметрії $A_{x_{\text{вих.к-1}}}$ і $A_{x_{\text{вх.к}}}$ і $E_{x_{\text{вих.к-1}}}$ і $E_{x_{\text{вх.к}}}$, то такі розподіли можна описати рядом Грама–Шарльє:

$$f_A(x_{\text{вих.к-1}}) = f(x_{\text{вих.к-1}}) - \frac{Ax_{\text{вих.к-1}}}{3!} f^{(3)}(x_{\text{вих.к-1}}) + \frac{Ex_{\text{вих.к-1}}}{4!} f^{(4)}(x_{\text{вих.к-1}}), \quad (3.59)$$

$$f_A(x_{\text{вх.к}}) = f(x_{\text{вх.к}}) - \frac{Ax_{\text{вх.к}}}{3!} f^{(3)}(x_{\text{вх.к}}) + \frac{Ex_{\text{вх.к}}}{4!} f^{(4)}(x_{\text{вх.к}}). \quad (3.60)$$

Ймовірність наявності дефекту системи визначається рівнянням

$$\begin{aligned}
 P_{\text{деф}} = & \int_a^b f_A(x_{\text{вх.к}}) dx + \int_b^c f_A(x_{\text{вих.к-1}}) dx = \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) - \\
 & - \Phi\left(\frac{a - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) - \frac{Ax_{\text{вх.к}}}{3!} \left[f^{(2)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) - f^{(2)}\left(\frac{a - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) \right] + \\
 & + \frac{Ex_{\text{вх.к}}}{4!} \left[f^{(3)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) - f^{(3)}\left(\frac{a - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) \right] + \Phi\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - \\
 & \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - \frac{Ax_{\text{вих.к-1}}}{3!} \left[f^{(2)}\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - f^{(2)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) \right] + \\
 & + \frac{Ex_{\text{вих.к-1}}}{4!} \left[f^{(3)}\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - f^{(3)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) \right]. \quad (3.61)
 \end{aligned}$$

Аналогічно знаходять ймовірність наявності дефектності для третьої умови (рис. 3.13).

$$P_{\text{деф}} = \int_a^b f(x_{\text{вих.к-1}}) dx + \int_b^c f(x_{\text{вх.к}}) dx. \quad (3.62)$$

У випадку нормальних законів розподілів $f(x_{\text{вх.к}})$ і $f(x_{\text{вих.к-1}})$ $P_{\text{деф}}$ обчислюють за допомогою рівняння:

$$P_{\text{деф}} = \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - \Phi\left(\frac{a - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) + \Phi\left(\frac{c - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right) - \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вх.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вх.к}}}}\right). \quad (3.63)$$

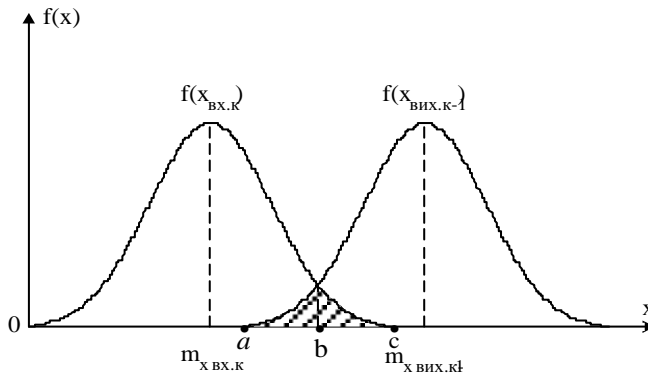


Рис. 3.13. Визначення ймовірності виникнення дефектів $P_{\text{деф}}$ у разі порушення умови $x_{\text{вих.к-1}} > x_{\text{вх.к}}$

За наявності асиметрії та гостровершинності розподілів $x_{\text{вих.к-1}}$ і $x_{\text{вих.к}}$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{деф}} = & \int_a^b f_A(x_{\text{вих.к-1}}) dx + \int_b^c f_A(x_{\text{вих.к}}) dx = \Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - \\
 & -\Phi\left(\frac{a - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - \frac{Ax_{\text{вих.к-1}}}{3!} \left[f^{(2)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - f^{(2)}\left(\frac{a - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) \right] + \\
 & + \frac{Ex_{\text{вих.к-1}}}{4!} \left[f^{(3)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) - f^{(3)}\left(\frac{a - m_{x_{\text{вих.к-1}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к-1}}}}\right) \right] + \Phi\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к}}}}\right) - \\
 & -\Phi\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к}}}}\right) - \frac{Ax_{\text{вих.к}}}{3!} \left[f^{(2)}\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к}}}}\right) - f^{(2)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к}}}}\right) \right] + \\
 & + \frac{Ex_{\text{вих.к}}}{4!} \left[f^{(3)}\left(\frac{c - m_{x_{\text{вих.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к}}}}\right) - f^{(3)}\left(\frac{b - m_{x_{\text{вих.к}}}}{\sigma_{x_{\text{вих.к}}}}\right) \right].
 \end{aligned} \tag{3.64}$$

Задача виконання другої умови $x_{\text{вих.к-1}} \approx x_{\text{вих.к}}$ не має однозначного розв'язку. Залежно від співвідношення дисперсій вхідних і вихідних параметрів і положень математичних очікувань цих двох розподілів можна виділити як мінімум два варіанти визначення $P_{\text{деф}}$ (рис. 3.14).

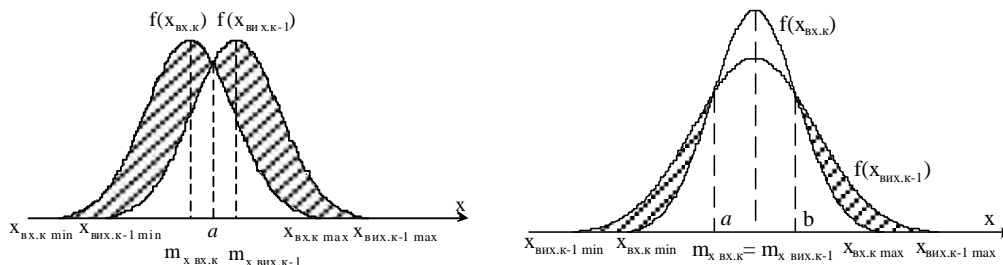


Рис. 3.14. Приклади визначення $P_{\text{деф}}$ для двох варіантів розподілів $f(x_{\text{вих.к}})$ і $f(x_{\text{вих.к-1}})$

У першому варіанті, якщо $m_{x_{\text{вих.к}}} \neq m_{x_{\text{вих.к-1}}}$

$$P_{\text{деф}} = 1 - \int_{x_{\text{вих.к-1.мін}}}^a f(x_{\text{вих.к-1}}) dx - \int_a^{x_{\text{вих.к.макс}}} f(x_{\text{вих.к}}) dx; \tag{3.65}$$

або

$$\begin{aligned}
 P_{\text{деф}} = & \int_{x_{\text{вих.к.мін}}}^a f(x_{\text{вих.к}}) dx - \int_{x_{\text{вих.к-1.мін}}}^a f(x_{\text{вих.к-1}}) dx + \\
 & + \int_a^{x_{\text{вих.к-1.макс}}} f(x_{\text{вих.к-1}}) dx - \int_a^{x_{\text{вих.к.макс}}} f(x_{\text{вих.к}}) dx.
 \end{aligned} \tag{3.66}$$

Ці залежності є тотожними за умови:

$$\int_{x_{\text{ВХ.К.мін}}}^a f(x_{\text{ВХ.К}})dx + \int_a^{x_{\text{ВИХ.К-1.макс}}} f(x_{\text{ВИХ.К-1}})dx = 1. \quad (3.67)$$

У другому варіанті, якщо $m_{x_{\text{ВХ.К}}} = m_{x_{\text{ВИХ.К-1}}}$, $\sigma_{x_{\text{ВХ.К}}} < \sigma_{x_{\text{ВИХ.К-1}}}$

$$P_{\text{деф}} = 1 - \int_{x_{\text{ВХ.К.мін}}}^a f(x_{\text{ВХ.К}})dx + \int_a^b f(x_{\text{ВИХ.К-1}})dx + \int_b^{x_{\text{ВХ.К.макс}}} f(x_{\text{ВХ.К}})dx. \quad (3.68)$$

Вхідні й вихідні параметри радіоелектронних пристроїв та їх складових у загальному випадку є функціями часу. Це означає, що параметри виробів розподілів у процесі експлуатації також є функціями часу.

Розв'язуючи задачі оптимального синтезу компонентів задля забезпечення їх надійної роботи, слід враховувати сумісні зміни у часі функцій щільності розподілу вихідних параметрів $k-1$ -го елемента і вхідних параметрів k -го елемента, тобто зміни у часі функцій $f(x_{\text{ВИХ.К-1}})$ і $f(x_{\text{ВХ.К}})$.

Графічну ілюстрацію зміни надійності сумісної роботи двох компонентів наведено на рис. 3.15. З цього рисунка очевидно, що надійна сумісна робота елементів системи можлива за відповідного узгодження характеристик розподілів вихідних параметрів $k-1$ -х компонентів з вхідними параметрами k -х компонентів. Ці узгодження повинні враховувати реальні виробничі розкиди параметрів елементів, а також їх дрейфи під дією дестабілізуючих факторів. Очевидно, що такий підхід можна реалізувати за наявності апріорної інформації про закономірності початкових розподілів параметрів і зміни цих розподілів у процесі виробництва і експлуатації пристроїв. Але не виключено, якщо це

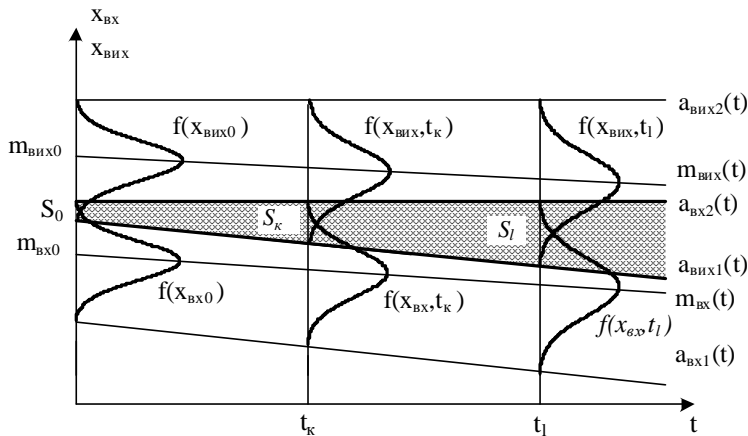


Рис. 3.15. Зміна надійності сумісної роботи двох елементів системи:
 $\alpha_{\text{ВХ1}}(t)$, $\alpha_{\text{ВХ2}}(t)$, $\alpha_{\text{ВИХ1}}(t)$, $\alpha_{\text{ВИХ2}}(t)$ – квантілі розподілів вхідних і вихідних параметрів;
 S_0 , S_k і S_l – площі, які виникають внаслідок перетину розподілів вхідних і вихідних параметрів у моменти $t = 0$, t_k і t_l

можливо, і корекцію параметрів суміжних елементів. Корекція передбачає встановлення під час проектування схем таких початкових значень вхідних і вихідних параметрів суміжних компонентів, які з урахуванням їх виробничих розкидів і відхилень під впливом дестабілізуючих факторів і старіння забезпечують необхідну ймовірність безвідмовної роботи виробів у передбачених умовах протягом заданого періоду експлуатації. Зрозуміло, що параметрична корекція вхідних і вихідних параметрів можлива у межах, які визначаються областями працездатності схем.

3.7. Моделювання процесів утворення дефектності під час виробництва РЕА

Виготовлення будь-якого виробу відбувається в умовах постійного впливу на технологічні процеси великої кількості дестабілізуючих факторів. При цьому створюються умови виникнення дефектів, які надалі можна кваліфікувати як брак. За суттю ці фактори здебільшого мають випадковий характер і тому поява дефектів виробництва переважно є випадковою подією. У цій роботі оцінкою якості технологічного процесу слугує імовірність появи (вводу) дефектів під час виконання технологічної операції. Зміст такої оцінки очевидний з умови:

$$P_{в.к,i} = P(X_{к,i} > X_{к,i}^{доп}), \quad (3.69)$$

де $X_{к,i}$ – значення похибки, яка виникає під час виконання технологічної операції; $X_{к,i}^{доп}$ – допустиме значення похибки; $P_{в.к,i}$ – імовірність того, що виробнича похибка перевищить допустиме її значення.

Суть виробничих похибок різна. Найчастіше похибки, допущені на попередніх кроках технологічного процесу, повністю не виявляються і не усуваються, переміщуючись на наступні стадії технологічного процесу. Наприклад, всі без винятку технологічні методи формоутворення характеризуються похибками розмірів і відхиленнями форми виготовлених деталей. Внаслідок термообробки виникають деформації і, як наслідок, погіршення точності розмірів, закладених на попередніх стадіях технологічного процесу. До того ж можуть змінитися також електричні та магнітні властивості матеріалів, відновити які можливо лише частково.

Під час нанесення гальванічних покриттів похибки, допущені на попередніх операціях підготовки поверхні у вигляді підвищеної шорсткості, можна зменшити шаром металу відповідної товщини, який наносять на шорстку поверхню. Однак цей метал створить механічні напруження й інші негативні ефекти. Неякісна

обробка поверхні підшарків мікросхем призводить до нестабільності електричних параметрів резисторів й інших елементів, які сформовані на поверхні.

Під час виконання операцій складання виробничі дефекти виникають внаслідок розміщення стикувальних параметрів компонентів, що сумісно працюють, за межами допусків, встановлених з метою забезпечення їх параметричної безвідмовності тощо.

Отже, якість будь-якого процесу формування заданих властивостей виробів (деталі, вузла, блока і пристрою загалом) завжди характеризується середнім рівнем дефектності, який кількісно оцінюється імовірністю вводу дефектів $P_{в.к,i}$ під час виконання i -ї технологічної процедури. Імовірність вводу дефектів можна прийняти за об'єктивну міру якості не тільки виробу, а і технологічної операції, маршруту і технологічного процесу загалом.

Узагальнену схему формування дефектності підсистемою $S_{ТОк}$ зображено на рис. 3.16.

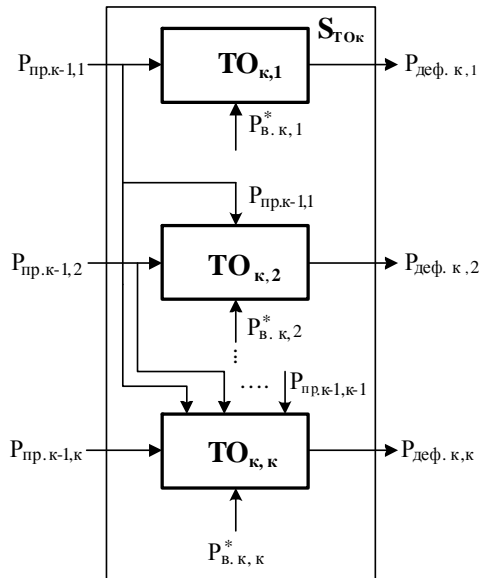


Рис. 3.16. Формування дефектності під час виконання k -ї технологічної операції на k -му кроці технологічного процесу (підсистема $S_{ТОк}$)

Під час формування k -го параметра на k -му кроці технологічного процесу явище вводу дефекту в загальному вигляді описується функцією:

$$P_{в.к,i} = \varphi(P_{в.к,i}^*, P_{пр.к-1,i}), \quad (3.70)$$

де $P_{в.к,i}^*$, $i = \overline{1, k}$ – імовірність вводу дефектів під час виконання i -ї технологічної операції на k -му кроці технологічного процесу з причин недосконаlosti

технологічного обладнання, дефектності матеріалів й інших ресурсів, помилок персоналу; $P_{\text{пр.к-1},i}, i = \overline{1, k}$ – імовірність пропуску дефектів, допущених і не усунутих на попередніх кроках технологічного процесу, які досягли к-го кроку і спричинили виникнення дефектності на цьому кроці.

Схема формування дефектності виробів, пропущеної з к-го кроку технологічного процесу, зображена на рис. 3.17.

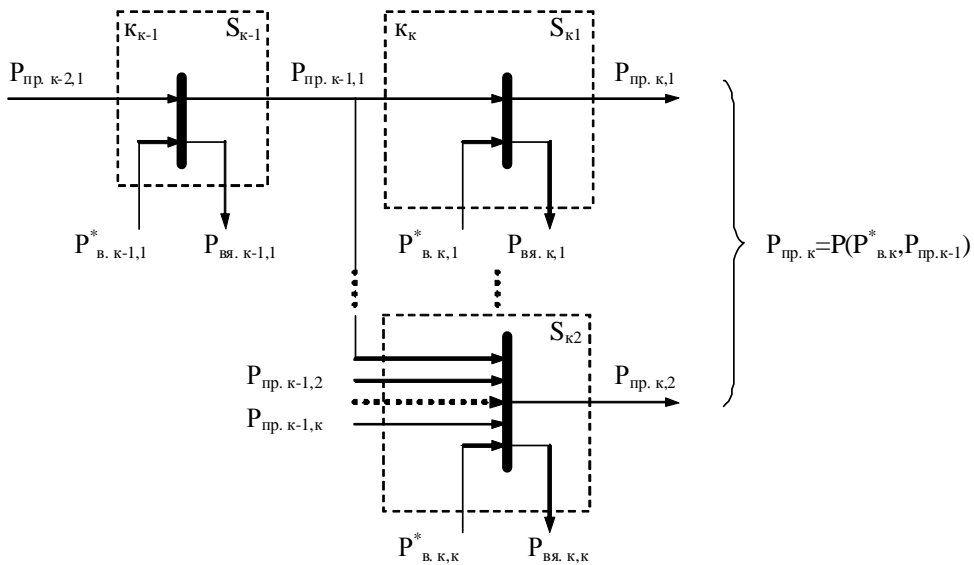


Рис. 3.17. Формування пропущеної дефектності з к-го кроку технологічного процесу

Сумарне значення імовірності пропуску дефектів $P_{\text{пр.к}}$ з к-го кроку технологічного процесу, зображеного на рисунку у вигляді мережі Петрі, визначається імовірнісним підсумовуванням парціальних імовірностей пропуску дефектів за кожним сформованим параметром

$$P_{\text{пр.к}} = P_{\text{пр.к,1}} \oplus P_{\text{пр.к,2}} \oplus \dots \oplus P_{\text{пр.к,к}}, \quad (3.71)$$

де \oplus – символ імовірнісного підсумовування.

Аналізуючи процеси формування дефектності виробів, необхідно розглянути ще одну причину їх виникнення. Численні матеріали, які використовуються у технологічних процесах виготовлення РЕА, по-різному впливають на виникнення дефектності. Найбільшою є група основних або субстанційних матеріалів, призначених для виготовлення деталей та вузлів несучих конструкцій, механізмів, комутаційних пристроїв, хвилеводів, резонаторів тощо. Якість цих виробів безпосередньо залежить від якості використаних матеріалів.

До цих матеріалів належать сплави на основі заліза, міді, алюмінію, нікелю, кобальту, хрому й інших металів, а також пластмаси, кераміка, ферити, напівпровідникові й інші матеріали.

Іншу частину матеріалів, які традиційно називають допоміжними, використовують для забезпечення нормального режиму технологічного процесу і отримання заданих характеристик виробів. Це – гази, реактиви для очищення і травлення, електроліти, розчинники, емульсії, суспензії тощо. Хоча ці матеріали і не створюють матеріальної основи деталей, вони значною мірою визначають процес формування їх властивостей і, отже, істотно впливають на виникнення дефектності виробів.

Враховуючи наведене, імовірність $P_{\text{пр.к-1}}$ є складною функцією, аргументами якої є парціальні імовірності пропуску дефектів, що виникли під час виконання технологічних операцій на попередніх стадіях виробничого процесу, а також імовірності пропуску дефектів основних та допоміжних матеріалів, використаних на к-му кроці:

$$P_{\text{пр.к-1}} = P(P_{\text{пр.к-1,1}}; P_{\text{пр.к-1,2}}; \dots, P_{\text{пр.к-1,к-1}}; P_{\text{пр.о.к-1}}; P_{\text{пр.д.к-1}}), \quad (3.72)$$

де $P_{\text{пр.о.к-1}}$ – імовірність пропуску дефектів основних матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, які використовуються під час виконання к-ї технологічної операції на к-му кроці технологічного процесу.; $P_{\text{пр.д.к-1}}$ – імовірність пропуску дефектів допоміжних матеріалів.

Схему формування дефектності виробів з імовірністю $P_{\text{деф.к,к}}$ під час виконання к-ї технологічної операції ($TO_{\text{к,к}}$) на к-му кроці технологічного процесу показано на рис. 3.18.

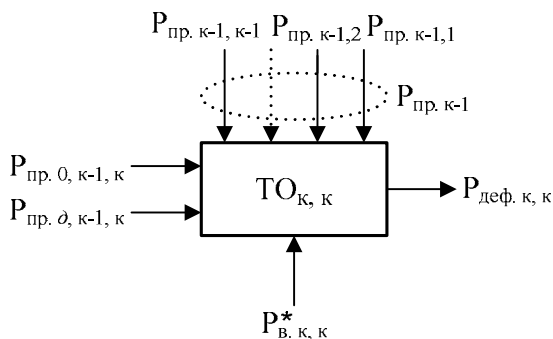


Рис. 3.18. Формування дефектності під час виконання к-ї технологічної операції

Імовірність $P_{\text{деф.к,к}}$ за суттю є переважно залежністю, що зростає, характер зміни якої визначається парціальним впливом пропущених дефектів з попередніх кроків технологічного процесу на якість виконання технологічних операцій на k -му кроці.

Взаємний вплив попередніх операцій на результати проведення наступних операцій і навпаки спричинює явище емергентності. Це явище спостерігається у двох проявах, а саме як емергентність у прямому і у зворотному напрямках. Емергентність у прямому напрямку проявляється у впливі дефектності, що виникла на попередніх кроках технологічного процесу, на якість проведення операції на k -му кроці. Емергентність у зворотному напрямку проявляється у впливі k -го кроку технологічного процесу на показники якості, сформовані на попередніх кроках. Ці явища, характерні для сучасних технологічних систем виробництва РЕА, вивчено поки що недостатньо.

Це стримує створення наскрізних математичних моделей забезпечення якості продукції та оптимізації цих процесів за критеріями якості відповідно до сучасних вимог.

Приклади формування дефектності з адитивними і мультиплікативними складовими наведено на рис. 3.19 і 3.20. Ці залежності отримано у результаті активного і пасивного експерименту на різних стадіях технологічного процесу виготовлення РЕА.

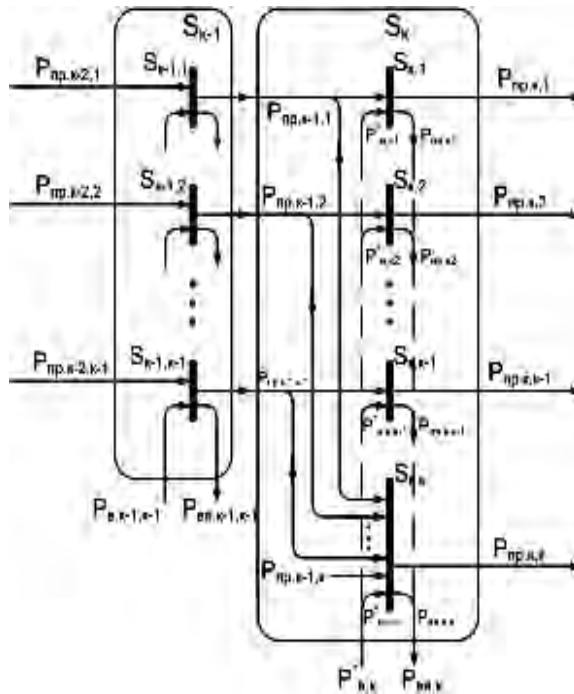


Рис. 3.19. Формування дефектності на рівні підсистем S_{k-1} і S_k

Мультиплікативність дефектності визначається характером імовірностей $P_{в.к,i}$, $i = \overline{1, k}$, які описуються залежностями

$$P_{в.к,1} = \varphi(P_{в.к,i}^*, P_{пр.к-1,j}), \quad j = \overline{\forall 1, k}. \quad (3.75)$$

При цьому

$$\begin{aligned} P_{деф.к,1} &= P_{пр.к-1,1} + (1 - P_{пр.к-1,1}) \cdot P_{в.к,1}(P_{в.к,1}^*, P_{пр.к-1,1}) \\ P_{деф.к,2} &= P_{пр.к-1,2} + (1 - P_{пр.к-1,2}) \cdot P_{в.к,2}(P_{в.к,2}^*, P_{пр.к-1,1}, P_{пр.к-1,2}) \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$P_{деф.к,k} = P_{пр.к-1,k} + (1 - P_{пр.к-1,k}) \cdot P_{в.к,k}(P_{в.к,k}^*, P_{пр.к-1,1}, P_{пр.к-1,2}, \dots, P_{пр.к-1,k-1}).$$

Емпіричні функції, що описують ці залежності, повинні забезпечувати такі умови:

$$\begin{aligned} P_{в.к,k} &= P_{в.к,k}^* \text{ при } P_{пр.к-1,i} = 0, \quad i = \overline{1, k-1}; \\ P_{в.к,k} &= 0 \text{ при } P_{в.к,k}^* = 0, \quad \forall P_{пр.к-1} = [0, 1]; \\ \lim P_{в.к,k} &= 1, \quad \forall P_{пр.к-1,i} = [0, 1]; \\ P_{в.к,k}^* &\rightarrow 1. \end{aligned} \quad (3.77)$$

Експериментально встановлено, що при серійному виробництві ряду видів радіоелектронної вимірювальної апаратури ці залежності задовільно описуються формулою

$$P_{в.к,k} = 1 - (1 - P_{в.к,k}^*) \exp[-K_a P_{в.к,k}^* (1 - P_{в.к,k}^*) P_{пр.к-1,i}], \quad (3.78)$$

де K_a – адаптаційний коефіцієнт, який визначається за формулою

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

Розглянемо ще одну виявлену особливість формування дефектності під час виконання багатокрокових технологічних процесів, характерну для радіотехнічного виробництва.

Хоча на кожному кроці технологічного процесу під час виконання k -ї технологічної операції, як правило, формується один (тобто k -й) показник якості, потрібно зважати на можливий вплив цієї процедури на показники якості, сформовані на попередніх кроках. Ці впливи на рис. 3.21 показано множиною імовірностей введення дефектів – $P_{в.к,1}$, $P_{в.к,2}$, ..., $P_{в.к,k-1}$, під час виконання фіктивних технологічних операцій $TO_{к,1}$; $TO_{к,2}$; ... $TO_{к,k-1}$. До того ж

$$P_{в.к,i} = P_{в.к,k} \cdot P_{в.к}(i), \quad (3.79)$$

де $P_{в.к}(i)$ – умовна імовірність вводу дефектів за i -м параметром, $i = \overline{1, k-1}$ за умови, що $P_{в.к,k} = 1$. Визначається статистично.

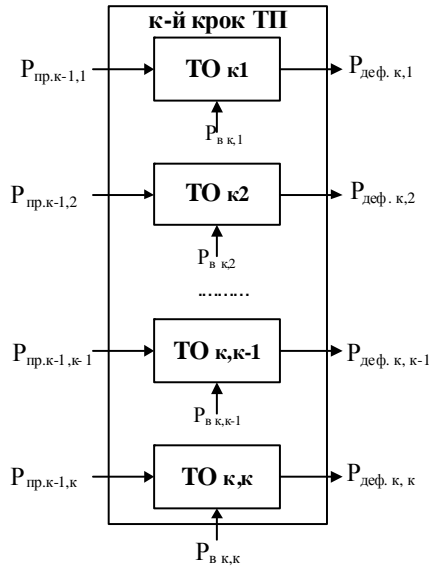


Рис. 3.21. Схема формування дефектності на к-му кроці технологічного процесу

Виконавши численні активні та пасивні експерименти в умовах реального виробництва радіоелектронних пристроїв різного призначення, встановили, що з урахуванням впливу дефектів, які виникли на попередніх стадіях технологічного процесу і досягли к-го кроку, матриця вводу дефектів $P_{в.к}$ набуває такого вигляду:

$$P_{в.к.} = \left\| \begin{array}{l} P_{в.к,1} = f_{к,1}(P_{в.к,1}^*, P_{пр.к-1,1}) \\ P_{в.к,2} = f_{к,2}(P_{в.к,2}^*, P_{пр.к-1,1}, P_{пр.к-1,2}) \\ \dots \\ P_{в.к,к} = f_{к,к}(P_{в.к,к}^*, P_{пр.к-1,1}, P_{пр.к-1,2}, \dots, P_{пр.к-1,к}) \end{array} \right\| . \quad (3.80)$$

Досліджуючи утворення дефектності під час виконання окремих технологічних процедур, виявили неоднозначність їх впливу на вихідну дефектність виробів. З'ясовано, що деякі технологічні операції є не тільки потенційними джерелами виробничих дефектів, а й одночасно процедурами, що характеризуються коректуючими властивостями щодо цих дефектів. Під час виконання таких операцій, як, наприклад, нанесення хімічних та гальванічних покриттів на поверхні з нормованою шорсткістю, виконання міжшарових з'єднань, групове паяння друкованих плат тощо, зменшується дефектність, що виникла на попередніх кроках технологічного процесу.

Встановлено також, що дефектність виробів на будь-якому кроці технологічного процесу визначається не тільки можливим введенням дефектів параметра, який формується на цьому кроці. Реальним є те, що через неякісне виконання технологічної операції створюються умови виникнення дефектів і за іншими параметрами, зокрема за сформованими на попередніх стадіях виробництва. До такої групи операцій належать технологічні операції формоутворення, які ґрунтуються на механічній, термічній, хімічній, електрофізичній і віброхімічній обробці матеріалів, виготовлення деталей з порошків тощо. Ці операції – основа сучасних технологічних процесів виготовлення деталей литвом під тиском, холодним та гарячим штампуванням, пресуванням, виготовлення деталей з феритів, ситалів, кераміки тощо. До цієї групи можна зарахувати технологічні процеси, які реалізують групові методи виробництва, коли на k -му кроці одночасно обробляється деяка множина виробів. Прикладами таких процесів можуть бути нанесення хімічних і гальванопокрыть, групове паяння друкованих плат, обробка кремнієвих пластин під час виготовлення мікросхем, напилення плівок, епітаксія, дифузія, термообробка тощо. Ці процеси характеризуються тим, що неякісне виконання будь-якої операції може погіршити попередньо сформовані параметри виробів аж до виникнення остаточного браку.

Отже, матриця $P_{в.к}$ складається з уточнених (скоректованих) значень імовірностей пропуску дефектів з попередніх кроків. Глибина вводу дефектів визначається множиною уявних технологічних процедур на k -му кроці технологічного процесу, які характеризуються значущими значеннями імовірностей вводу дефектів $P_{в.к}(i)$.

$$P_{в.к}(i) \geq P_{в.к.гр}(i), \quad (3.81)$$

де $P_{в.к.гр}(i)$ – апіорі встановлене граничне значущее значення імовірності $P_{в.к}(i)$.

Моделі процесів формування та контролю якості виробів, щоб скоротити машинний час під час розв'язання оптимізаційних задач, треба звільнити від малозначущих елементів.

Для повного технологічного процесу цієї групи матриця дефектності $P_{деф}$ набуває вигляду

$$P_{деф} = \begin{pmatrix} P_{деф.1,1}(P_{пр.0,1}, P_{в.1,1}) & P_{деф.2,1}(P_{пр.1,1}, P_{в.2,1}) & \dots & P_{деф.n,1}(P_{пр.n-1,1}; P_{в.n,1}) \\ 0 & P_{деф.2,2}(P_{пр.1,2}, P_{в.2,2}) & \dots & P_{деф.n,2}(P_{пр.n-1,2}; P_{в.n,2}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{деф.n,n}(P_{пр.n-1,n}; P_{в.n,n}) \end{pmatrix}. \quad (3.82)$$

К-й крок технологічного процесу характеризується множиною імовірностей наявності дефектів $P_{\text{деф.к},i}$, $i = \overline{1, k}$:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{деф.к},1} &= P_{\text{пр.к-1},1} + (1 - P_{\text{пр.к-1},1}) P_{\text{в.к},1}, \\
 P_{\text{деф.к},2} &= P_{\text{пр.к-1},2} + (1 - P_{\text{пр.к-1},2}) P_{\text{в.к},2}, \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 P_{\text{деф.к},k-1} &= P_{\text{пр.к-1},k-1} + (1 - P_{\text{пр.к-1},k-1}) P_{\text{в.к},k-1}, \\
 P_{\text{деф.к},k} &= P_{\text{пр.к-1},k} + (1 - P_{\text{пр.к-1},k}) P_{\text{в.к},k}.
 \end{aligned}
 \tag{3.83}$$

Сумарна імовірність наявності дефектів $P_{\text{деф.к}}$ після виконання к-ї технологічної операції визначається з рівняння

$$P_{\text{деф.к}} = P_{\text{деф.к},1} \oplus P_{\text{деф.к},2} \oplus \dots \oplus P_{\text{деф.к},k}.$$

До того ж зазначимо, що події виникнення дефектності за кожним параметром під час виконання технологічної операції на к-му кроці технологічного процесу здебільшого можна вважати сумісними незалежними подіями. Тому оцінити сумарну дефектність виробів на к-му кроці технологічного процесу можна, обчисливши імовірність суми відповідної кількості сумісних незалежних подій виникнення дефектів за кожним з параметрів виробів:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{деф.1}} &= P_{\text{деф.1},1} \\
 P_{\text{деф.2}} &= P_{\text{деф.2},1} + P_{\text{деф.2},2} - P_{\text{деф.2},1} \cdot P_{\text{деф.2},2} \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 P_{\text{деф.к}} &= P_{\text{деф.к},1} + P_{\text{деф.к},2} + \dots + P_{\text{деф.к},k} - P_{\text{деф.к},1} \cdot P_{\text{деф.к},2} - P_{\text{деф.к},1} \cdot P_{\text{деф.к},3} - \dots \\
 &\dots - P_{\text{деф.к},k-1} \cdot P_{\text{деф.к},k} + P_{\text{деф.к},1} \cdot P_{\text{деф.к},2} \cdot P_{\text{деф.к},3} + \dots \\
 &\dots - P_{\text{деф.к},k-2} \cdot P_{\text{деф.к},k-1} \cdot P_{\text{деф.к},k} \cdot \dots + \dots \\
 &\dots + (-1)^{k-1} P_{\text{деф.к},1} \cdot P_{\text{деф.к},2} \cdot \dots \cdot P_{\text{деф.к},k}.
 \end{aligned}
 \tag{3.84}$$

Особливістю об’єднаних у другу групу технологічних процесів є те, що формування властивостей виробів на к-му кроці істотно не впливає на параметри, сформовані на попередніх кроках (рис. 3.22).

До цієї групи належать процеси нанесення хімічних, гальванічних, лакофарбових покриттів, заливання, просочування, герметизації, обволікання тощо. Під час виконання таких процедур властивості раніше сформованих виробів помітно не погіршуються.

До них належать збирання, монтаж і регулювання систем та компонентів. Характерним прикладом таких технологічних процесів є збирання системи, що складається з окремих пристроїв у блоковому виконанні. Процедура збирання і регулювання системи практично не впливає на раніше сформовані параметри складових частинок. При тому

$$\begin{aligned}
 P_{\text{пр.к-1},i} &\neq 0 \quad i = \overline{1, k} \\
 P_{\text{в.к},k} &\neq 0 \\
 P_{\text{в.к},i} &= 0 \quad i = \overline{1, k-1}.
 \end{aligned}
 \tag{3.85}$$

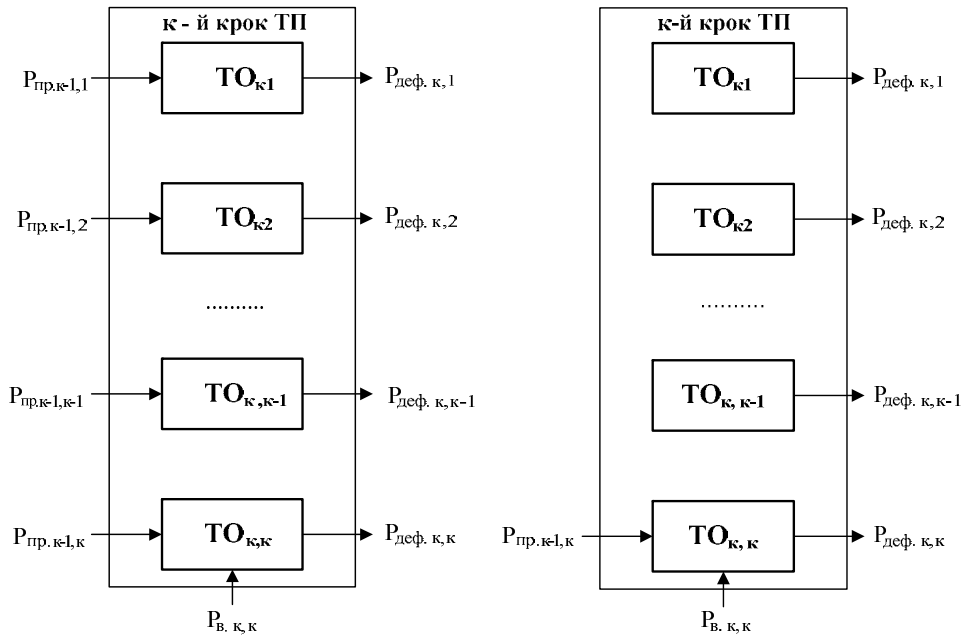


Рис. 3.22. Варіанти схеми формування дефектності на *к*-му кроці технологічного процесу

Складові сумарної дефектності виробів після виконання *к*-ї технологічної операції визначаються так:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{деф.к,1}} &= P_{\text{пр.к-1,1}} \\
 P_{\text{деф.к,2}} &= P_{\text{пр.к-1,2}} \\
 &\dots \dots \dots \\
 P_{\text{деф.к,к-1}} &= P_{\text{пр.к-1,к-1}} \\
 P_{\text{деф.к,к}} &= P_{\text{пр.к-1,к}} + (1 - P_{\text{пр.к-1,к}})P_{\text{в.к,к}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.86}$$

Встановлено, що ця група процесів, на відміну від першої, характеризується малим зростанням адитивної складової за *і*-м параметром.

Матриця дефектності процесів другої групи має вигляд:

$$P_{\text{деф}} = \begin{pmatrix} P_{\text{деф.1,1}} = P_{\text{пр.0,1}} & P_{\text{деф.2,1}} = P_{\text{пр.1,1}} & \dots & P_{\text{деф.н,1}} = P_{\text{пр.н-1,1}} \\ 0 & P_{\text{деф.2,2}} = P_{\text{пр.1,2}} & \dots & P_{\text{деф.н,2}} = P_{\text{пр.н-1,2}} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{\text{деф.н,н}} (P_{\text{пр.н-1,н}}; P_{\text{в.н,н}}) \end{pmatrix}. \tag{3.87}$$

До третьої групи належать процеси, які також характеризуються малим впливом k -ї технологічної операції на попередньо сформовані параметри (рис. 3.22). Це спостерігають тоді, коли якість вхідних матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів і цілих блоків настільки висока, що їх вхідний контроль виконувати недоцільно. До того ж дефектність, що виникла на k -му кроці технологічного процесу, переважно визначається якістю виконання самої k -ї операції. Умовами виникнення дефектності є

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.к-1},i} &= 0; \quad i = \overline{1, k-1}, \\ P_{\text{пр.к-1},ik} &\neq 0; \quad P_{\text{в.к},i} = 0, \quad i = \overline{1, k-1}, \\ P_{\text{в.к},k} &\neq 0. \end{aligned} \quad (3.88)$$

Складовими сумарної дефектності є

$$\begin{aligned} P_{\text{деф.к},1} &= 0 \\ P_{\text{деф.к},2} &= 0 \\ &\dots \dots \dots \\ P_{\text{деф.к},k} &= P_{\text{в.пр.к-1},k} + (1 - P_{\text{пр.к-1},k}) P_{\text{в.к},k}. \end{aligned} \quad (3.89)$$

$$P_{\text{деф}} = \begin{pmatrix} P_{\text{деф.1},1} = 0 & P_{\text{деф.2},1} = 0 & \dots & P_{\text{деф.н},1} = 0 \\ 0 & P_{\text{деф.2},2} = 0 & \dots & P_{\text{деф.н},2} = 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{\text{деф.н},n} (P_{\text{пр.н-1},n}; P_{\text{в.н},n}) \end{pmatrix}. \quad (3.90)$$

Зауважимо, що, хоча з формального погляду першу з наведених схем можна розглядати як основну універсальну схему виникнення дефектності, а другу та третю – як різновиди першої, емергентна суть кожної з них визначається специфікою застосованих технологій, особливостями організації виробничих процесів й іншими факторами, які нерідко є істотно різними. Технологічні системи, у яких дефектність формується за першою схемою, характеризуються більшою мультиплікативною складовою дефектності порівняно з системами, які працюють за другою і третьою схемами.

3.8. Моделювання дефектності n -крокового технологічного процесу

Багатокрокові процеси виготовлення радіоелектронних пристроїв розглядаються як множина локальних підсистем $S_{k,i}$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, n}$, що функціонують на кожному кроці технологічного процесу, забезпечуючи необхідні властивості

виробів, які характеризуються відповідними показниками якості. Вхідними параметрами підсистем є потоки дефектів, що надходять з попередніх кроків з ймовірностями $P_{пр.к-1,i}$ і вводяться у вироби під час виконання технологічних процедур з ймовірностями $P_{в.к,i}$. Вихідними параметрами підсистем є потоки пропущених дефектів з ймовірностями $P_{пр.к,i}$ і потоки виявлених під час контролю дефектів з відповідними ймовірностями $P_{вя.к,i}$. Технологічні процеси найчастіше характеризуються послідовним, паралельним та змішаним функціонуванням підсистем у системі S_k (рис. 3.23).

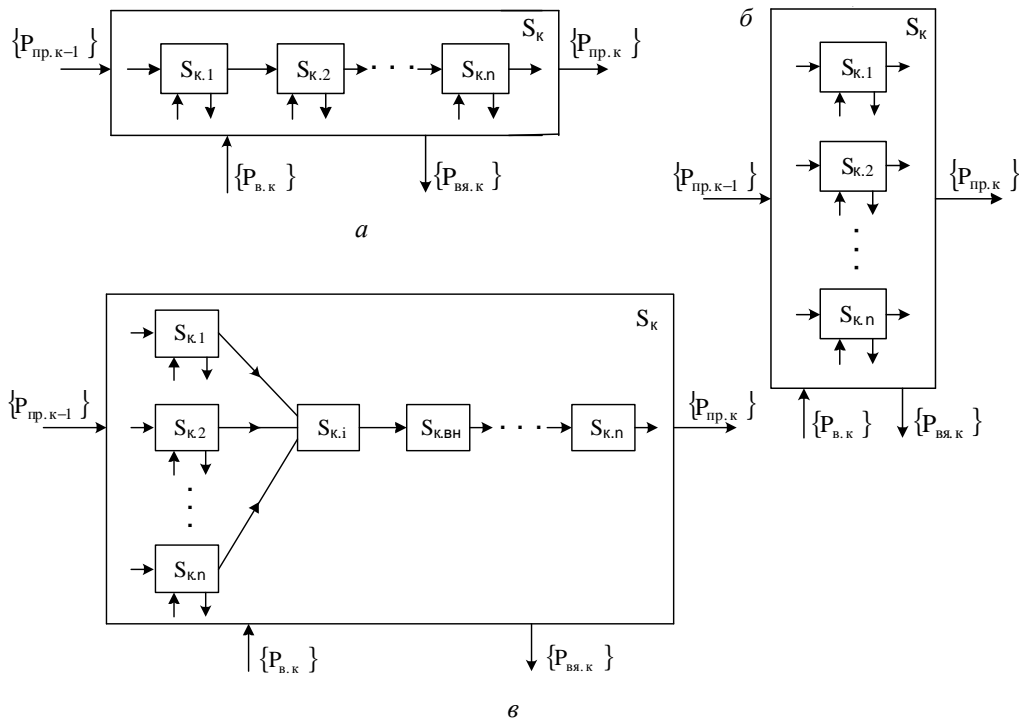


Рис. 3.23. Варіанти структури формалізованої системи S_k :
а – послідовна; б – паралельна; в – комбінована

Послідовна структура технологічних процесів характерна для виконання операцій формоутворення: механічна, термічна, хімічна, електроерозійна, віброхімічна тощо обробки матеріалів, що є основою технологій виготовлення більшості деталей сучасних радіоелектронних пристроїв.

У групу процесів паралельної структури входять технологічні процеси, що ґрунтуються на групових методах виготовлення, коли на одному кроці одночасно обробляється деяка множина виробів. Прикладами можуть бути гальванопокриття,

групове паяння друкованих плат, обробка кремнієвих пластин під час виготовлення інтегрованих мікросхем, наплення плівок, епітаксії, дифузії тощо.

Процеси змішаної структури відрізняються від процесів послідовної та паралельної структури тим, що до їх складу входить підсистема збирання і монтажу S_{Σ} . Результатом її функціонування є виріб з узагальненим показником якості, наприклад, з узагальненим значенням імовірності пропуску дефектів $P_{\text{пр}S_{\Sigma}}$.

Розглянемо три типові варіанти структури процесів, які зображені схемами послідовного, паралельного і змішаного з'єднання підсистем.

Схему n -крокового процесу послідовної структури показано на рис. 3.24.

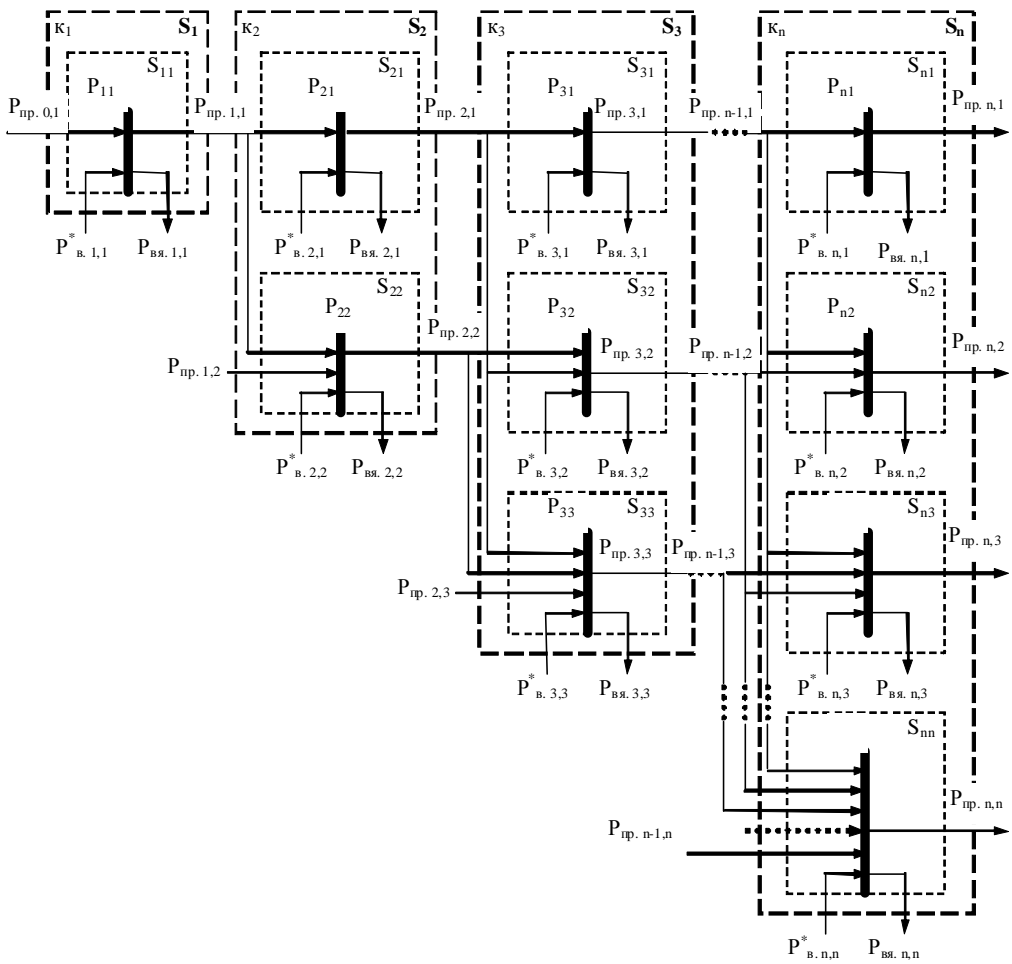


Рис. 3.24. n -кроковий процес послідовної структури

У цій структурі:

$$\begin{aligned} S_1 &= S(S_{1,1}); \\ S_2 &= S(S_{2,2}, S_{2,1}); \\ S_3 &= S(S_{3,3}, S_{3,2}, S_{3,1}); \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$S_n = S(S_{n,n}, S_{n,n-1}, \dots, S_{n,3}, S_{n,2}, S_{n,1}).$$

Технологічний процес послідовної структури описується матрицями:

– матриця ймовірностей входних дефектів

$$P_{\text{пр.вх}} = \begin{pmatrix} P_{\text{пр.0,1}} & P_{\text{пр.1,1}} & P_{\text{пр.2,1}} & \dots & P_{\text{пр.n-1,1}} \\ & P_{\text{пр.1,2}} & P_{\text{пр.2,2}} & \dots & P_{\text{пр.n-1,2}} \\ & & P_{\text{пр.2,3}} & \dots & P_{\text{пр.n-1,3}} \\ & & & \ddots & \\ & & & & P_{\text{пр.n-1,n}} \end{pmatrix}; \quad (3.91)$$

– матриця ймовірностей вводу дефектів на кожному кроці технологічного процесу

$$P_{\text{в}} = \begin{pmatrix} P_{\text{в.1,1}} & P_{\text{в.2,1}} & P_{\text{в.3,1}} & \dots & P_{\text{в.n,1}} \\ & P_{\text{в.2,2}} & P_{\text{в.3,2}} & \dots & P_{\text{в.n,2}} \\ & & P_{\text{в.3,3}} & \dots & P_{\text{в.n,3}} \\ & & & \ddots & \\ & & & & P_{\text{в.n,n}} \end{pmatrix}; \quad (3.92)$$

– матриця правильного контролю на кожному кроці технологічного процесу

$$P = \begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{2,1} & P_{3,1} & \dots & P_{n,1} \\ & P_{2,2} & P_{3,2} & \dots & P_{n,2} \\ & & P_{3,3} & \dots & P_{n,3} \\ & & & \ddots & \\ & & & & P_{n,n} \end{pmatrix}. \quad (3.93)$$

Математична модель невиявленої дефектності через неефективний контроль якості упродовж повного технологічного процесу набуває вигляду матричного рівняння:

$$|P_{\text{пр}}| = (|P_{\text{пр.вх}}| + |1 - P_{\text{пр.вх}}| \cdot |P_{\text{в}}|) \cdot |1 - P|. \quad (3.94)$$

Математична модель виявленої дефектності також зображається матричним рівнянням:

$$|P_{\text{вя}}| = (|P_{\text{пр.вх}}| + |1 - P_{\text{пр.вх}}| \cdot |P_{\text{в}}|) \cdot |P|. \quad (3.95)$$

Зазначимо, що в правій частині цих рівнянь підсумовування і множення матриць є ординарним, тобто почленним.

Останній стовпець матриці $|P_{пр}|$

$$P_{пр} = \begin{pmatrix} P_{пр.1,1} & P_{пр.2,1} & P_{пр.3,1} & \cdots & P_{пр.n,1} \\ & P_{пр.2,2} & P_{пр.3,2} & \cdots & P_{пр.n,2} \\ & & P_{пр.3,3} & \cdots & P_{пр.n,3} \\ & & & \ddots & \\ & & & & P_{пр.n,n} \end{pmatrix}. \quad (3.96)$$

містить значення ймовірностей пропуску виробничих дефектів за всіма показниками якості виробів, сформованими впродовж повного технологічного процесу. Матриця-стовпець $P_{пр.n}$:

$$P_{пр.n} = [P_{пр.n,1}, P_{пр.n,2}, \dots, P_{пр.n,n}]^T \quad (3.97)$$

об'єднує показники дефектності виробу за всіма параметрами, з якими він надходить в експлуатацію.

Елементи матриці $P_{пр.n}$ визначаються з використанням рекурентних залежностей:

$$\begin{aligned} P_{пр.n,1} &= \langle [P_{пр.n-2,1} + (1 - P_{пр.n-2,1})P_{в.n-1,1}] (1 - P_{н-1,1}) + \\ &+ \{1 - [P_{пр.n-2,1} + (1 - P_{пр.n-2,1})P_{в.n-1,1}] (1 - P_{н-1,1})\} P_{в.n,1} \rangle (1 - P_{н,1}); \\ P_{пр.n,2} &= \langle [P_{пр.n-2,2} + (1 - P_{пр.n-2,2})P_{в.n-1,2}] (1 - P_{н-1,2}) + \\ &+ \{1 - [P_{пр.n-2,2} + (1 - P_{пр.n-2,2})P_{в.n-1,2}] (1 - P_{н-1,2})\} P_{в.n,2} \rangle (1 - P_{н,2}); \\ &\dots\dots\dots \\ P_{пр.n,n} &= \{P_{пр.n-1,n} + (1 - P_{пр.n-1,n})P_{в.n,n}\} (1 - P_{н,n}). \end{aligned} \quad (3.98)$$

Стан виробів на виході технологічного процесу характеризується об'єднанням подій $A_{н,1}, A_{н,2}, \dots, A_{н,n}$ виникнення дефектів за кожним з показників якості й тому з урахуванням їх адитивності імовірність $P_{пр.n}$ наявності дефектів у виробі визначається з умови

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

За умови сумісності подій $A_{н,1}, A_{н,2}, \dots, A_{н,n}$ дефектність виробів за всіма показниками якості на виході технологічного процесу визначається імовірнісною сумою

$$\begin{aligned} P_{пр.n(1+2+\dots+n)} &= P_{пр.n,1} \oplus P_{пр.n,2} \oplus \dots \oplus P_{пр.n,n} = \\ &= \sum_{1 \leq i \leq n} P_{пр.n,i} - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P_{пр.n,i_1} P_{пр.n,i_2} + \dots + (-1)^{S-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq n} P_{пр.n,i_1} P_{пр.n,i_2} \times \dots \\ &\dots \times P_{пр.n,i_s} + \dots + (-1)^{n-1} P_{пр.n,1} P_{пр.n,2} \times \dots \times P_{пр.n,n}. \end{aligned} \quad (3.99)$$

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

Сумарний потік дефектів на виході технологічного процесу є сумою потоків дефектів матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів і потоків, що виникають внаслідок неякісного виконання технологічних операцій на всіх стадіях виробництва.

$$\begin{aligned} \omega_{\text{пр.н}} = & \{[(\omega_{\text{деф.0,1}} \delta_{0,1} + \omega_{\text{в.1,1}}) \delta_{11} + \omega_{\text{в.2,1}}] \delta_{2,1} + \dots + \omega_{\text{в.н,1}}\} \delta_{\text{н,1}} + \\ & + \{[(\omega_{\text{деф.0,2}} \delta_{0,2} + \omega_{\text{в.2,2}}) \delta_{2,2} + \omega_{\text{в.3,2}}] \delta_{3,2} + \dots + \omega_{\text{в.н,2}}\} \delta_{\text{н,2}} + \dots + \\ & + (\omega_{\text{деф.0,н}} \delta_{0,н} + \omega_{\text{деф.н,н}}) \delta_{\text{н,н}}, \end{aligned} \quad (3.100)$$

де $\delta_{k,i}$ – показник розрідження потоку виробничих дефектів.

Зрозуміло, що

$$\omega_{\text{пр.к,i}} \leq \omega_{\text{деф.к,i}}.$$

Між показником розрідження потоку $\delta_{k,i}$ та імовірнісними параметрами $P_{\text{деф.к,i}}$, $P_{\text{пр.к,i}}$ і $P_{k,i}$ існують залежності

$$\delta_{k,i} = \frac{P_{\text{пр.к,i}}}{P_{\text{деф.к,i}}} = 1 - P_{k,i}, \quad (3.101)$$

де $P_{k,i}$ – ймовірність правильного контролю, яка визначається за формулою

$$P_{k,i} = 1 - \frac{P_{\text{пр.к,i}}}{P_{\text{деф.к,i}}}.$$

Схеми n-крокового процесу паралельної структури і комбінованої послідовно-паралельної структури з процедурою збирання зображено на рис. 3.25 і 3.26.

Структура n-крокового процесу складається з множини підсистем

$$\begin{aligned} S_1^{(1)} &= S^{(1)}(S_{11}^{(1)}) \\ S_2^{(1)} &= S^{(1)}(S_{22}^{(1)} S_{21}^{(1)}) \\ &\dots \\ S_n^{(1)} &= S^{(1)}(S_{nn}^{(1)}, \dots, S_{n2}^{(1)}, S_{n1}^{(1)}) \\ S_1^{(2)} &= S^{(2)}(S_{11}^{(2)}) \\ S_2^{(2)} &= S^{(2)}(S_{22}^{(2)} S_{21}^{(2)}) \\ &\dots \\ S_n^{(2)} &= S^{(2)}(S_{nn}^{(2)}, \dots, S_{n2}^{(2)}, S_{n1}^{(2)}) \\ &\dots \\ S_1^{(m)} &= S^{(m)}(S_{11}^{(m)}) \\ S_2^{(m)} &= S^{(m)}(S_{22}^{(m)} S_{21}^{(m)}) \\ &\dots \\ S_n^{(m)} &= S^{(m)}(S_{nn}^{(m)}, \dots, S_{n2}^{(m)}, S_{n1}^{(m)}). \end{aligned} \quad (3.102)$$

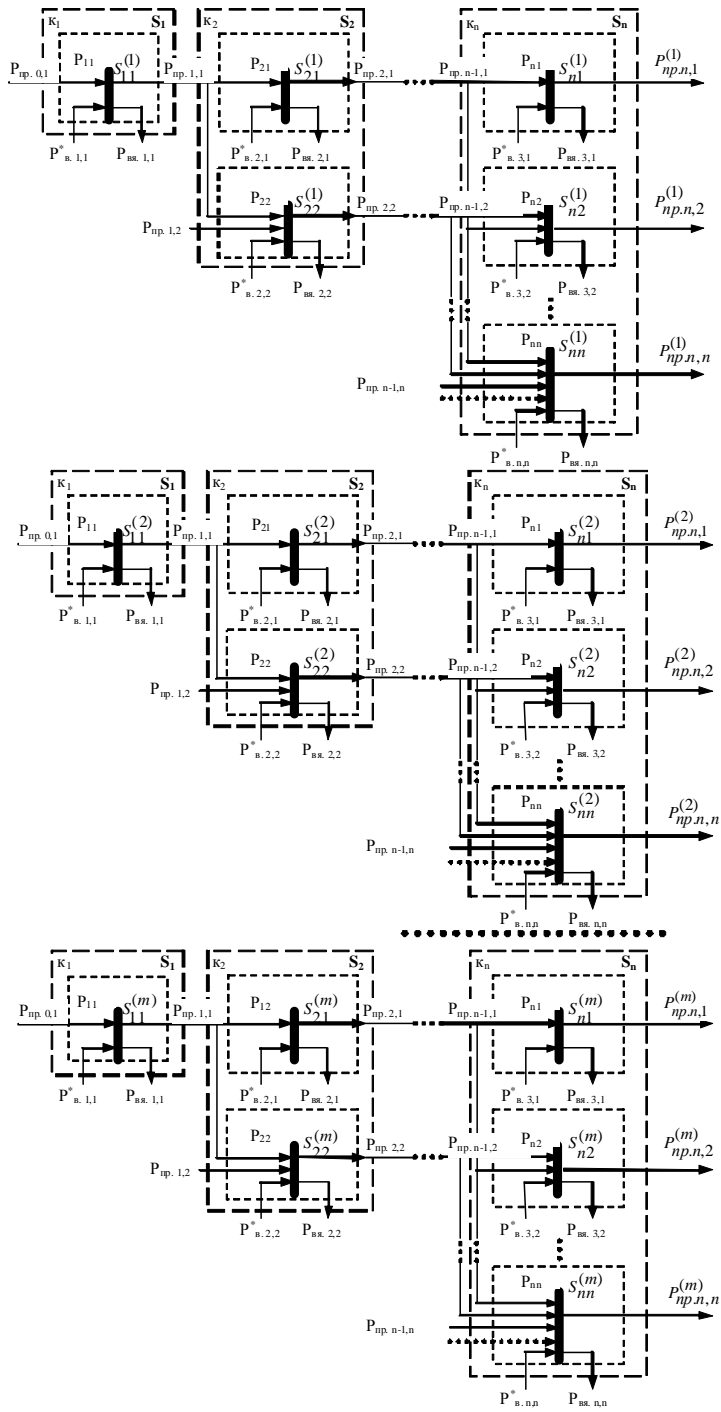


Рис. 3.25. Схема n -крокового процесу паралельної структури

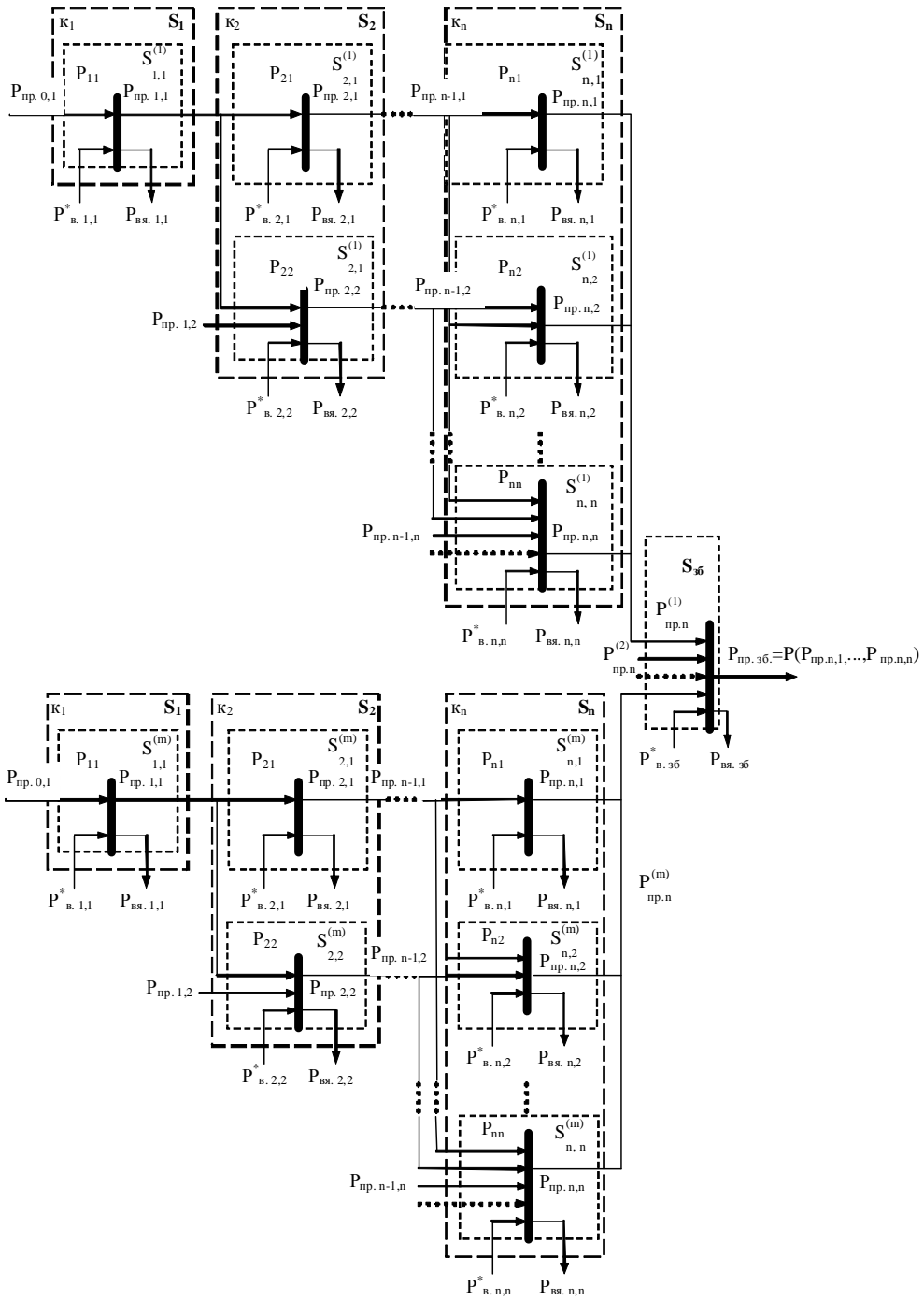


Рис. 3.26. Комбінована структура з процедурою збирання

множиною власних вхідних і вихідних параметрів. Вхідними параметрами цієї підсистеми є імовірності пропуску дефектів з n -х кроків маршрутів $1, 2, \dots, m$, тобто імовірності $P_{\text{пр.н.1}}^{(1)}, P_{\text{пр.н.2}}^{(1)}, \dots, P_{\text{пр.н.н}}^{(1)}, P_{\text{пр.н.1}}^{(2)}, P_{\text{пр.н.2}}^{(2)}, \dots, P_{\text{пр.н.н}}^{(2)}, \dots, P_{\text{пр.н.1}}^{(m)}, P_{\text{пр.н.2}}^{(m)}, \dots, P_{\text{пр.н.н}}^{(m)}$, а також імовірність вводу дефектів під час виконання збірної процедури – $P_{\text{в.зб}}$. Вихідними параметрами є імовірність виявлення дефектів під час контролювання якості процедури збирання $P_{\text{вя.зб}}$ та імовірність пропуску дефектів під час контролювання якості.

У загальному випадку математична модель дефектності виробів, що виготовляють, виконуючи технологічний процес комбінованої структури, являє собою адитивну функцію сумарної дефектності $P_{\text{пр.Сзб}}$, аргументи якої – парціальні показники дефектності, допущеної на його маршрутах,

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.Сзб}} = & P_{\text{пр.н.1}}^{(1)} \oplus P_{\text{пр.н.2}}^{(1)} \oplus \dots \oplus P_{\text{пр.н.н}}^{(1)} \oplus \\ & \oplus P_{\text{пр.н.1}}^{(2)} \oplus P_{\text{пр.н.2}}^{(2)} \oplus \dots \oplus P_{\text{пр.н.н}}^{(2)} \oplus \dots \\ & \dots \oplus P_{\text{пр.н.1}}^{(m)} \oplus P_{\text{пр.н.2}}^{(m)} \oplus \dots \oplus P_{\text{пр.н.н}}^{(m)} \oplus P_{\text{в.зб}}, \end{aligned} \quad (3.104)$$

де

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.зб}} = & P(P_{\text{в.зб}}^*, P_{\text{пр.п.зб}}, P_{\text{зб}}, P_{\text{пр.н.1}}^{(1)}, \\ & P_{\text{пр.н.2}}^{(1)}, \dots, P_{\text{пр.н.н}}^{(1)}, P_{\text{пр.н.1}}^{(2)}, P_{\text{пр.н.2}}^{(2)}, P_{\text{пр.н.н}}^{(2)}, \dots, P_{\text{пр.н.1}}^{(m)}, \dots, P_{\text{пр.н.н}}^{(m)}), \end{aligned}$$

де \oplus , як і раніше – символ імовірнісного підсумовування.

Наведені ймовірнісні моделі процесів формування дефектності під час серійного виробництва радіоелектронних пристроїв є моделями адаптивними, розроблення яких ґрунтується на використанні стохастичних залежностей показників якості виробів від параметрів технологічних та контрольних процедур на основних стадіях виробництва. Вони характеризуються можливістю послідовного нарощування їх адаптаційних властивостей без використання таких класичних методів, як, наприклад, метод множинної кореляції, дисперсійного аналізу тощо. Для реальних багатокрокових і багатопараметричних процесів використовувати такі методи практично неможливо. Матрична структура наведених моделей забезпечує можливість працювати з ними в діалоговому режимі, що підвищує оперативність коректування процесів, визначення необхідних ресурсів і розв'язання інших оптимізаційних задач.

РОЗДІЛ 4

ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКІВ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ І ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ РЕА

4.1. Потоки подій під час формування властивостей виробів

Створення сучасної радіоелектронної апаратури – результат функціонування складних ергатичних техніко-економічних систем. Їх загальна теорія достатньо розроблена, чого не можна стверджувати стосовно систем забезпечення якості та надійності цього виду техніки на всіх стадіях її життєвого циклу і, зокрема, на стадії її серійного виготовлення. Актуальним є розвиток теорії формування потоків виробничих дефектів, їх моделювання з метою розроблення методів комплексної оптимізації виробництва апаратури за критеріями якості, надійності та сумарних витрат, а також оптимального керування ними. Ці питання розглянуто в цьому розділі.

Функціонування таких систем характеризується їх послідовними переходами з одного стану в інший у деякі моменти часу. Ці переходи, своєю чергою, характеризуються цілеспрямованою зміною властивостей об'єктів виробництва у результаті виконання комплексу технологічних операцій структуроутворення, формоутворення, нанесення покриттів, збирання, монтажу тощо, внаслідок чого формуються необхідні показники якості. Послідовність переходів розглядається як потік подій $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ на осі часу t (рис. 4.1).

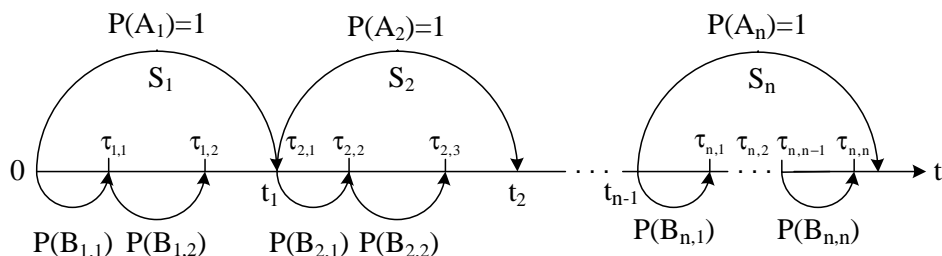


Рис. 4.1. Потік подій переходу виробничих систем S_i
з одного стану в інший під час виготовлення РЕА

Імовірність кожної такої події дорівнює одиниці, тобто це достовірні події. В умовах серійного виробництва інтервали з границями t_1, t_2, \dots, t_n є не випадковими величинами, оскільки вони регламентуються прийнятою технологією та організацією виробництва, тому ці потоки належать до класу регулярних, або детермінованих, потоків.

Окрім потоків подій переходу системи S_{k-1} в систему S_k , процеси виробництва РЕА характеризуються також потоками подій $V_0, V_1, V_2, \dots, V_n$, пов'язаних з виникненням дефектів під час виконання технологічних процедур. Ці потоки в межах тривалості повного технологічного циклу виготовлення виробів не є детермінованими і, на відміну від попередніх, характеризуються різними значеннями імовірності виникнення дефектів. Це означає, що поява дефектів під час переходу системи з одного стану в інший – випадкова подія, що відбувається з імовірністю $P(B_{k,i})$.

Такі потоки є випадковими і вони характеризуються густиною імовірності $f(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$, де τ_i – час виникнення дефекту в інтервалі $t_{k-1}-t_k$.

Дослідження свідчать, що в умовах стабільного виробництва вони є квазістаціонарними, тобто їхні імовірнісні характеристики майже сталі в часі, принаймні в межах окремих технологічних партій.

Потоки дефектів, що виникають під час переходу системи з одного стану в інший, можна розглядати не тільки в межах часу виготовлення окремого виробу, а і в межах часу виготовлення їхньої певної сукупності. Такий підхід особливо доцільний в умовах серійного виготовлення апаратури, коли кожен стан системи S_i характеризується потоком виробничих дефектів, параметр ω_i якого визначається рівнем технології та системи контролю на цій стадії виробництва.

Якщо випадкові величини τ_i незалежні, то випадковий потік дефектів виробництва вважають потоком з обмеженою післядією і густину або щільність розподілу імовірності часу виникнення дефектів у межах інтервалу $T_k-f(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$ можна подати добутком

$$f(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m) = f(\tau_1) f(\tau_2) \dots f(\tau_m), \tag{4.1}$$

де $f(\tau_1), f(\tau_2), \dots, f(\tau_m)$ – парціальні щільності, визначені для інтервалів $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$.

Враховуючи це, повний технологічний процес характеризується залежностями:

$$\begin{aligned} S_1 : \omega^{\partial}(\tau_1) &= \frac{f_1(\tau_1)}{P_1(\tau_1)}; \\ S_2 : \omega^{\partial}(\tau_2) &= \frac{f_2(\tau_2)}{P_2(\tau_2)}; \\ &\dots \dots \dots \\ S_n : \omega^{\partial}(\tau_n) &= \frac{f_n(\tau_n)}{P_n(\tau_n)}, \end{aligned} \tag{4.2}$$

де $f_i(\tau_i)$ – щільність розподілу імовірності появи дефектів за час τ у стані системи S_i , $i = \overline{1, n}$; $P_i(\tau_i)$ – імовірність виникнення дефекту за час τ_i , $i = \overline{1, n}$.

Тут і далі під параметром потоку виробничих дефектів $\omega^d(\tau)$ розумітимемо імовірність появи дефектів за одиницю часу, тобто

$$\omega^d(\tau) = \frac{dH(\tau)}{d\tau}, \quad (4.3)$$

де $H(\tau)$ – характеристика потоку, яка відзначається за допомогою граничного переходу

$$H(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(\tau), \quad (4.4)$$

де $m_i(\tau)$ – середня кількість дефектів за час τ ; N – обсяг технологічної партії виробів, виготовлених за встановлений часовий інтервал, або обсяг вибірки.

Потоки виробничих дефектів, які з більшою або меншою інтенсивністю завжди супроводжують реальні технологічні процеси виробництва радіоелектронних пристроїв, традиційно зараховували до категорії найпростіших потоків. Теорія таких потоків разом з методами їхнього аналізу сьогодні добре розроблена. Їх використовують як основу багатьох інженерних методів оцінювання, прогнозування і управління якістю продукції, передбачених міжнародним стандартом ISO, державними стандартами України, зокрема ДСТУ ISO 9001-2001, й іншими нормативними документами. До того ж зазначимо, що останнім часом багато спеціалістів виконували поглиблені дослідження потоків виробничих дефектів, що засвідчили недостатню обґрунтованість безальтернативного зарахування цих потоків до категорії найпростіших. Зокрема, якщо припущення про їх стаціонарність не викликає категоричних заперечень, принаймні в умовах стабільного виробництва, то припущення про їхню ординарність, а тим більше про відсутність ефекту післядії під час формування потоків є об'єктивно необґрунтованим. Виконані дослідження структури дефектності і, зокрема, її мультиплікативної складової, підтвердили явище післядії.

У наступних підрозділах проаналізовано потоки виробничих дефектів і пов'язаних з ними відмов РЕА, питання теорії їх перетворення ущільненням та розрідженням, а також концептуальні питання прогнозування надійності виробів під час виробництва на основі інформації про потоки виробничих дефектів.

4.2. Елементи теорії потоків виробничих дефектів і відмов апаратури під час експлуатації

Основними завданнями моделювання потоків виробничих дефектів і потоків відмов виробів під час експлуатації є завдання моделювання вихідного потоку дефектів ω_n^d , який визначає рівень якості виробів, і моделювання потоку

їх відмов ω , спричинених дефектами виробництва. Перший з них є функцією потоків, що виникають на окремих стадіях виробництва через дефекти матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, а також неякісне виконання технологічних і контрольних процедур

$$\omega_n^{\partial} = \Phi(\{\omega^{\partial}\}_{s_1}, \{\omega^{\partial}\}_{s_2}, \dots, \{\omega^{\partial}\}_{s_n}), \tag{4.5}$$

де $\{\omega^{\partial}\}_{s_j}$, $j = \overline{1, n}$ – множина параметрів потоків дефектів підсистем S_j , що становлять технологічний процес.

Другий є функцією потоку дефектів ω_n^{∂} :

$$\omega = \psi(\omega_n^{\partial}). \tag{4.6}$$

Зв'язок між параметрами цих потоків є імовірнісним, який формально визначається рівнянням

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon \omega^{\partial}, \tag{4.7}$$

де ω^{∂} , ω – параметри потоків дефектів і відмов; ω_0 – вільний член; ε – коефіцієнт пропорційності. За достатньо вивченої залежності (4.7) складовою ω_0 можна знехтувати і ε розглядати як коефіцієнт перетворення потоків дефектів на потік відмов

$$\varepsilon = \frac{\omega}{\omega^{\partial}}. \tag{4.8}$$

Формально таке перетворення можна розглядати як відображення деякої підмножини виробничих дефектів $\Omega^{\partial} = [\omega_1^{\partial}, \omega_2^{\partial}, \dots, \omega_n^{\partial}]$, що належать до множини $\Omega^{\partial*}$ усіх дефектів, які виникають на стадії виробництва і надходять до цієї стадії разом з використовуваними матеріалами, напівфабрикатами і комплектуючими виробами, на множині відмов $\Omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ (рис. 4.2).

Останній крок технологічного процесу характеризується системою n відображень

$$\begin{aligned} \varepsilon_{n,1} : \omega_{n,1}^{\partial} &\rightarrow \omega_{n,1}; \\ \varepsilon_{n,2} : \omega_{n,2}^{\partial} &\rightarrow \omega_{n,2}; \\ &\dots \dots \dots \\ \varepsilon_{n,n} : \omega_{n,n}^{\partial} &\rightarrow \omega_{n,n}, \end{aligned} \tag{4.9}$$

кожне з яких визначає складову повного потоку відмов виробу за відповідним показником якості.

Така формалізація процесу виникнення виробничих дефектів і відмов, що забезпечує часткову або повну працездатність виробів під час експлуатації, ґрунтується на тому, що не всі складові множини $\Omega^{\partial*}$, а тільки певна їх частина Ω^{∂} зумовлює відмови. Інша частина дефектів проявляється як несправності, не призво-

дить до втрати працездатності, але знижує загальний рівень якості виробів. Множина Ω^d також має структурні особливості. Значна частина відмов, що утворюють потік Ω , є відмовами, зумовленими виробничими дефектами. Решта відмов спричинена комплексом причин невиробничого характеру, наприклад, неправильним використанням виробу, низькою кваліфікацією персоналу, недотриманням встановленої періодичності та режимів профілактичних робіт тощо.

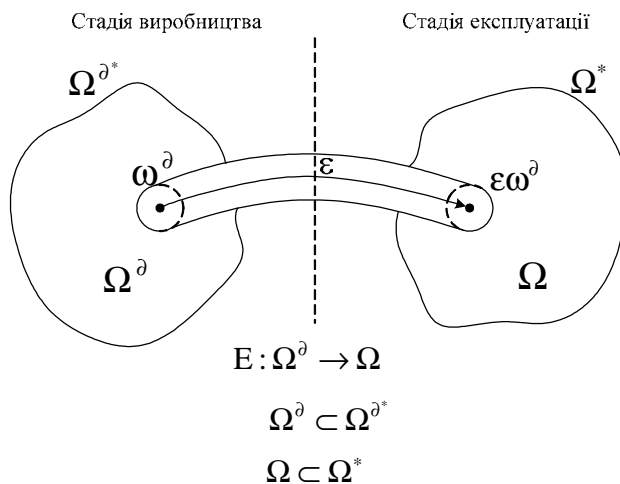


Рис. 4.2. Відображення множини виробничих дефектів Ω^d у множині відмов Ω :
 Ω^{d*} – повна множина дефектів, що характеризують стадію виробництва;
 Ω^d – множина виробничих дефектів, що зумовлюють відмови апаратури під час експлуатації; Ω^* – повна множина відмов, що виникли під час експлуатації;
 Ω – множина відмов, спричинених дефектами виробництва, які не були виявлені і пропущені з останнього кроку технологічного процесу;
 E – символ відображення Ω^d в Ω

Сьогодні не існує загальноприйнятих і придатних для практичного використання аналітичних методів кількісної оцінки зв'язку ω^d і ω . Це ускладнює процедуру прогнозування надійності виробів з урахуванням реальних можливостей підприємств, які переважно визначаються ресурсами: якістю отримуваних матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, точністю технологічного обладнання, досконалістю інструментів й оснащення, кваліфікацією персоналу та іншими ресурсами. У цих умовах зв'язок між параметрами потоків дефектів і відмов апаратури можна встановлювати, виконавши активний або пасивний експеримент з реєстрацією цієї залежності в режимі нормальної роботи підприємства без внесення навмисних збурень, які спричиняють відхилення параметрів технологічних процесів за межі априорі встановлених допустимих норм.

Виконані експериментальні дослідження підтвердили правомірність такого підходу до оцінювання якості виробів на основі врахування характеристик потоків виробничих дефектів на різних стадіях технологічного процесу. На рис. 4.3, для прикладу, показано поле кореляційної залежності параметра потоку відмов друкованого вузла осцилографа четвертого покоління від параметра потоку виробничих дефектів.

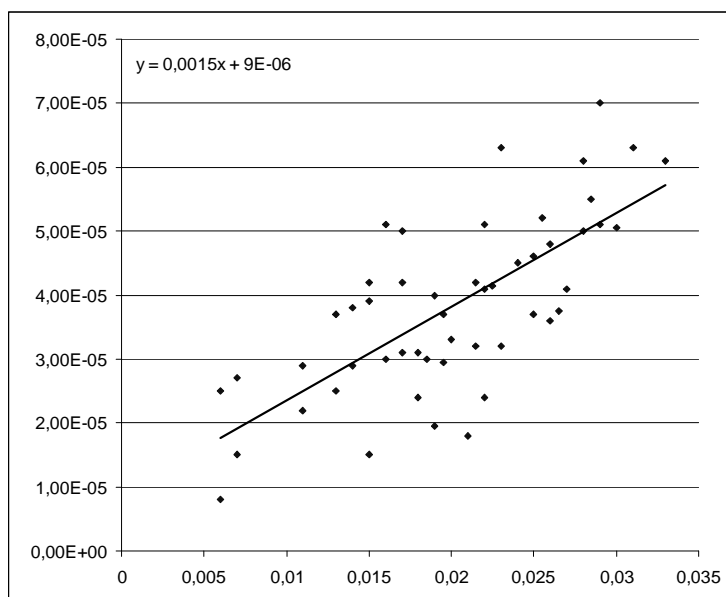


Рис. 4.3. Кореляційна залежність $\omega = \psi(\omega^{\partial})$ для друкованих плат, виготовлених комбінованим адитивним методом

Доволі тісний зв'язок між параметрами вказаних потоків свідчить про можливість прогнозувати надійність цього вузла з урахуванням даних про рівень дефектності. Ці питання розглянуто в підрозділі 4.5.

Повний потік дефектів ω^{∂} , який визначає якість апаратури, складається з суми потоків явних дефектів $\omega_{я}^{\partial}$, виявлених під час контролю, і неявних $\omega_{ня}^{\partial}$, які можуть залишатись не виявленими у разі використання сучасних методів та засобів контролю і діагностики, тобто:

$$\omega^{\partial} = \omega_{я}^{\partial} + \omega_{ня}^{\partial} \tag{4.10}$$

Оскільки неявні дефекти виявляються важче і з меншою ймовірністю, правомірним є такий запис коефіцієнта перетворення потоків дефектів на потоки відмов:

$$\varepsilon \leq \frac{\omega}{\omega^{\partial}} \tag{4.11}$$

Параметр потоку дефектів $\omega^\partial(\tau)$ є залежністю вигляду:

$$\omega^\partial(\tau) = \Psi(\{P_{\text{пр.вх.к}}\}_k, \{P_{\text{в}}\}_k, \{P\}_k), \quad k = \overline{1, m}, \quad (4.12)$$

де $\{P_{\text{пр.вх.к}}\}$ – множина імовірностей пропуску дефектів у разі вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів; $\{P_{\text{в}}\}_k$ – множина імовірностей вводу дефектів під час виконання технологічної операції; $\{P\}_k$ – множина імовірностей правильного контролю; m – кількість циклів технологічного процесу, упродовж яких визначається параметр потоку дефектів $\omega^\partial(\tau)$. Потоки виробничих дефектів і потоки відмов апаратури, пов'язаних з ними, насправді є потоками переважно рідкісних подій, а тому, якщо допустимо, їх можна вважати потоками пуассонівського типу, якщо вони є ще і стаціонарними потоками, то їх параметри характеризуються залежностями:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}, \quad (4.13)$$

$$\omega^\partial(\tau) = \frac{dH^\partial(\tau)}{d\tau}, \quad (4.14)$$

в яких $H(t)$ і $dH^\partial(\tau)$ – характеристики потоків відмов апаратури і потоків виробничих дефектів:

$$H(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t) \quad (4.15)$$

$$H^\partial(\tau) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M m_j^\partial(\tau). \quad (4.16)$$

Коефіцієнт перетворення потоку виробничих дефектів на потік відмов апаратури визначається відношенням:

$$\varepsilon = \frac{\frac{d}{dt} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t)}{\frac{d}{d\tau} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M m_j^\partial(\tau)}, \quad (4.17)$$

де N – кількість випущених виробів, за якими визначається параметр потоку їх відмов у процесі експлуатації; $m_i(t)$ – кількість відмов кожного виробу $i = \overline{1, N}$; M – кількість виробів, які відмовили під час встановленого періоду експлуатації; $m_j^\partial(\tau)$ – кількість дефектів кожного виробу, які спричинили їх відмови, $j = \overline{1, M}$; t – час експлуатації виробів відмови; τ – тривалість виробництва N виробів.

У загальному випадку параметри потоку відмов апаратури ω з причин виробничих дефектів, допущених і не виявлених під час виконання технологічних і контрольних процедур, можна визначати за такою схемою.

Якщо під час виробництва РЕА відбуваються N технологічних процесів, а кожний j -й процес складається з n технологічних операцій, то за деяких припущень імовірність бездефектного виготовлення апаратури $P_{\text{бд}}$ можна знайти за відомим правилом

$$P_{\text{бд}} = \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n P_{\text{бд},j,i}, \quad j = \overline{1, N}; i = \overline{1, n}, \quad (4.18)$$

де $P_{\text{бд},j,i}$ – імовірність бездефектного виготовлення апаратури під час виконання i -ї технологічної операції j -го технологічного процесу.

Імовірність наявності дефектів після виконання i -ї технологічної операції $P_{\text{деф},j,i}$ дорівнює

$$P_{\text{деф},j,i} = 1 - P_{\text{бд},j,i}. \quad (4.19)$$

Після виконання операції контролю з імовірністю правильного контролю $P_{j,i}$ імовірність пропущених дефектів $P_{\text{пр},j,i}$ визначається добутком

$$P_{\text{пр},j,i} = (1 - P_{\text{бд},j,i}) (1 - P_{j,i}) = 1 - P_{\text{бд},j,i} P_{j,i} - P_{\text{бд},j,i} - P_{j,i}. \quad (4.20)$$

Імовірність бездефектного виготовлення апаратури після виконання повного циклу технологічних та контрольних процедур

$$P_{\text{бд}} = \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{пр},j,i}), \quad (4.21)$$

а імовірність наявності дефектів у виробках $P_{\text{деф}}$

$$P_{\text{деф}} = 1 - \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{пр},j,i}). \quad (4.22)$$

Якщо прийняти умову, що виробничі дефекти, пропущені з імовірністю $P_{\text{пр},j,i}$ за певний відрізок часу t , не спричинять відмови апаратури з імовірністю $P(t)$, то імовірність її відмови за час t можна знайти так

$$q(t) = \left[1 - \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{пр},j,i}) \right] \cdot [1 - P(t)]. \quad (4.23)$$

Параметр потоку відмов апаратури $\omega(t)$ з причин виробничих дефектів визначається з умови

$$1 - \left[1 - \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{пр},j,i}) \right] \cdot [1 - P(t)] = e^{-\int_0^t \omega(t) dt}. \quad (4.24)$$

Звідки, якщо $\omega(t) = \text{const}$

$$\omega = \frac{\ln \left\{ 1 - \left[1 - \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{пр},j,i}) \right] \cdot [1 - P(t)] \right\}}{t}. \quad (4.25)$$

Інтенсивність потоків виробничих дефектів, їх стаціонарність і нестационарність, неперервність і дискретність, як і інші властивості, великою мірою визначаються ресурсними, технологічними й організаційними особливостями конкретного виробництва. Узагальнені властивості цих потоків подано у вигляді тверджень і висновків. З такими позначеннями:

$\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} = (\omega_{\text{пр.к-1,1}}^{\partial}, \omega_{\text{пр.к-1,2}}^{\partial}, \dots, \omega_{\text{пр.к-1,k}}^{\partial})$ – сумарний вхідний потік дефектів підсистеми S_k , що надходить з підсистеми S_{k-1} ;

$\Omega_{\text{в.к}}^{\partial} = (\omega_{\text{в.к,1}}^{\partial}, \omega_{\text{в.к,2}}^{\partial}, \dots, \omega_{\text{в.к,k}}^{\partial})$ – сумарний вхідний потік дефектів, що вводяться під час виконання технологічної операції на k -му кроці технологічного процесу;

$\Omega_{\text{вя.к}}^{\partial} = (\omega_{\text{вя.к,1}}^{\partial}, \omega_{\text{вя.к,2}}^{\partial}, \dots, \omega_{\text{вя.к,k}}^{\partial})$ – сумарний потік виявлених дефектів внаслідок виконання контрольної операції;

$\Omega_{\text{пр.к}}^{\partial} = (\omega_{\text{пр.к,1}}^{\partial}, \omega_{\text{пр.к,2}}^{\partial}, \dots, \omega_{\text{пр.к,k}}^{\partial})$ – сумарний потік пропущених дефектів через недосконалий контроль;

$P_k = (P_{k,1}, P_{k,2}, \dots, P_{k,k})$ – узагальнене значення імовірності правильного контролю на k -му кроці технологічного процесу;

Γ_k і Δ_k – показники ущільнення і розрідження потоку дефектів під час виконання технологічної та контрольної операцій;

$\omega_{\text{пр.к-1,i}}^{\partial}, \omega_{\text{в.к,i}}^{\partial}, \omega_{\text{вя.к,i}}^{\partial}, \omega_{\text{пр.к,i}}^{\partial}, i = \overline{1, k}$ – парціальні потоки дефектів;

$P_{k,1}, P_{k,2}, \dots, P_{k,k}$ – парціальні значення імовірності правильного контролю;

$\gamma_{k,1}, \gamma_{k,2}, \dots, \gamma_{k,k}$ – парціальні значення показника ущільнення потоку;

$\delta_{k,1}, \delta_{k,2}, \dots, \delta_{k,k}$ – парціальні значення показника розрідження потоку.

Твердження 1. Параметр сумарного вхідного потоку дефектів підсистеми S_k завжди рівнозначний з параметром вихідного потоку, тобто

$$\Omega_{\text{вх.к}}^{\partial} = \Omega_{\text{вих.к}}^{\partial}, \quad (4.26)$$

де

$$\Omega_{\text{вх.к}}^{\partial} = \Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial}, \quad (4.27)$$

$$\Omega_{\text{вих.к}}^{\partial} = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial} + \Omega_{\text{вя.к}}^{\partial}. \quad (4.28)$$

Це твердження доведемо на основі очевидних залежностей:

$$\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial} = (\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial})(1 - P_k) + (\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial})P_k = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial} + \Omega_{\text{вя.к}}^{\partial}, \quad (4.29)$$

оскільки

$$(\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial})(1 - P_k) = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial}, \quad (4.30)$$

$$(\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial})P_k = \Omega_{\text{вя.к}}^{\partial}, \quad (4.31)$$

коли $P_{к,1} \neq P_{к,2} \neq \dots \neq P_{к,к}$, це твердження набуває такого вигляду:

$$\begin{pmatrix} \omega_{пр.к-1,1}^\partial \\ \omega_{пр.к-1,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{пр.к-1,к}^\partial \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{в.к,1}^\partial \\ \omega_{в.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{в.к,к}^\partial \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{пр.к,1}^\partial \\ \omega_{пр.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{пр.к,к}^\partial \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{вя.к,1}^\partial \\ \omega_{вя.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{вя.к,к}^\partial \end{pmatrix}, \quad (4.32)$$

де

$$\begin{pmatrix} \omega_{пр.к,1}^\partial \\ \omega_{пр.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{пр.к,к}^\partial \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} \omega_{пр.к-1,1}^\partial \\ \omega_{пр.к-1,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{пр.к-1,к}^\partial \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{в.к,1}^\partial \\ \omega_{в.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{в.к,к}^\partial \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 1 - P_{к,1} \\ 1 - P_{к,2} \\ \dots \\ 1 - P_{к,к} \end{pmatrix}; \quad (4.33)$$

$$\begin{pmatrix} \omega_{вя.к,1}^\partial \\ \omega_{вя.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{вя.к,к}^\partial \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} \omega_{пр.к-1,1}^\partial \\ \omega_{пр.к-1,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{пр.к-1,к}^\partial \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{в.к,1}^\partial \\ \omega_{в.к,2}^\partial \\ \dots \\ \omega_{в.к,к}^\partial \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} P_{к,1} \\ P_{к,2} \\ \dots \\ P_{к,к} \end{pmatrix}. \quad (4.34)$$

Зазначимо, що додавання і множення матриць у цих рівняннях почленне.

У наведених залежностях очевидно, що на k -му кроці технологічного процесу під час виконання контрольної операції, якщо при цьому не виникли додаткові дефекти, сумарний вхідний потік виробничих дефектів розріджується зі зменшенням параметра потоку в $(1 - P_{к,i})$ разів. До того ж

$$\delta_{к,i} = 1 - P_{к,i} = \frac{\omega_{пр.к,i}^\partial}{\omega_{деф.к,i}^\partial} \quad \text{або} \quad \delta_{к,i} = 1 - P_{к,i} = \frac{\omega_{пр.к,i}^\partial}{\omega_{пр.к-1,i}^\partial + \omega_{в.к,i}^\partial}. \quad (4.35)$$

Під час виконання k -ї технологічної операції внаслідок вводу дефектів відбувається ущільнення вхідного потоку дефектів з параметром $\omega_{пр.к-1,i}$ у γ разів. При цьому

$$\gamma_{к,i} = \frac{\omega_{деф.к,i}^\partial}{\omega_{пр.к-1,i}^\partial} \quad \text{або} \quad \gamma_{к,i} = \frac{\omega_{пр.к-1,i}^\partial + \omega_{в.к,i}^\partial}{\omega_{пр.к-1,i}^\partial}. \quad (4.36)$$

У загальному випадку

$$\Delta_k = [\delta_{к,1}, \delta_{к,2}, \dots, \delta_{к,к}]; \quad (4.37)$$

$$\Gamma_k = [\gamma_{к,1}, \gamma_{к,2}, \dots, \gamma_{к,к}].$$

Величини Γ_k і Δ_k надалі розглядатимемо як відповідні показники ущільнення і розрідження потоків дефектів. Наведені перетворення потоків під час виконання

технологічних і контрольних процедур цілеспрямованою зміною цих показників можна використовувати, щоб забезпечити ефективність технологічних процесів загалом у межах розв'язання задач їх комплексної оптимізації за критеріями якості та надійності виробів. Ці питання розглянуто у шостому розділі.

Твердження 2. Величина параметра потоку виробничих дефектів, який проходить через підсистему S_k , не змінюється, якщо добуток показників ущільнення і розрідження дорівнює одиниці, тобто

$$\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial} \quad \text{при } \Delta_k \cdot \Gamma_k = 1. \quad (4.38)$$

За умови:

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial} - \Omega_{\text{вя.к}}^{\partial} &= \Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial} - \\ -(\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial})P_k &= (\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial})(1 - P_k) = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial} \end{aligned} \quad (4.39)$$

якщо

$$\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} + \Omega_{\text{в.к}}^{\partial} = \Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} \cdot \Gamma_k, \quad (4.40)$$

$$\Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} \cdot \Delta_k \cdot \Gamma_k = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial} \quad (4.41)$$

$$\Delta_k \cdot \Gamma_k = 1, \quad \Omega_{\text{пр.к-1}}^{\partial} = \Omega_{\text{пр.к}}^{\partial}. \quad (4.42)$$

З цього твердження випливає логічний висновок:

якщо $\Delta_k \cdot \Gamma_k > 1$ – потік дефектів ущільнюється;

якщо $\Delta_k \cdot \Gamma_k < 1$ – потік дефектів розріджується.

Якщо $\Delta_k \cdot \Gamma_k = 1$, значення потоку дефектів на вході й на виході підсистеми залишається незмінним, хоча їх перерозподіл може бути суттєвим.

У випадку $P_{k,1} \neq P_{k,2} \neq \dots \neq P_{k,k}$ і $\gamma_{k,1} \neq \gamma_{k,2} \neq \dots \neq \gamma_{k,k}$ це твердження можна записати так:

$$\begin{aligned} \left\| \begin{array}{c} \omega_{\text{пр.к-1,1}}^{\partial} \\ \omega_{\text{пр.к-1,2}}^{\partial} \\ \dots \\ \omega_{\text{пр.к-1,k}}^{\partial} \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{c} \gamma_{k,1}(1 - P_{k,1}) \\ \gamma_{k,2}(1 - P_{k,2}) \\ \dots \\ \gamma_{k,k}(1 - P_{k,k}) \end{array} \right\| &= \left\| \begin{array}{c} \omega_{\text{пр.к,1}}^{\partial} \\ \omega_{\text{пр.к,2}}^{\partial} \\ \dots \\ \omega_{\text{пр.к,k}}^{\partial} \end{array} \right\|, \end{aligned} \quad (4.43)$$

якщо $\gamma_{k,i} \delta_{k,i} = 1, i = \overline{1, k}$

$$\left\| \begin{array}{c} \omega_{\text{пр.к-1,1}}^{\partial} \\ \omega_{\text{пр.к-1,2}}^{\partial} \\ \dots \\ \omega_{\text{пр.к-1,k}}^{\partial} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} \omega_{\text{пр.к,1}}^{\partial} \\ \omega_{\text{пр.к,2}}^{\partial} \\ \dots \\ \omega_{\text{пр.к,k}}^{\partial} \end{array} \right\|. \quad (4.44)$$

Варто зауважити, що використовувати умови $\Gamma_k \cdot \Delta_k < 1$ і $\gamma_k \cdot \delta_k < 1$ для зменшення дефектів виробів можна, лише врахувавши додаткові умови організаційного, ресурсного, економічного й іншого змісту, оскільки на практиці зміна множників лівої частини наведених нерівностей іноді істотно неоднозначна.

4.3. Формування потоків виробничих дефектів

Процеси виробництва апаратури, як і інших технічних засобів, характеризуються потоками виробничих дефектів, які з більшою або меншою інтенсивністю виникають на усіх без винятку стадіях технологічних процесів. Потоки виробничих дефектів і потоки відмов апаратури є процесами, що описуються різними за сутністю часовими функціями. Перші відбуваються упродовж виробничого процесу, другі – у ході експлуатації виробів. Сьогодні існує потужна теорія виникнення виробничих дефектів, їх ущільнення і розрідження під час виконання технологічних та контрольних процедур, кількісного оцінювання дефектності в умовах індивідуального, серійного та масового виробництва. Відома також теорія потоків відмов радіоелектронної апаратури, яка є основою багатьох методів оцінювання експлуатаційної надійності. Але зв'язки між потоками відмов апаратури під час експлуатації і потоками виробничих дефектів, допущених під час її виготовлення, на рівні фізики цих подій сьогодні вивчено недостатньо, хоча наявність цих зв'язків статистично підтверджується. Сумарний потік дефектів готової продукції формується з множини парціальних потоків дефектів використовуваних матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, а також дефектів, що виникають під час виконання технологічних та контрольних процедур. У сукупності вони визначають рівень якості виробів і відповідно рівень якості виробництва. Формально ці потоки можна розділити на дві групи, що визначають несправності та відмови апаратури. Дефекти, які кваліфікуються як несправності, можуть залишатись на певний період часу або на весь термін використання виробів і не спричинювати втрати працездатності. Друга група дефектів, навіть якщо вони проявляються не одразу, зумовлює потенційні причини відмов.

Зазначимо, що такий розподіл потоків виробничих дефектів з погляду їх впливу на працездатність РЕА не має строгої фізичної основи, оскільки імовірність її відмов залежить від густини імовірності раніше допущених дефектів і, отже, є умовною імовірністю події, яка може відбутися за наявності цих дефектів. Однак такий, суто аналітичний, підхід до визначення надійності виробів вимагає встановлення цих зв'язків, які сьогодні здебільшого відсутні, а їх визначення,

принаймні в найближчому майбутньому, проблематичне. На сучасному рівні технології, її інформаційного забезпечення і організації виробництва реальним є створення математичних моделей на основі регресійних залежностей між дефектами та відмовами, отриманих з використанням масивів нагромадженої інформації під час виготовлення, випробування та експлуатації виробів. Теорія та методи регресійного аналізу і моделювання вже достатньо розроблені.

Формалізовану схему формування потоків дефектів у випадку n -крокового технологічного процесу послідовної структури у спрощеному варіанті показано на рис. 4.4.

У наведеній схемі діагональні технологічні процеси $TO_{11}, TO_{22}, \dots, TO_{nn}$ і діагональні контрольні процедури $KO_{11}, KO_{22}, \dots, KO_{nn}$ є процедурами, що передбачені технологічним процесом, і тому їх називатимемо процедурами, які реально функціонують. Решта процедур, такі як $TO_{2,1}, TO_{3,1}, \dots, TO_{n,1}, TO_{3,2}, \dots, TO_{n,2}, \dots, TO_{n-1,n-1}$ і $KO_{2,1}, KO_{3,1}, \dots, KO_{n,1}, KO_{3,2}, \dots, KO_{n,2}, \dots, KO_{n-1,n-1}$, фактично не існують у структурі реального технологічного процесу. Але вони формально відображають процеси, що відбуваються з виробами внаслідок того, що на них впливають реально виконувані процедури. Ці уявні процедури називатимемо уявно функціонуючими*.

Зміни раніше сформованих параметрів виробів під час виконання подальших реально виконуваних процедур характерні для процесів групового оброблення матеріалів і пристроїв, наприклад, під час виготовлення ІМС, кварцових резонаторів, ліній затримки, фільтрів, друкованих плат складної структури й інших компонентів, які широко застосовують в апаратурі четвертого і п'ятого поколінь. Встановлено, що можливі зміни раніше допущеної дефектності також під впливом виконання подальших контрольних процедур. Як свідчать дослідження, такі впливи іноді істотні і традиційне нехтування ними під час моделювання процесів забезпечення якості невиправдане. Ці питання розглянуто нижче.

Параметр вихідного потоку дефектів Ω^{∂} , який визначає рівень якості готової продукції, є складною функцією потоків дефектів використовуваних матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих виробів та інших матеріальних ресурсів Ω_R^{∂} , а також потоків, які виникають на кроках технологічного процесу під час виконання технологічних операцій – Ω_{TO}^{∂} :

$$\Omega^{\partial} = \Phi(\Omega_R^{\partial}, \Omega_{TO}^{\partial}), \quad (4.45)$$

* Автори з вдячністю сприймуть будь-яку критику спеціалістів за семантичну недосконалість, на їх погляд, використаних назв.

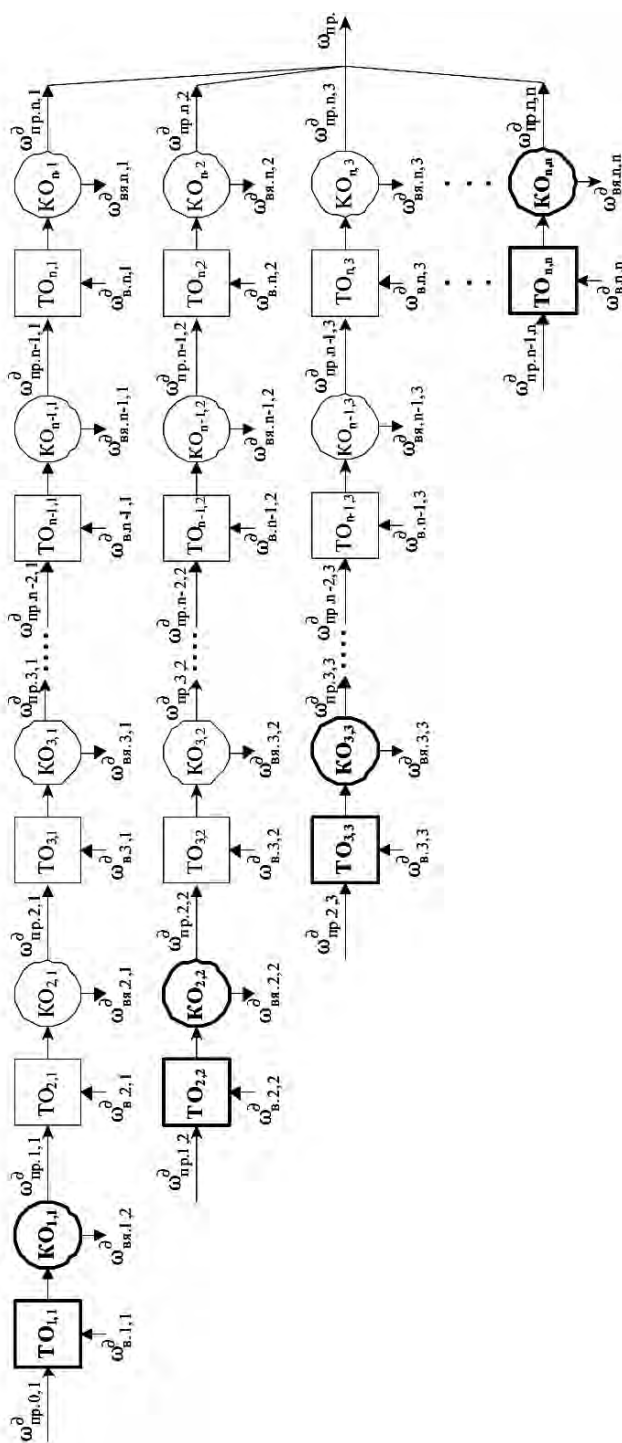


Рис. 4.4. Формалізована модель формування потоків дефектів n -крокового технологічного процесу послідовної структури

Узагальнену модель утворення потоку дефектів Ω_k^∂ на k -му кроці технологічного процесу, який формується підсистемою S_k у складі сукупності технологічних ТО і контрольних КО операцій, показано на рис. 4.5.

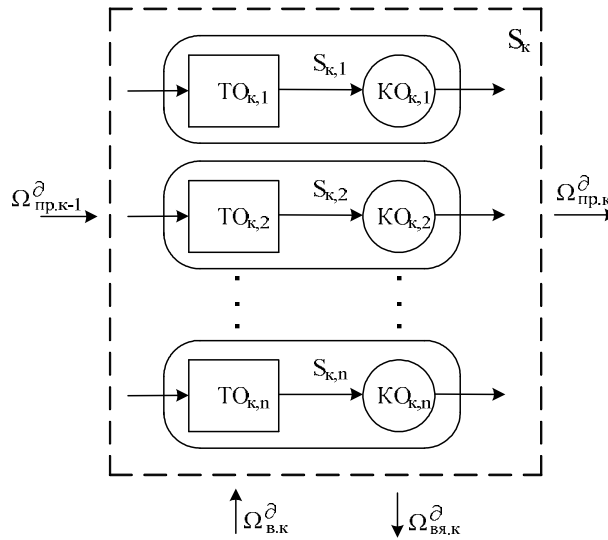


Рис. 4.5. Модель утворення потоку дефектів

На рис. 4.5:

$\Omega_{пр,к-1}^\partial$ – параметр потоку пропущених дефектів з $k-1$ -го кроку технологічного процесу (параметр вхідного потоку);

$\Omega_{пр,к}^\partial$ – параметр потоку дефектів, пропущених з системи S_k через неефективний контроль (параметр вихідного потоку);

$\Omega_{в,к}^\partial$ – параметр потоку дефектів матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, а також дефекти, що виникають під час технологічних операцій;

$\Omega_{вя,к}^\partial$ – параметр потоку дефектів, виявлених під час контролю.

Кожен з цих потоків характеризується відповідною множиною їх парціальних значень:

$$\begin{aligned}
 \Omega_{пр,к-1}^\partial &= \{ \omega_{пр,к-1,1}^\partial; \omega_{пр,к-1,2}^\partial; \dots; \omega_{пр,к-1,к}^\partial \}; \\
 \Omega_{пр,к}^\partial &= \{ \omega_{пр,к,1}^\partial; \omega_{пр,к,2}^\partial; \dots; \omega_{пр,к,к}^\partial \}; \\
 \Omega_{в,к}^\partial &= \{ \omega_{в,к,1}^\partial; \omega_{в,к,2}^\partial; \dots; \omega_{в,к,к}^\partial \}; \\
 \Omega_{вя,к}^\partial &= \{ \omega_{вя,к,1}^\partial; \omega_{вя,к,2}^\partial; \dots; \omega_{вя,к,к}^\partial \}.
 \end{aligned}
 \tag{4.46}$$

Зміст елементів цих множин розглянемо на прикладі виникнення та перетворення потоків дефектів під час функціонування підсистеми $S_{k,i}$, схему якої зображено на рис. 4.6.

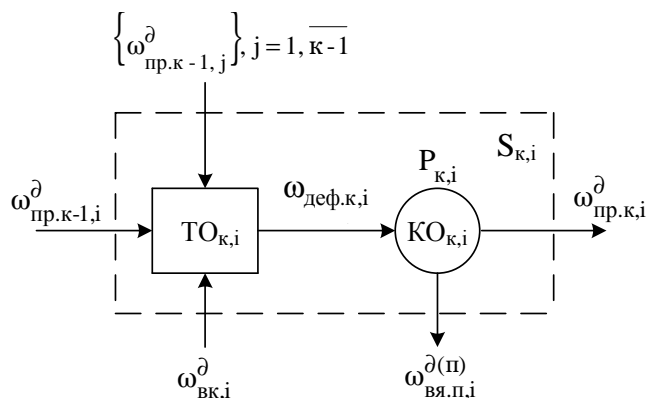


Рис. 4.6. Модель виникнення та перетворення потоків дефектів підсистеми $S_{k,i}$

На рис. 4.6 $\omega_{деф.к,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, який виник після виконання технологічної процедури $TO_{k,i}$; $P_{к,i}$ – імовірність правильного контролю під час виконання контрольної процедури $KO_{k,i}$; $\omega_{пр.к-1,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, що надходять з попередніх кроків технологічного процесу; $\omega_{пр.к,i}^{\partial}$ і $\omega_{вя.к-1,i}^{\partial}$ – параметри потоків пропущених та виявлених дефектів.

Вихідними параметрами $S_{k,i}$ є такі залежності:

$$\begin{aligned} \omega_{пр.к,i}^{\partial} &= (\omega_{пр.к-1,i}^{\partial} + \omega_{в.к,i}^{\partial})(1 - P_{к,i}); \\ \omega_{вя.к,i} &= (\omega_{пр.к-1,i}^{\partial} + \omega_{в.к,i}^{\partial})P_{к,i}, \end{aligned} \quad (4.47)$$

де $\omega_{в.к,i}^{\partial} = F(\omega_{в.к,i}^{\partial*}, \omega_{пр.к-1,1}^{\partial}, \omega_{пр.к-1,2}^{\partial}, \dots, \omega_{пр.к-1,k-1}^{\partial})$, в якій $\omega_{в.к,i}^{\partial*}$ – параметр потоку дефектів, що вводяться під час виконання технологічної процедури.

Параметр потоку введених дефектів $\omega_{в.к,i}^{\partial}$ з урахуванням адитивної та мультиплікативної складових дефектності визначають за схемою, наведеною у розділі 3.

Математичною моделлю потоку $\omega_{пр.к}^{\partial}$ пропущених виробничих дефектів на k -му кроці технологічного процесу послідовної структури є функція

$$\omega_{пр.к}^{\partial} = \omega_{пр.к,1}^{\partial} + \omega_{пр.к,2}^{\partial} + \dots + \omega_{пр.к,к}^{\partial}, \quad (4.48)$$

технологічного процесу, $\omega_{в.к,к}^{\partial*}$ – потоком дефектів матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, які виникають під час виконання технологічної операції, і $\{\omega_{пр.к-1,j}^{\partial}, j=1, к-1\}$ – потоком дефектів, допущених і не усунених на попередніх кроках технологічного процесу, які стимулюють виникнення мультиплікативної складової ввідної дефектності.

Вихідним параметром є потік дефектів з параметром $\omega_{деф.к,к}$. Окрім основного потоку дефектів, внаслідок впливу технологічної операції $ТО_{к,к}$ на параметри виробу, сформовані на попередніх операціях, вводяться дефекти, що утворюють потоки з параметрами $\omega_{в.к,1}^{\partial*}, \omega_{в.к,2}^{\partial*}, \dots, \omega_{в.к,к-1}^{\partial*}$. Згідно з прийнятою формалізацією процесу це відбувається на рівні технологічних операцій $ТО_{к,1}, ТО_{к,2}, \dots, ТО_{к,к-1}$, що уявно функціонують. Враховуючи це, к-й крок технологічного процесу в сенсі формування потоків дефектів описується системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \omega_{деф.к,1} &= \omega_{пр.к-1,1}^{\partial} + F_1(\omega_{в.к,1}^{\partial*}); \\ \omega_{деф.к,2} &= \omega_{пр.к-1,2}^{\partial} + F_2(\omega_{в.к,2}^{\partial*}, \omega_{пр.к-1,1}); \end{aligned} \tag{4.50}$$

$$\omega_{деф.к,к} = \omega_{пр.к-1,к}^{\partial} + F_k(\omega_{в.к,к}^{\partial*}, \omega_{пр.к-1,1}, \omega_{пр.к-1,2}, \dots, \omega_{пр.к-1,к-1}).$$

Отже, у разі багатокрокового виробництва відбувається ущільнення потоків дефектів не тільки на рівні технологічних операцій, що реально функціонують, але і на рівні операцій, які уявно функціонують.

Отримати універсальні аналітичні залежності F_1, F_2, \dots, F_k на основі фізики процесів формування дефектності сьогодні доволі проблематично. Виконані статистичні дослідження доводять, що їх можна визначити для конкретних процесів, чого здебільшого достатньо для розв'язання конкретних інженерних задач.

На рис. 4.8 для прикладу показано фрагмент технологічного процесу виготовлення феритового виробу, що охоплює технологічні операції одержання потрібного хімічного складу шихти, пресування шихти і її спікання. Температура спікання залежить від складу шихти, встановлюється в межах 1200–1400 °С і підтримується з похибкою не більше ніж 10 °С. Внаслідок виконання технологічної операції спікання геометричні розміри деталі, встановлені під час виконання попередньої операції пресування, можуть змінитись у істотних межах. Крім того, після операції спікання може змінитись хімічний склад матеріалу, встановлений на першій технологічній операції, спричинивши зростання потоків дефектів.



Рис. 4.8. Вплив технологічної операції спікання шихти на її хімічний склад і розміри феритової деталі:

ω_c – параметр потоку дефектів під час термічного оброблення сформованих деталей способом пресування; ω_p – параметр потоку дефектів, пов'язаних зі зміною розмірів деталей, спричинених їх термічним обробленням; $\omega_{сш}$ – параметр потоку дефектів, пов'язаних зі зміною хімічного складу фериту під дією термічного оброблення

Апроксимацію таких залежностей можна здійснювати елементарними функціями, а для їх побудови для конкретних технологій достатньо статистичного матеріалу, нагромадженого на підприємствах.

Як показано на рис. 4.7, під час виконання контролю якості виробу стосовно параметра, сформованого внаслідок виконання k -ї технологічної операції, операцією контролю $КО_{k,k}$, що реально функціонує, може одночасно відбуватись контроль параметрів, які сформовані й пропущені на попередніх кроках технологічного процесу. Через пропуск дефектів на цих кроках створюються потоки $\omega_{\text{деф.к-1,1}}; \omega_{\text{деф.к,1}} \dots; \omega_{\text{деф.к-1,к-1}}$, які контролюють контрольними операціями $КО_{k,1}, КО_{k,2}, \dots, КО_{k,к-1}$, що уявно функціонують. Всі контрольні процедури на k -му кроці характеризуються відповідними значеннями імовірності правильного контролю $P_{k,1}, P_{k,2}, \dots, P_{k,k}$ і відповідними значеннями параметрів потоків виявлених та пропущених дефектів.

Отже, вихідні потоки дефектів n -крокового процесу визначаються залежностями

$$\begin{aligned}
 \omega_{\text{вя.н,1}}^{\partial} &= \omega_{\text{деф.н,1}} P_{n,1}; & \omega_{\text{пр.н,1}}^{\partial} &= \omega_{\text{деф.н,1}} (1 - P_{n,1}); \\
 \omega_{\text{вя.н,2}}^{\partial} &= \omega_{\text{деф.н,2}} P_{n,2}; & \omega_{\text{пр.н,2}}^{\partial} &= \omega_{\text{деф.н,2}} (1 - P_{n,2}); \\
 & \dots & & \dots \\
 \omega_{\text{вя.н,n}}^{\partial} &= \omega_{\text{деф.н,n}} P_{n,n}; & \omega_{\text{пр.н,n}}^{\partial} &= \omega_{\text{деф.н,n}} (1 - P_{n,n}).
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

Математична модель потоку дефектів $\Omega_{\text{пр.п}}$, пропущених з n -го кроку технологічного процесу, визначається підсумовуванням парціальних потоків

$$\Omega_{\text{пр.п}} = \omega_{\text{пр.п},1}^{\partial} + \omega_{\text{пр.п},2}^{\partial} + \dots + \omega_{\text{пр.п},n}^{\partial}. \quad (4.52)$$

Зазначимо, що стосовно виробів контроль може бути або вибіркоvim, або суцільним (стовідсотковим), але в будь-якому з цих варіантів контроль параметрів виробів завжди є вибіркоvim. З цієї причини оцінювання якості супроводжується ризиком виробника α і ризиком користувача β . Значення цих імовірнісних показників визначають простір невизначеності в оцінюванні якості. Цей простір істотно звужується у разі детального аналізу сумнівної ситуації і повторного одноразового або багаторазового вимірювання параметрів.

4.4. Моделі потоків виробничих дефектів на завершальних стадіях регулювання і технологічного припрацювання РЕА

Регулювання виробів на завершальних стадіях виробництва зумовлено тим, що необхідно усунути відхилення параметрів виробів від їх номінальних значень, що виникають внаслідок похибок, допущених під час проектування, використання матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів з істотними розкидами параметрів, неточністю виконання технологічних процедур. Проблема забезпечення точності параметрів радіоелектронних пристроїв набула особливої значущості через поки що обмежені точнісні можливості мікротехнології, що особливо помітно на феритових виробках, елементах НВЧ, діодах, транзисторах мікросхемах та інших електронних компонентах. Стадія регулювання апаратури характеризується ущільненням і розрідженням потоків виробничих дефектів, причому, на відміну від стадії виготовлення деталей та вузлів, збирання і монтажу виробів, розрідження потоку дефектів відбувається не тільки під час виконання контрольної процедури, передбаченої структурою технологічного процесу, але і під час виконання суто регулювальних робіт.

Під час виробництва РЕА вимоги до технологічного припрацювання також набувають специфічного змісту. На цій стадії технологічного процесу потрібно не тільки виявляти та усувати виробничі дефекти, які спричиняють ранні відмови, але і формувати властивості, що забезпечують збереження точності параметрів виробів під час тривалої експлуатації.

Модель утворення потоків дефектів на стадії регулювання виробів зображено на рис. 4.9.

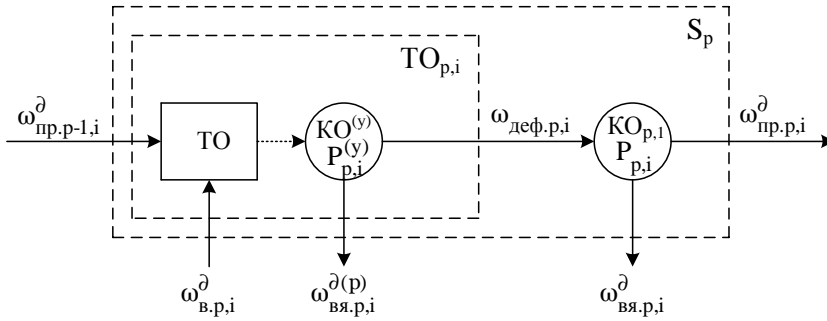


Рис. 4.9. Модель формування потоків дефектів на стадії регулювання (підсистема S_p):

$ТО_{р,i}$ – технологічна операція регулювання i -го параметра виробу;

$ТО$ – суто технологічна операція регулювання; $КО^{(y)}$ – уявна (супутня) контрольна операція; $P_{р,i}^{(y)}$ – імовірність правильного контролю під час виконання операції $КО^{(y)}$;

$КО_{р,i}$ – контрольна операція, передбачена структурою технологічного процесу;

$P_{р,i}$ – імовірність правильного контролю під час виконання операції $КО_{р,i}$;

$\omega_{пр.р-1,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, що надходять з попередніх стадій технологічного процесу; $\omega_{в.р,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, що вводяться під час регулювання; $\omega_{вя,р,i}^{\partial(p)}$ – параметр потоку дефектів, виявлених під час регулювання;

$\omega_{деф.р,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів після процедури регулювання;

$\omega_{вя,р,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, виявлених під час контролю

$$\omega_{пр.р,i}^{\partial(p)} = (\omega_{пр.р-1,i}^{\partial} + \omega_{в.р,i}^{\partial})(1 - P_{р,i}^{(y)}); \quad (4.53)$$

$$\omega_{вя,р,i}^{\partial(p)} = (\omega_{пр.р-1,i}^{\partial} + \omega_{в.р,i}^{\partial})P_{р,i}^{(y)}; \quad (4.54)$$

$$\omega_{пр.р,i}^{\partial} = (\omega_{пр.р-1,i}^{\partial} + \omega_{в.р,i}^{\partial})(1 - P_{р,i}^{(y)})(1 - P_{р,i}); \quad (4.55)$$

$$\omega_{вя,р,i}^{\partial} = (\omega_{пр.р-1,i}^{\partial} + \omega_{в.р,i}^{\partial})(1 - P_{р,i}^{(y)})P_{р,i}; \quad (4.56)$$

Сумарний потік дефектів, виявлених під час регулювання і контролю, характеризується параметром

$$\omega_{вя.сум.р,i}^{\partial} = (\omega_{пр.р-1,i}^{\partial} + \omega_{в.р,i}^{\partial})[P_{р,i}^{(y)} + (1 - P_{р,i}^{(y)})P_{р,i}], \quad (4.57)$$

де $(1 - P_{р,i}^{(y)})$ і $(1 - P_{р,i})$ – параметри розрідження потоку дефектів під час регулювання і контролю якості регулювання виробів.

Якщо за параметр ущільнення потоку прийняти величину

$$\gamma_{р,i} = 1 + \frac{\omega_{в.р,i}^{\partial}}{\omega_{пр.р-1,i}^{\partial}}, \quad (4.58)$$

то параметри розрідження потоків, які потрібні, щоб забезпечити задані показники надійності виробів, можна визначити за формулами

$$1 - P_{p,i}^{(y)} = \frac{\omega_{пр.p,i}^{\partial}}{\gamma_{p,i} \omega_{пр.p-1,i}^{\partial} (1 - P_{p,i})}, \quad (4.59)$$

$$1 - P_{p,i} = \frac{\omega_{пр.p,i}^{\partial}}{\gamma_{p,i} \omega_{пр.p-1,i}^{\partial} (1 - P_{p,i}^{(y)})}. \quad (4.60)$$

При тому параметр вихідного потоку $\omega_{пр.p,i}^{\partial}$ задають, а інші величини повинні бути відомі.

Якщо відомі $\epsilon_{p,i}$ – коефіцієнт перетворення потоку дефектів на потік відмов апаратури за i -м параметром; $\epsilon_{o,i}$ – коефіцієнт перетворення потоку дефектів на потік відмов матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів; ϵ_{ij} – коефіцієнт перетворення потоку дефектів, які виникають на m -й стадії технологічного процесу, на потік відмов апаратури, то вищенаведені формули можна подати у вигляді

$$1 - P_{p,i}^{(y)} = \frac{\epsilon \omega_{пр.p,i}^{\partial}}{\left[\sum_{i=1}^n \gamma_{o,i} \epsilon_{o,i} \omega_{o,i}^{\partial} + \sum_{j=1}^p \gamma_{ij} \epsilon_{ij} \omega_{i,j}^{\partial} \right] (1 - P_{p,i})} \quad (4.61)$$

$$1 - P_{p,i} = \frac{\epsilon \omega_{пр.p,i}^{\partial}}{\left[\sum_{i=1}^n \gamma_{o,i} \epsilon_{o,i} \omega_{o,i}^{\partial} + \sum_{j=1}^p \gamma_{ij} \epsilon_{ij} \omega_{i,j}^{\partial} \right] (1 - P_{p,i}^{(y)})} \quad (4.62)$$

Перетворення потоків дефектів під час виконання технологічного припрацювання зображено на рис. 4.10.

Потоки дефектів, які характеризують підсистему технологічного припрацювання виробів, визначаються так

$$\omega_{деф.p,i}^{\partial} = (\omega_{пр.p-1,i}^{\partial} + \omega_{в.p,i}^{\partial}) (1 - P_{п,i}^{(y)}); \quad (4.63)$$

$$\omega_{вя.p,i}^{\partial} = (\omega_{пр.p-1,i}^{\partial} + \omega_{в.p,i}^{\partial}) P_{п,i}^{(y)}; \quad (4.64)$$

$$\omega_{пр.p,i}^{\partial} = (\omega_{пр.p-1,i}^{\partial} + \omega_{в.p,i}^{\partial}) (1 - P_{п,i}^{(y)}) (1 - P_{п,i}); \quad (4.65)$$

$$\omega_{вя.p,i}^{\partial} = (\omega_{пр.p-1,i}^{\partial} + \omega_{в.p,i}^{\partial}) [P_{п,i}^{(y)} + (1 - P_{п,i}^{(y)}) P_{п,i}]. \quad (4.66)$$

Сумарний потік дефектів, виявлених у процесі припрацювання і контролю, визначається за формулою

$$\omega_{вя.сум.p,i}^{\partial} = (\omega_{пр.p,i}^{\partial} + \omega_{в.p,i}^{\partial}) [P_{п,i}^{(y)} + (1 - P_{п,i}^{(y)}) P_{п,i}]. \quad (4.67)$$

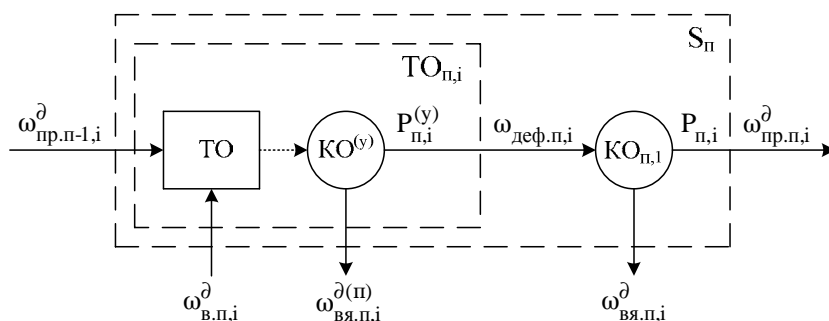


Рис. 4.10. Модель формування потоків дефектів на стадії технологічного припрацювання виробів (підсистема $S_{п,i}$):

$TO_{п,i}$ – технологічний процес припрацювання виробу (стосовно i -го параметра);

TO – суто процес припрацювання; $KO^{(y)}$ – уявна (супутня) операція контролю;

$P_{п,i}^{(y)}$ – імовірність правильного контролю під час виконання операції $KO^{(y)}$;

$KO_{п,i}$ – контрольна операція, передбачена структурою технологічного процесу;

$P_{п,i}$ – імовірність правильного контролю під час виконання операції $KO_{п,i}$;

$\omega_{пр.п-1,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, що надходять з попередніх стадій технологічного процесу; $\omega_{в.п,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, що вводяться під час припрацювання; $\omega_{вя.п,i}^{\partial(n)}$ – параметр потоку дефектів, виявлених під час припрацювання;

$\omega_{деф.п,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів після припрацювання виробів;

$\omega_{вя.п,i}^{\partial}$ – параметр потоку дефектів, виявлених під час контролю

У наведених рівняннях $(1 - P_{п,i}^{(y)})$, $(1 - P_{п,i})$ – параметри розрідження потоку дефектів під час припрацювання та контролю якості технологічного припрацювання виробів.

Параметри розрідження потоків дефектів під час технологічного припрацювання і контролю, які необхідні для забезпечення заданих показників надійності апаратури, визначають за формулами

$$1 - P_{п,i}^{(y)} = \frac{\omega_{в.к.п,i}^{\partial}}{\gamma_{п,i} \omega_{пр.к.п-1,i}^{\partial} (1 - P_{п,i})} \quad (4.68)$$

$$1 - P_{п,i} = \frac{\omega_{в.к.п,i}^{\partial}}{\gamma_{п,i} \omega_{пр.к.п-1,i}^{\partial} (1 - P_{п,i}^{(y)})}, \quad (4.69)$$

де $\gamma_{п,i} = 1 + \frac{\omega_{в.п,i}^{\partial}}{\omega_{пр.к.п-1,i}^{\partial}}$ – параметр ущільнення потоку дефектів під час припрацювання.

Наведені вирази використовують для визначення параметрів розрідження потоків дефектів за заданими (допустимими) значеннями параметрів цих потоків на виході технологічних операцій регулювання та технологічного припрацювання виробів.

4.5. Концептуальні аспекти моделювання і прогнозування надійності під час виробництва РЕА

Сучасний етап розвитку виробництва радіоелектронних пристроїв характеризується неперервним зростанням вимог до якості та надійності цього виду техніки. Для того, щоб вирішити проблему забезпечення надійності, необхідно розробити комплекс методів оцінювання, прогнозування, нормування і керування якістю технологічних процедур від початкових операцій до кінцевих з метою гарантованого забезпечення заданих показників. Цього можна досягти здійсненням широкомасштабних досліджень впливу технологічних процесів на властивості виробів на окремих стадіях виробництва. Зрозуміло, що моделювання цих впливів і їх оптимізація мають сенс тільки за наявності апріорної інформації про зв'язки між параметрами технологічних процесів і, зокрема, їх дефектністю і показниками надійності готових виробів. Інформацію про вказані зв'язки і залежності можна отримати, лише провівши трудомісткі активні або пасивні експерименти.

Аналіз функціонування, відмов і відновлення радіоелектронної апаратури різного призначення свідчить про кореляційні зв'язки між виробничими дефектами, які виникають на різних стадіях технологічного процесу, та її надійністю. Явище перенесення властивостей виробів з попередніх технологічних операцій на наступні або зі стадії виробництва на стадію експлуатації, яке називають технологічним або технічним успадкуванням, засвідчує факт, що у кожній відмови виробу є конкретна схемна, конструкційна або технологічна причина.

Методологічна основа імовірнісного підходу до прогнозування надійності на окремих стадіях технологічного процесу – використання залежності показників надійності виробів від рівня дефектності на цих стадіях. При цьому процес формування якості виробів розглядається як деяка сукупність технологічних і контрольних процедур, виконання яких супроводжується ущільненням або розрідженням потоків виробничих дефектів. Ефект успадкування властивостей об'єкта виробництва під час виготовлення і експлуатації є процесом перетворення потоку виробничих дефектів, що виникають з певною імовірністю на кожному кроці технологічного процесу, на потік відмов. Загальний коефіцієнт перетворення потоків E визначається множиною

$$E = \{\epsilon_{1,1}, \epsilon_{2,1}, \epsilon_{2,2}, \epsilon_{3,1}, \epsilon_{3,2}, \epsilon_{3,3}, \dots, \epsilon_{n,1}, \epsilon_{n,2}, \dots, \epsilon_{n,n}\}. \quad (4.70)$$

Параметр повного потоку відмов Ω отримують, перемножуючи відповідні елементи матриць коефіцієнтів перетворення – E, дефектності – $P_{\text{деф}}$ і матриці імовірностей неправильного контролю – $(1-P)$:

$$\Omega = E \cdot P_{\text{деф}} \cdot (1-P). \tag{4.71}$$

Кожний елемент цієї матриці є параметром потоку відмов $\omega_{n,1}, \omega_{n,2}, \dots, \omega_{n,n}$

$$\begin{aligned} \omega_{n,1} &= \Psi_1 (\epsilon_{n,1}, P_{\text{деф. n,1}}, P_{n,1}) \\ \omega_{n,2} &= \Psi_2 (\epsilon_{n,2}, P_{\text{деф. n,2}}, P_{n,2}) \\ &\dots\dots\dots \\ \omega_{n,n} &= \Psi_n (\epsilon_{n,n}, P_{\text{деф. n,n}}, P_{n,n}) \end{aligned} \tag{4.72}$$

за допомогою яких можна визначити показники надійності $P_{k,i}(t)$, або $T_{\text{сер. n,i}}$, $i = \overline{1, n}$ за кожним сформованим показником якості:

$$P_{(n,i)}(t) = \exp\left(-\int_0^t \omega_{n,i}(\tau) d\tau\right) \tag{4.73}$$

або якщо $\omega_{n,i}(t) = \text{const}$ $P_{n,i} = \exp(-\omega_{n,i}t)$

$$T_{\text{сер. n,i}} = 1 / \omega_{n,i}. \tag{4.74}$$

Якщо в електричній схемі та конструкції виробу немає резервних елементів, повний потік відмов визначається сумою

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \omega_{n,i}. \tag{4.75}$$

На рис. 4.11 наведено отримані експериментально залежності ω від ω^d для основних стадій технологічного процесу серійного виготовлення трьох типів електронних осцилографів четвертого покоління.

Регресійні залежності параметрів потоків відмов ω від параметрів потоків дефектів осцилографів зведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Регресійні залежності параметрів потоків відмов ω від параметрів потоків виробничих дефектів ω^d

Об'єкт досліджень \ Виріб	Осцилограф тип 1	Осцилограф тип 2	Осцилограф тип 3
ЕРЕ	$\omega = 0,2+0,37\omega^d$	$\omega = -0,97+0,66\omega^d$	$\omega = -0,33+0,67\omega^d$
Матеріали	$\omega = -0,07+0,604\omega^d$	$\omega = -0,024+0,37\omega^d$	–
Деталі	$\omega = 0,013+0,304\omega^d$	$\omega = -0,03+0,47\omega^d$	$\omega = -0,012+0,33\omega^d$
Збирання	$\omega = 0,07+0,613\omega^d$	–	–
Монтаж	$\omega = -0,014+0,77\omega^d$	$\omega = 0,107+0,39\omega^d$	$\omega = 0,103+0,29\omega^d$
Друк. плати	$\omega = -0,033+0,71\omega^d$	$\omega = 0,013+0,64\omega^d$	$\omega = 0,09+0,81\omega^d$
Друк. вузли	$\omega = 0,017+0,34\omega^d$	$\omega = 0,028+0,48\omega^d$	$\omega = 0,018+0,66\omega^d$
Перемикачі	$\omega = 0,019+0,78\omega^d$	$\omega = 0,09+0,68\omega^d$	$\omega = 0,0117+0,33\omega^d$
Трансформатори	–	$\omega = 0,061+0,51\omega^d$	$\omega = 0,03+0,33\omega^d$
Техн. припрацювання	$\omega = 0,04+0,21\omega^d$	–	–

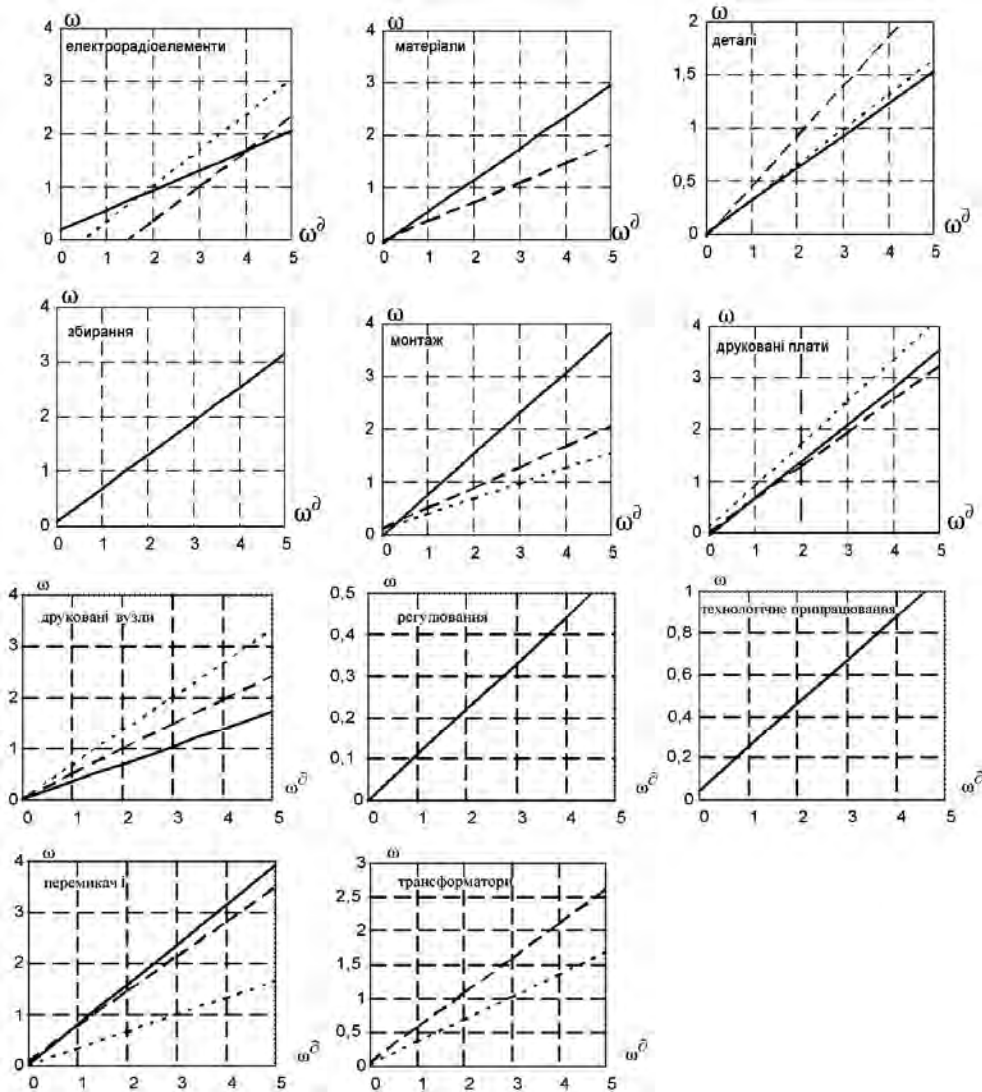


Рис. 4.11. Залежності параметрів потоків відмов від параметрів потоків виробничих дефектів на різних стадіях ТП виготовлення і експлуатації трьох типів осцилографів

Встановлено, що, хоч значення коефіцієнтів перетворення потоків дефектів на потоки відмов і характеризуються істотною розбіжністю для різних технологічних операцій, але вона є значно меншою для однотипних операцій для різних виробів, які істотно відрізняються електричними схемами і конструкційним виконанням (рис. 4.12).

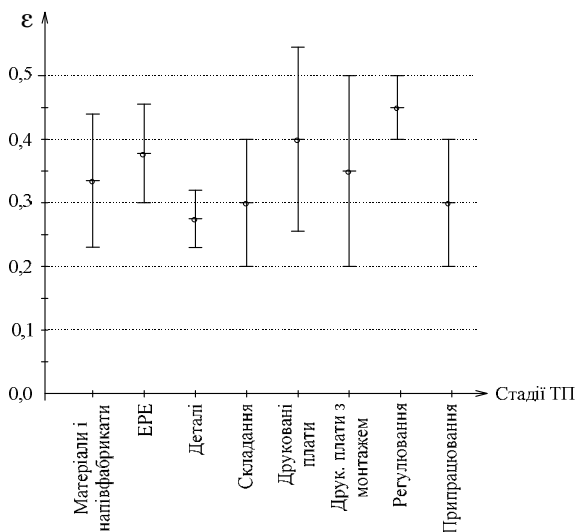


Рис. 4.12. Розмахові та середні значення коефіцієнта перетворення потоків дефектів на потоки відмов основних стадій виготовлення частотомірів групи ЧІ і осцилографів групи СІ

Результати наведених досліджень отримано сумісно зі службою надійності підприємства.

Встановлення залежності показників надійності від параметрів потоків виробничих дефектів на окремих стадіях технологічного процесу дає змогу виконувати комплекс завдань їх аналізу, синтезу й оптимізації, спрямованих на забезпечення потрібного техніко-економічного рівня виробів. Викладені концептуальні положення щодо можливості підвищити ефективність методів прогнозування надійності ґрунтуються на врахуванні ефекту успадкування властивостей виробів під час їх виготовлення й експлуатації. Їх можна використовувати для вдосконалення нормативної бази систем комплексного керування виробництвом. Отримані результати експериментальних досліджень свідчать про доцільність і перспективність виконання робіт у цьому напрямі.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ І МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ У ВИРОБНИЦТВІ РЕА

5.1. Стан і проблеми кваліметрії у радіоапаратобудуванні

На сучасному етапі радіоапаратобудування все більше набуває визнання і значущості новий науковий напрям, що охоплює теоретичні, методологічні й суто практичні проблеми кількісного оцінювання якості виробів на стадіях їх проектування, виробництва та експлуатації. Цей напрям, що називається кваліметрією, зарекомендував себе як ефективний і науково обґрунтований теоретичний фундамент та інструмент аналізу і синтезу в системах оцінювання і забезпечення якості виробів на всіх стадіях їх життєвого циклу.

Відповідно до вимог ISO 9001-2000 систему управління якістю продукції треба побудувати так, щоб звести до мінімуму передавання неякісних виробів з одного етапу проектування і виробництва на інший. Це забезпечується моніторингом якості як самих виробів, так і процесів їх виготовлення.

Контрольні операції у виробництві сучасної техніки становлять значну частину технологічних процесів і є надзвичайно трудомісткими і відповідальними. Їх можна виконувати на будь-якій стадії виробництва і остаточне рішення про доцільність їх застосування потрібно приймати на підставі об'єктивних критеріїв.

Сучасний моніторинг процесів забезпечення якості ґрунтується на стратегії, визначеній у згаданому міжнародному стандарті, яка передбачає виконання вимог Міжнародного комітету з проблем тестопридатності об'єктів тестування (SMA TESTABILITY COMMITTEE), з одного боку, і вимог до тестового обладнання, які забезпечують його ефективне використання, з іншого.

Значних результатів у сфері контролю якості компонентів РЕА на відповідність їх параметрів нормованим значенням методом ASA (аналоговий сигнатурний аналіз) досягли фірми TERA Dyne (США), Polar Instruments (Великобританія), Micro Craft (Японія), Совтест АТС (Росія). Для тестування друкованих плат, що працюють на високих частотах, широко упроваджують рефлектметричні методи в системах CITS і RITS фірм Polar і Micro Craft.

Обмежений за кількістю інформації аналіз відомих методів і апаратних засобів тестування у виробництві РЕА все ж характеризує стан, тенденції і проблеми у цій галузі. Розглянемо їх.

Розвиток методів і засобів тестування компонентів у виробництві РЕА спрямований на розширення обсягу контрольованих параметрів виробів зі збільшенням точності, глибини контролю і кількості виявлених дефектів у відсотковому або імовірнісному плані.

За даними фірм, що розробляють і виготовляють апаратні засоби тестування, їх спроможність виявляти виробничі й інші дефекти обмежується 99 %, що не може гарантувати їх повної відсутності у виробках, а отже, і відсутності потенційних причин ненадійності апаратури під час експлуатації.

Зважаючи на недосконалість сучасної контрольної-діагностичної техніки, необхідно застосовувати адекватну методологію і методи виконання контролю якості продукції на всіх стадіях виробництва з гарантуванням ефективності контролю і забезпечення заданих показників.

Процедури контролю якості, як і інші процедури, передбачені структурами технологічних процесів, потребують оптимізації з використанням відповідних математичних моделей процесів утворення і виявлення дефектів. Як зазначено вище, така оптимізація повинна бути не локальною, а системною і забезпечувати вибір оптимальних варіантів контролю у межах повних виробничих процесів. Потрібно зазначити, що у вітчизняній і зарубіжній літературі опубліковано значну кількість матеріалу, що стосується аналізу розроблених методів контролю, наведено математичний апарат, потрібний для їх реалізації. Однак відсутність комплексного аналізу властивостей об'єктів контролю і методів їх оцінювання змушує застосовувати математичні абстракції та припущення, які не завжди задовільно узгоджуються з особливостями проектування, реального виробництва і експлуатації цього виду техніки.

Використання методів кваліметрії, як свідчать дослідження, постійно розширюється. Вони особливо ефективні під час оцінювання якості складних виробів з багатофункціональним характером якості, розгалуженою ієрархією властивостей, схемною та конструкційною складністю. З наведеного аналізу логічно зробити висновок, що на сучасному етапі розвитку технології та організації виробництва РЕА актуальне подальше розроблення теорії та практики моніторингу якості у двох основних стратегічних напрямках. Одним з них є розроблення ефективних методів і засобів контролю якості на окремих стадіях технологічних процесів тестуванням не тільки компонентів, а і виробів загалом. Інший напрям – розроблення теорії і методів побудови і впровадження систем забезпечення якості, що повністю охоплюють контуром керування виробничі процеси і, отже, реалізують принцип комплексного забезпечення ефективності й оптимізації виробництва за критеріями якості продукції і сумарних виробничих витрат.

Однак сьогодні сформувались не зовсім чіткі ознаки систем контролю якості у виробництві РЕА.

Незважаючи на інтенсивний розвиток кваліметрії як науки, існує низка невирішених наукових проблем, які загалом стримують її практичне використання. До них належать:

- визначення складу (номенклатури) властивостей, показників параметрів і характеристик, що підлягають дослідженню під час комплексного оцінювання і нормування якості виробів;

- встановлення залежностей між показниками властивостей виробів, що визначають їх якість, й оцінками якості;

- визначення вагомості й інформативності параметрів виробів, які використовують для оцінювання якості;

- кількісне оцінювання рівня якості виробів з встановленням можливостей і параметрів варіації цього рівня;

- наскрізне математичне моделювання процесів формування і оцінювання якості виробів;

- багатопараметрична оптимізація комплексних систем забезпечення якості виробів тощо.

Оскільки ці проблеми недостатньо науково досліджені і немає відповідної методології їх вирішення, автори публікацій часто орієнтуються на слабо обгрунтовані припущення й апріорі прийняті положення, що і визначає сумнівну цінність для спеціалістів-виробничників результатів, отримуваних під час виконання реальних завдань стосовно організації систем забезпечення якості. Саме тому питання створення наскрізних математичних моделей процесів формування і контролю якості виробів, придатних для вирішення реальних виробничих завдань комплексної оптимізації таких процесів, стали предметом досліджень у цій галузі.

5.2. Особливості контролю у виробництві РЕА

Контрольні операції у виробництві РЕА у певній послідовності розподіляються по всьому технологічному процесу і забезпечують контроль вхідних матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, деталей і збірних одиниць власного виготовлення, режимів роботи технологічного обладнання, вихідних параметрів виробів тощо. З урахуванням обсягів випуску продукції, її вартості, ресурсу й інших чинників контроль може бути суцільним (стовідсотковим) або вибіркоким (статистичним). Залежно від призначення він може бути приймальним, попереджувальним або загороджувальним, проводитись за кількісними або альтернативними ознаками.

Контроль під час виробництва характеризується широкою різноманітністю властивостей, які визначаються особливостями електричних схем і конструкцій виробів, технологією виготовлення, серійністю виробництва, обладнанням і багатьма іншими чинниками. Однією з характеристик контролю є ефективність виконання контрольних операцій з метою виявлення дефектів, які виникають під час формування k -го параметра виробу і дефектів, пропущених з попередніх кроків. Виконані дослідження багатьох технологічних процесів серійного виготовлення РЕА засвідчили, що на k -му кроці найефективніший контроль k -го параметра. Параметри, сформовані на $(k-1)$ -х кроках, якщо $i = \overline{1, k-1}$, контролюються на k -му кроці менш ефективно або взагалі не контролюються. При цьому імовірності правильного контролю P_{ki} поєднані умовою

$$P_{k,k} > P_{k,k-1} > P_{k,k-2} > \dots > P_{k,1}. \quad (5.1)$$

Узагальнено імовірність правильного контролю P_{ki} можна подати функцією $P_{k,i} = \varphi(x, i)$, де i – порядковий номер контрольованого параметра на k -му кроці технологічного процесу, x – кількість контрольованих параметрів або інший показник обсягу чи глибини контролю.

Для зручності порівняння різних варіантів контролю за їх ефективністю введемо поняття значущості функції $P_{k,i} = \varphi(x, i)$ як показника глибини контролю.

У такому разі область значущості визначатиметься кількістю параметрів, сформованих на $(k-1)$ -х кроках технологічного процесу, на яких імовірність правильного контролю якості виробів набуває значення, не меншого від наперед встановленого числа v . Тобто

$$\begin{aligned} i &\in A_k, \text{ якщо } P_{k,i} \geq v, \\ i &\in \overline{A}_k, \text{ якщо } P_{k,i} < v, \end{aligned} \quad (5.2)$$

де A_k – область значущості функції $P_{k,i}$.

Як очевидно з такого визначення, область значущості A_k характеризує застосований вид контролю з погляду його здатності виявляти дефекти виробництва, допущені на k -му і на попередніх кроках технологічного процесу. Ці дефекти є наслідком недосконалої контролю на ранніх стадіях виробництва. Очевидно, чим більша область значущості, тим “глибше” виконано контроль якості виробів.

Чіткого визначення глибини контролю як показника ефективності контрольних процедур поки що не сформульовано, що призвело до різних тлумачень цього поняття. Наприклад, глибину контролю ототожнюють з “об’ємом контролю” і розглядають як одну з характеристик системи автоматизованого контролю РЕА поряд з такими показниками, як достовірність, продуктивність, ефективність, точність вимірювання контрольованих параметрів.

рів, економічні показники. Мало робіт з кількісним аналізом окремих факторів, що визначають глибину контролю якості виробів під час функціонування системи: об'єкт контролю – методи і засоби контролю–контролер. До них належать множина схемних, конструкційних і технологічних факторів, які забезпечують контролепридатність виробів, точність застосовуваних методів і засобів контролю, їх швидкодію і автоматизацію, достовірність результатів вимірювань і потрібну кваліфікацію контролерів. Відсутні також загальноприйняті методики кількісного оцінювання глибини контролю.

У цій роботі глибину контролю якості розглядаємо як характеристику функціональної ефективності контрольних процедур, внаслідок виконання яких здобувається певна кількість інформації, що використовується для оцінювання якості виробів. Кількісно глибину контролю α можна оцінювати за обсягом контрольних операцій так:

– під час суцільного (стовідсоткового) контролю – кількістю контрольованих параметрів n_n виробів, тобто

$$\alpha = \frac{n_n}{N_n}; \quad (5.3)$$

– під час вибіркового контролю – кількістю виробів у контрольованій вибірці n_b , тобто

$$\alpha = \frac{n_b}{N_b}, \quad (5.4)$$

де N_n і N_b – загальна кількість нормованих параметрів кожного виробу і кількість виробів у партії, як підлягають контролю.

Зауважимо, що такий підхід до визначення глибини контролю придатний для оцінювання якості виробів не тільки за нормованими параметрами, контроль яких передбачений технічними умовами чи іншими нормативними документами, але і за параметрами ненормованими, дослідження яких надає додаткову інформацію про стан виробів.

Проведені дослідження області значущості імовірності правильного контролю $P_{k,i}$ дозволили встановити такі закономірності.

Хоч неавтоматизований контроль чи контроль вручну і характеризується низькою продуктивністю, сильним впливом суб'єктивних факторів, дорожчею й іншими недоліками, все ж широко застосовується під час оцінювання якості складних технічних пристроїв в умовах малосерійного виробництва з частою зміною номенклатури виробів. Цей вид контролю вирізняється значною глибиною. Функція $P_{k,i}$, набуваючи максимального значення для k -го кроку, зменшується за певним законом у міру наближення до початку координат, який відповідає початку виробництва. Це пояснюється тим, що під час виконання

контролю вручну контролер зосереджує увагу переважно на k -му параметрі виробу. Контроль параметрів, сформованих на попередніх кроках технологічного процесу, є побічною функцією контролера, яка залежить від кваліфікації, швидкості реакції, норми відведеного часу тощо. Різниця в значеннях імовірності виявлених дефектів $P_{в.к,i}$, допущених на різних стадіях виробництва, тим більша, чим складніший виріб. Область значущості функції $P_{к,i}$ можна визначати K кроками технологічного процесу, тобто $A_k = \overline{1, K}$.

Прикладами контролю такого виду може бути процедура оцінювання параметрів збирання і монтажу виробів у разі значної розчленованості технологічних процесів на окремі операції, що характерно для серійного виробництва РЕА. До них зараховуємо техпроцеси просочування, маркування, регулювання, технологічного припрацювання тощо. Так, наприклад, регулювальник апаратури поряд з виконанням основної функції, встановленням параметрів регульованого об'єкта в межах заданих допусків, оцінює раніше виконані операції збирання, електричного монтажу, маркування апаратури. Оператор дільниці технологічного припрацювання оцінює якість регулювання апаратури, стан захисного і захисно-декоративного покриття, роботу органів керування тощо.

Сьогодні набули поширення автоматизовані пристрої та системи контролю, виконані на базі ЕОМ і мікропроцесорів. Такі пристрої використовують як для контролю окремих деталей, так і для оцінювання складних виробів. Застосування автоматизованого контролю з використанням засобів діагностики дає змогу оцінювати їхню якість і за раніше сформованими параметрами. Оцінюють за допомогою спеціальних тестів, які передбачають приблизно рівноцінний контроль за цими параметрами.

Цей вид контролю належить до другої групи і характеризується такими умовами:

$$A_k \in \{j, k\}, \text{ якщо } 1 \leq j \leq k. \quad (5.5)$$

Ця група контрольних операцій характеризується обмеженою глибиною контролю, зате більшою достовірністю результатів контролю визначених параметрів.

До третьої групи контрольних операцій належать операції, які дають змогу на k -му кроці технологічного процесу оцінювати якість виробів за параметром або групою параметрів, отриманих на цьому кроці. У такому разі контроль визначених на попередніх кроках параметрів не планується через технологічну або організаційну складність або якщо його визнано недоцільним.

Прикладами можуть бути контрольні операції, які виконують під час функціонування автоматизованих систем керування технологічними процесами, що працюють у реальному масштабі часу. До них належать автоматизовані й

автоматичні системи контролю і керування технологічними процесами вакуумного напилення плівок з неперервним контролем товщини покриття, виготовлення плівкових резисторів і конденсаторів з неперервним контролем опору та ємності, виготовлення друкованих плат тощо.

Принципи побудови автоматизованих систем контролю і керування технологічними процесами широко розглянуто в літературі. У цих системах отриману інформацію про контрольований об'єкт використовують для оцінювання його властивостей і одночасно для керування процесом їх забезпеченням. Визначаючи стан об'єкта контролю, такі системи можуть не тільки встановлювати відповідність реальних характеристик об'єкта заданим, але і використовуватись для виявлення дефектів і несправностей об'єкта, а також для прогнозування його надійності. У такому разі кількість контрольованих параметрів визначена і витримується в ході виробництва.

Область значущості функції $P_{k,i}$ за такого контролю обмежується k -м кроком або деякою кількістю дотичних кроків, тобто $A_k \in \{ \overline{k-i, k} \}$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$.

Імовірність $P_{k,i}$ узагальнено можна подати добутком

$$P_{k,i} = P_{k,k} \cdot P_k(i), \tag{5.6}$$

де $P_{k,k}$ – імовірність правильного контролю k -го параметра на k -му кроці технологічного процесу; $P_k(i)$ – імовірність правильного контролю на k -му кроці параметрів, сформованих на $i = 1, 2, \dots, k-1$ кроках технологічного процесу за умови, що $P_{k,k} = 1$.

Імовірність $P_{k,k}$ залежить від деяких факторів і насамперед від обсягу контрольних операцій α , виду контролю і кваліфікації виконавців (рис. 5.1).

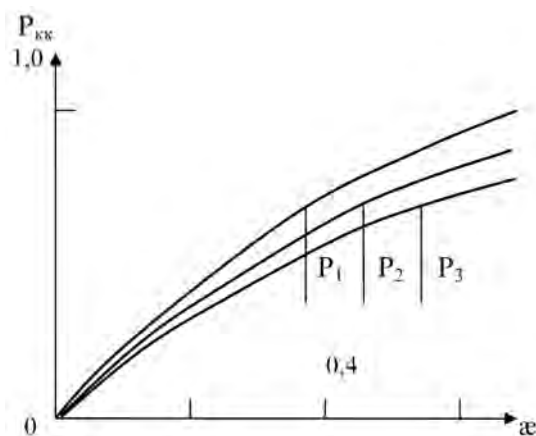


Рис. 5.1. Узагальнена залежність імовірності правильного контролю P_{kk} від обсягу контролю α і трьох рівнів кваліфікації виконавців P_1, P_2, P_3

Вище зазначено, що суцільний контроль широко використовують у сучасному виробництві РЕА. Відомо також, що цей найдорожчий вид контролю не гарантує повної бездефектності продукції, причому ця особливість проявляється тим більше, чим менша його автоматизація.

Дослідження свідчать, що рівень РЕА істотно залежить від якості матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, номенклатура і кількість яких доволі значна. Проблема виконання їхнього вхідного контролю за складністю, трудомісткістю і вартістю співрозмірна з проблемою забезпечення основного виробництва. У зв'язку з цим завдання оптимізації вхідного контролю з урахуванням техніко-економічних критеріїв визначення на цій основі обсягу вибірок і переліку контрольованих параметрів набуло особливої актуальності.

Сьогодні обсяг і методика вхідного контролю для кожного виду отримуваної продукції визначаються нормативними документами, які розробляють технічні служби підприємства. Вірогідність контролю тим вища, чим більше параметрів підлягає перевірці, а у разі вибіркового контролю – чим більший обсяг контрольованої вибірки. Тут контрольованими можуть бути нормовані в технічних документах (паспортах, ТУ тощо) параметри і ненормовані, але такі, що суттєво відображають технічний стан виробу. Зрозуміло, що отримувані таким способом оцінки якості виробів не є інваріантними до умов досліджень, які виконують, до режимів роботи, до навантаження тощо. На жаль, такою інформацією нечасто володіють технологи і працівники служби контролю на серійних заводах, і щоб отримати її, потрібно проводити спеціальні дослідження, мета яких – встановити ступінь впливу конкретних параметрів на показники якості виробів. Але з нагромадженням такої інформації обсяги досліджень істотно зменшуються.

Для прикладу розглянемо вхідний контроль електrolітичних конденсаторів і мікросхем, які отримують від заводу-постачальника. Якість конденсаторів характеризується деякими нормованими параметрами, а саме:

- величиною ємності конденсатора або допустимим полем розсіювання ємності;
- значенням струму втрат за заданої прикладеної напруги;
- максимальною робочою напругою (електрична міцність);
- допустимою зміною ємності у разі підвищення і пониження температури тощо.

Крім нормованих параметрів, якість конденсаторів характеризують також ненормовані параметри, які визначають:

- імпеданс конденсатора;
- цілісність і герметичність корпусу;
- стан покриття під'єднувальних елементів, що контактують, тощо.

Під час виробництва мікросхем – підсилювача низької частоти – формуються основні властивості цього виробу – здатність підсилювати низькочастотні сигнали. Основний нормований параметр мікросхеми – коефіцієнт підсилення. Оцінювати якість виробу можна як за значенням коефіцієнта підсилення, так і з урахуванням інших параметрів, зокрема і ненормованих, серед яких:

- діапазон амплітуд підсилювальної напруги;
- коефіцієнт нелінійних спотворень за заданої амплітуди сигналу;
- смуга частот підсилювального сигналу;
- чутливість до зміни напруги живлення;
- стабільність підсилення в часі тощо.

Врахування цих параметрів дозволяє отримувати додаткову інформацію про властивості контрольованих виробів і, отже, забезпечувати вищу достовірність оцінювання їх якості.

Експериментально встановлено, що імовірність $P_{k,k}$ задовільно описується функцією

$$P_{k,k} = 1 - \exp\{-\alpha_k \varkappa\}, \quad (5.7)$$

де \varkappa – співмножник, який характеризує обсяг контрольних операцій; α_k – адаптаційний коефіцієнт, який визначає швидкість зміни функції $P_{k,k}$.

У разі застосування вибіркового контролю імовірність $P_{k,k}$ залежить від обсягу вибірки.

Імовірність $P_k(i)$ характеризує глибину контролю, тобто можливість виявити на k -му кроці технологічного процесу дефекти, пропущені з попередніх кроків (рис. 5.2).

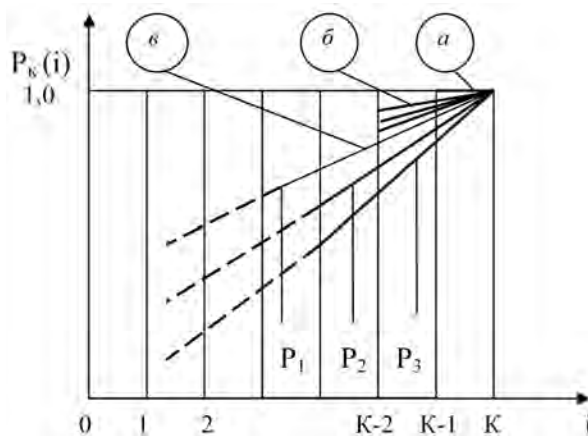


Рис. 5.2. Узагальнена залежність імовірності $P_k(i)$ від порядкового номера контрольованого параметра на i -му кроці технологічного процесу i кваліфікації виконавців: a – контроль автоматичний; b – контроль автоматизований; v – контроль неавтоматизований

Як показують дослідження, ця функція може бути неперервною або розірваною і задовільно описується експоненціальною залежністю вигляду

$$P_k(i) = \exp \{-b(k-i)\}, \quad (5.8)$$

де b – коефіцієнт, який залежить від виду контролю, контролепридатності виробів, досконалості обладнання і контрольно-вимірювальної апаратури, кваліфікації контролерів й інших чинників.

Встановлено також, що ця залежність набуває конкретного вигляду для виробів, що належать до відповідної технологічної партії.

У табл. 5.1, як приклад, наведено результати досліджень глибини контролю плати живлення індикаторного пристрою. Значення імовірності правильного контролю $P_k(i)$ вказано за рівня значущості $v = 0,05$.

Таблиця 5.1

Результати експериментального дослідження глибини контролю плати живлення індикаторного пристрою

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,55	0,5	0,4	0,42	0,2	0,07	0	0	0	0	0
2		1	0,8	0,4	0,3	0,2	0	0	0	0	0	0
3			1	0,37	0,22	0	0	0	0	0	0	0
4				1	0,66	0,13	0,1	0,15	0	0	0	0
5					1	0,45	0,47	0	0	0	0	0
6						1	0,44	0,12	0	0	0	0
7							1	0,23	0,06	0	0	0
8								1	0,17	0	0	0
9									1	0,67	0,33	0
10										1	0,77	0
11											1	0,7
12												1

Примітки:

1 – виготовлення заготовки; 2 – очищення поверхні механічним способом; 3 – очищення поверхні хімічним способом; 4 – нанесення резисту; 5 – перфорування; 6 – активування хлористим паладієм; 7 – хімічне міднення; 8 – гальванічне нарощування міді; 9 – нанесення срібла або сплаву олово-свинець; 10 – травлення міді; 11 – нанесення захисного лакового покриття; 12 – маркування.

З гістограм розподілу імовірності $P_k(i)$ на основних стадіях виготовлення друкованої плати, що показані на рис. 5.3, зокрема, очевидно, що у міру збільшення порядкового номера кроку технологічного процесу область A_k значущих значень імовірності $P_k(i)$ звужується. Це свідчить, що доцільно виконувати жорсткий контроль на ранніх стадіях виробництва, оскільки пропущені дефекти на пізніших стадіях виявляють з меншим успіхом, але зі значно більшими матеріальними та часовими втратами.

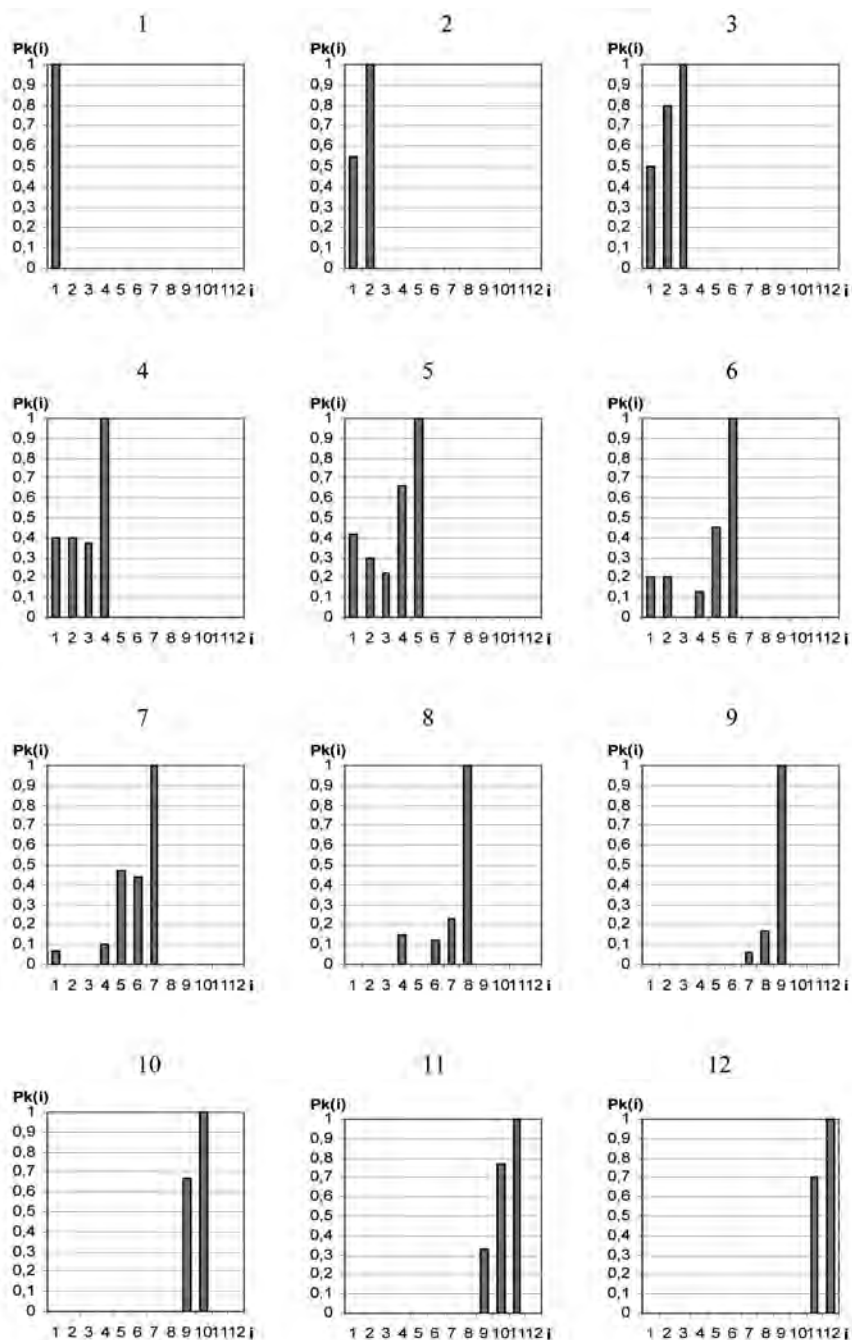


Рис. 5.3. Гістограми розподілу імовірності $P_k(i)$ на основних стадіях виготовлення плати живлення індикаторного пристрою

Якщо зіставити сутність функції (5.7) і (5.8), очевидно, що перша з них переважно відображає залежність імовірності правильного контролю $P_{k,k}$ від обсягу контрольних операцій i , отже, є керуючою за цим параметром функцією. Імовірність $P_k(i)$ не залежить від обсягу контрольних операцій, а визначається контролепридатністю виробу, досконалістю засобів контролю, кваліфікацією контролерів. Під час подальшого аналізу та моделювання процедур контролю якості виробів цю функцію розглядатимемо як апіорно задану.

5.3. Ефективність контролю і проблеми забезпечення

Особливістю виготовлення сучасної радіоелектронної апаратури в умовах стрімкого зростання номенклатури і обсягів виробництва є проблема забезпечення ефективності контрольних процедур – відповідальних елементів структур технологічних процесів і чинних на підприємствах систем забезпечення якості. Жорсткі вимоги до безвідмовності техніки зумовили необхідність виконання контролю якості як матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів та інших складових частин і готової апаратури, так і технологічних процесів її виготовлення. До того ж необхідно зазначити, що запроваджена багато років тому, але діюча і дотепер практика організації і виконання контролю якості, в основу якої покладено концепцію так званого повного (стовідсоткового) і вибіркового контролю, сьогодні застаріла і категорично непридатна як з суто технічного, так і з загальнофілософського погляду. Абсурдність понять повного і вибіркового контролю передовсім полягає у їх семантичній неадекватності реальній сутності контрольних процедур в аспекті їхньої спроможності достовірно оцінювати стан виробу, який визначає його якість. Згідно із загальноприйнятими визначеннями якості виробів сприймається як сукупність властивостей, що забезпечують їхню здатність виконувати функції відповідно до призначення. Ця сукупність оцінюється показником якості, який у загальному випадку зображають вектором $X_{(n)}$, компонентами якого є показники властивостей x_1, x_2, \dots, x_n

$$X_{(n)} = [x_1, x_2, \dots, x_n], \quad (5.9)$$

де n – кількість властивостей, що визначають якість.

Кожна властивість виробу визначається множиною інших властивостей. Кількість рівнів такого ієрархічного дерева під час постійного нагромадження знань про властивості виробів може необмежено зростати. Множина властивостей, а значить і множина показників якості, набувають ознак континуума. Тому необхідно змиритись з об'єктивною реальністю того, що будь-який контроль, навіть так званий стовідсотковий, ніколи не гарантуватиме відсутності дефектів у виробках. Це

зумовлено тим, що стовідсотковий або суцільний контроль виробів за сутністю завжди є вибіркоvim контролем стосовно параметрів.

Вектором контрольованих параметрів $X_{<m>}$ є

$$X_{<m>} = [x_1, x_2, \dots, x_m], \quad (5.10)$$

де m – кількість контрольованих параметрів.

Під час виконання контролю перевіряють відповідність реальних показників якості виробів техніко-економічним вимогам замовника. Оцінювання кондиційності виробів завжди супроводжується похибками, пов'язаними з недосконалістю методів і засобів контролю, а також помилками персоналу, з одного боку, і методичними похибками, пов'язаними з вказаною вибірковістю, з іншого. Саме тому в результаті проведення контролю замість істинних показників якості отримують їх оцінки, які є випадковими величинами. За результатами контролю розглядаються гіпотези: нульова гіпотеза про те, що показники якості містяться у допустимій області, і альтернативна гіпотеза про те, що показник якості виходить за її межі. Як відомо, під час перевірки гіпотез можливі помилки першого і другого роду. Перша характеризується неприйняттям нульової гіпотези, якщо вона правильна, друга – прийняттям нульової гіпотези, якщо правильна альтернативна. Імовірність помилки першого роду α називають ризиком постачальника, імовірність помилки другого роду β – ризиком замовника.

Величини α , β і m взаємозв'язані. Характер їхніх залежностей визначається вибраним правилом перевірки гіпотези – правилом Неймана–Пірсона, Байєса, мінімаксним та ін.

З досвіду використання теорії і методів статистичного оцінювання якості радіоелектронної апаратури зроблено такий висновок: достовірність позитивних і негативних оцінок якості апаратури навіть у разі рівності ризиків α і β може бути істотно різною. Це зумовлено тим, що оцінювання якості апаратури виконують за обмеженої кількості параметрів і тому імовірність пропуску дефектних одиниць продукції завжди більша, ніж імовірність їхнього хибного забракування. Під час виробництва контроль якості виробів і технологічних процесів провадиться так, що зафіксовані внаслідок контролю відхилення показників якості виробів від встановлених норм кваліфікуються як виробничі дефекти і стають об'єктом ретельного аналізу працівниками відповідних служб. До того ж помилки першого роду виявляють і усувають, і, отже, вироби, параметри яких – у межах встановлених допусків, зараховують до категорії придатних або кондиційних. А вироби з пропущеними дефектами внаслідок помилки другого роду, яка оцінюється імовірністю β – ризиком замовника, хибно зараховують до категорії придатних і відсилають до замовника.

Отже, основними помилками контролю якості в умовах виробництва РЕА є помилки другого роду, які визначають ризик замовника отримати неякісну продукцію. Вони також визначають витрати виробника впродовж гарантійного обслуговування. Ці витрати є незрівнянно більші від витрат на усунення виявлених дефектів на стадії виробництва. Тому, оцінюючи ефективність забезпечення якості в умовах серійного виробництва РЕА, помилки другого роду необхідно мінімізувати насамперед, оскільки вони визначають істотну частину сумарних витрат, що виникають під час виготовлення і експлуатації апаратури.

З урахуванням наведеного, ефективність контрольних операцій доцільно оцінювати за допомогою імовірності правильного контролю P , що визначає їх спроможність виявляти дефекти у виробках, які підлягають контролю. Цю імовірність можна виразити через ризик замовника β .

Зазначимо, що ризик замовника призводить до зменшення результуючого значення імовірності виконання завдання $P_{e.3}^p$ підсистемою контролю $S_{ко}$:

$$P_{e.3}^p = P_{в.3} (1-\beta). \quad (5.11)$$

Ризики постачальника і замовника представляються відповідними імовірностями подій.

Якщо позначити Δ_n , Δ_v – нижня та верхня границі допуску; $\hat{x}_{\partial i}$ – випадкове значення i -го параметра до проведення контролю; u_i – похибка вимірювання i -го параметра. Тоді виміряна величина x_i визначається сумою випадкових величин $\hat{x}_{\partial i}$ і \hat{u}_i , тобто

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{\partial i} + \hat{u}_i.$$

Ризик постачальника визначається імовірністю події

$$\hat{x}_i < \Delta_{ni} \text{ або } \hat{x}_i > \Delta_{vi} \text{ при } \Delta_{ni} \leq \hat{x}_i \leq \Delta_{vi}.$$

Тобто

$$\alpha_i = P\{[(\hat{x}_i < \Delta_{ni}) \cup (\hat{x}_i > \Delta_{vi})] / (\Delta_{ni} \leq \hat{x}_i \leq \Delta_{vi})\}.$$

Ризик замовника визначається імовірністю події

$$\Delta_{ni} \leq \hat{x}_i \leq \Delta_{vi} \text{ при } \hat{x}_{\partial i} < \Delta_{ni} \text{ або } \hat{x}_{\partial i} > \Delta_{vi}$$

$$\beta_i = P\{(\Delta_{ni} \leq \hat{x}_i \leq \Delta_{vi}) / [(\hat{x}_{\partial i} < \Delta_{ni}) \cup (\hat{x}_{\partial i} > \Delta_{vi})]\}.$$

Розрахункові формули для визначення імовірностей α і β наведено в багатьох публікаціях зі статистичного оцінювання якості виробів. У [74] визначення ризиків постачальника і замовника апаратури на основі використання умовних законів розподілу випадкових величин і теореми множення імовірностей проводиться за формулами:

$$\alpha = \int_{\Delta_n}^{\Delta_e} f_{\bar{x}_{\partial}}(x_{\partial}) F_{\bar{x}/\bar{x}_{\partial}}(\Delta_n, x_{\partial}) dx_{\partial} + \int_{\Delta_n}^{\Delta_e} f_{\bar{x}_{\partial}}(x_{\partial}) R_{\bar{x}/\bar{x}_{\partial}}(\Delta_e, x_{\partial}) dx_{\partial}; \quad (5.12)$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{\Delta_H} f_{\bar{x}_\partial}(x_\partial)[F_{\bar{x}/\bar{x}_\partial}(\Delta_\sigma, x_\partial) - F_{\bar{x}/\bar{x}_\partial}(\Delta_H, x_\partial)]dx_\partial + \int_{\Delta_\sigma}^{\infty} f_{\bar{x}_\partial}(x_\partial)[F_{\bar{x}/\bar{x}_\partial}(\Delta_\sigma, x_\partial) - F_{\bar{x}/\bar{x}_\partial}(\Delta_H, x_\partial)]dx_\partial. \quad (5.13)$$

У наведених залежностях: Δ_H, Δ_B – нижня та верхня границі допуску; $f_{\bar{x}_\partial}(x_\partial)$ – щільність розподілу імовірності дійсного значення параметра x_∂ ; $F_{\hat{x}/\bar{x}_\partial}(\hat{x}; x_\partial)$ – умовна функція розподілу параметра \hat{x} , визначена за умови, що випадкова величина \bar{x}_∂ набула значення x_∂ ; $R_{\hat{x}/\bar{x}_\partial}(x; x_\partial)$ – додаткова умовна функція розподілу параметра \hat{x} , визначена за умови, що випадкова величина \hat{x}_∂ набула значення x_∂ .

Зазначимо, що наведені залежності придатні для визначення ризиків α і β під час контролю якості партії виробів.

Сучасні РЕА (а це можуть бути окремі пристрої, системи та комплекси) характеризуються численними параметрами, кожен з яких повинен відповідати встановленим вимогам. При тому сумарний ризик індивідуального контролю визначається за формулами:

$$\alpha_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \alpha_{ij}), \quad (5.14)$$

$$\beta_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \beta_{ij}), \quad (5.15)$$

в яких індекс i символізує індивідуальний контроль якості, індекс $j = \overline{1, m}$ – j -й параметр, що підлягає контролю.

Отже, помилки α_i і β_i зумовлені, з одного боку, обсягом вибірки контрольованих параметрів, а з іншого – їх інформативністю про стан виробу. Тому визначати оптимальний набір параметрів необхідно, враховуючи їх значущість під час оцінювання кондиційності апаратури в момент контролю, що дозволяє робити прогностичний висновок про її безвідмовність упродовж гарантійного терміну. Для цього можна використовувати інформативний показник ефективності контролю Q , суттю якого є інформаційна оцінка достовірності контролю [40]:

$$Q = \frac{I_{x_{<m>}}}{H_{x_{<n>}}}, \quad (5.16)$$

де $I_{x_{<m>}}$ – кількість інформації, одержаної під час контролю параметрів, представлених вектором $X_{<m>}$; $H_{x_{<n>}}$ – ентропія, що визначається вектором $X_{<n>}$.

Величини $I_{x_{<m>}}$ і $H_{x_{<n>}}$, що входять у (5.22), визначаються сумами:

$$I_{x_{<m>}} = \sum_{x_j \in \{x_{<m>}\}} I_{x_j}, j = \overline{1, m}; \quad (5.17)$$

$$H_{x_{<n>}} = \sum_{x_i \in \{x_{<n>}\}} H_{x_i}, i = \overline{1, n}. \quad (5.18)$$

За такого підходу процедуру контролю якості розглядають як дію підсистеми зменшення невизначеності властивостей контрольованого об'єкта. Значущість x_j -го параметра в оцінюванні якості виробу визначається відношенням

$$q_j = \frac{I_{x_j}}{H_{x_{<n>}}}. \quad (5.19)$$

Очевидно, що чим більшим є q_j , тим важливіша є інформація про x_j параметр і доцільніший його контроль.

Значущість j -го контрольованого параметра, що належить множині $\{x_j, j = \overline{1, m}\}$, визначається не тільки інформацією про цей параметр, а й інформацією про сукупні параметри, які функціонально чи кореляційно пов'язані з ним. Наприклад, значення коефіцієнта підсилення каналу вертикального відхилення електронного осцилографа порівняно з номіналом є основним показником якості підсилувача в аспекті його спроможності належно підсилювати сигнали. Крім того, коефіцієнт підсилення каналу є одночасно індикатором його частотної та динамічної спроможності. Отже, під час контролю коефіцієнта підсилення підсилувача може отримуватись додаткова інформація про інші параметри, що в результаті забезпечує додаткову інформативність такого контролю.

Показником ефективності контролю j -го параметра може слугувати показник E_j

$$E_j = 1 - \frac{P_{\text{пр.}j}}{P_{\text{деф.}j}}, \quad (5.20)$$

де $P_{\text{деф.}j}$ і $P_{\text{пр.}j}$ – імовірності наявності дефектів до і після виконання контролю j -го параметра.

Підвищити ефективність контролю можна, збільшивши кількість контрольованих параметрів, тобто збільшивши їх за рахунок апріорі ненормованих параметрів з встановленням відповідних нормативів і критеріїв. Тоді показником ефективності контролю стає E_{n+n} :

$$E_{n+n} = 1 - \frac{P_{\text{пр.}n+n}}{P_{\text{деф.}n+n}}, \quad (5.21)$$

де $P_{\text{пр.}n+n}$ – імовірність пропуску дефектів під час контролю нормованих і ненормованих параметрів виробу; $P_{\text{деф.}n+n}$ – імовірність наявності дефектів до контролю параметрів виробу.

Проілюструємо це на визначенні пропуску дефектів n-крокового процесу.

$$P_{\text{пр.1}} = P_{\text{пр.1,1}} = P_{\text{деф.1,1}}(P_{\text{пр.0,1}}, P_{\text{в.1,1}})(1 - P_{1,1})$$

$$P_{\text{пр.2}} = P_{\text{пр.2,1}} \oplus P_{\text{пр.2,2}},$$

де

$$P_{\text{пр.2,1}} = \begin{cases} P_{\text{деф.2,1}}(P_{\text{пр.1,1}}, P_{\text{в.2,1}})(1 - P_{2,1}), & \text{якщо } P_{2,1} \neq 0 \\ P_{\text{деф.2,1}}(P_{\text{пр.1,1}}, P_{\text{в.2,1}}), & \text{якщо } P_{2,1} = 0 \end{cases}$$

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

$$P_{\text{пр.3}} = P_{\text{пр.3,1}} \oplus P_{\text{пр.3,2}} \oplus P_{\text{пр.3,3}},$$

де

$$P_{\text{пр.3,1}} = \begin{cases} P_{\text{деф.3,1}}(P_{\text{пр.2,1}}, P_{\text{в.3,1}})(1 - P_{3,1}), & \text{якщо } P_{3,1} \neq 0 \\ P_{\text{деф.3,1}}(P_{\text{пр.2,1}}, P_{\text{в.3,1}}), & \text{якщо } P_{3,1} = 0 \end{cases}$$

$$P_{\text{пр.3,2}} = \begin{cases} P_{\text{деф.3,2}}(P_{\text{пр.2,2}}, P_{\text{в.3,2}})(1 - P_{3,2}), & \text{якщо } P_{3,2} \neq 0 \\ P_{\text{деф.3,2}}(P_{\text{пр.2,2}}, P_{\text{в.3,2}}), & \text{якщо } P_{3,2} = 0 \end{cases}$$

$$P_{\text{пр.3,3}} = P_{\text{деф.3,3}}(P_{\text{пр.2,3}}, P_{\text{в.3,3}})(1 - P_{3,3})$$

.....

$$P_{\text{пр.n}} = P_{\text{пр.n,1}} \oplus P_{\text{пр.n,2}} \oplus \dots \oplus P_{\text{пр.n,n}},$$

де

$$P_{\text{пр.n,1}} = \begin{cases} P_{\text{деф.n,1}}(P_{\text{пр.n-1,1}}, P_{\text{в.n,1}})(1 - P_{n,1}), & \text{якщо } P_{n,1} \neq 0 \\ P_{\text{деф.n,1}}(P_{\text{пр.n-1,1}}, P_{\text{в.n,1}}), & \text{якщо } P_{n,1} = 0 \end{cases}$$

$$P_{\text{пр.n,2}} = \begin{cases} P_{\text{деф.n,2}}(P_{\text{пр.n-1,2}}, P_{\text{в.n,2}})(1 - P_{n,2}), & \text{якщо } P_{n,2} \neq 0 \\ P_{\text{деф.n,2}}(P_{\text{пр.n-1,2}}, P_{\text{в.n,2}}), & \text{якщо } P_{n,2} = 0 \end{cases}$$

.....

$$P_{\text{пр.n/n-1}} = \begin{cases} P_{\text{деф.n,n-1}}(P_{\text{пр.n-1,n-1}}, P_{\text{в.n,n-1}})(1 - P_{n,n-1}), & \text{якщо } P_{n,n-1} \neq 0 \\ P_{\text{деф.n,n-1}}(P_{\text{пр.n-1,n-1}}, P_{\text{в.n,n-1}}), & \text{якщо } P_{n,n-1} = 0 \end{cases}$$

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

Наведені залежності засвідчують можливість підвищення ефективності оцінки якості виробів при переведенні їх ненормованих параметрів у категорію нормованих і встановлення на них допустимих обмежень. Зменшення при цьому сумарної імовірності пропуску дефектів по кожному параметру досягається в $(1 - P_{к,1})$ рази.

На рис. 5.4 показано результати експериментальних досліджень ефективності контролю чотирьох основних параметрів двох типів аналогових електронних осцилографів.

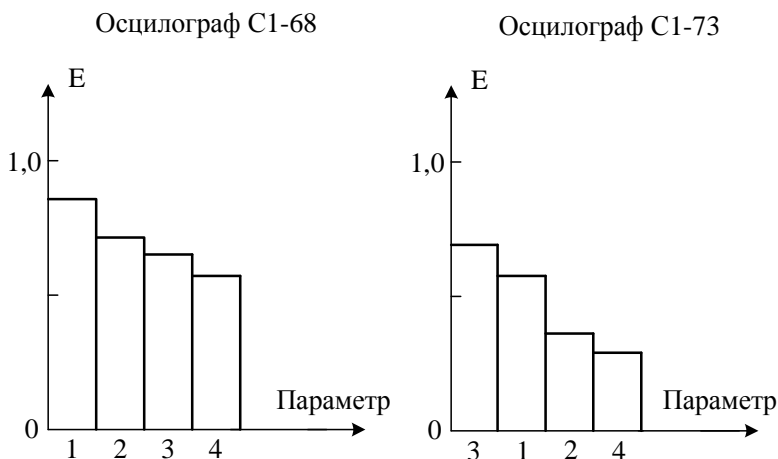


Рис. 5.4. Гістограми розподілу значущості параметрів двох типів електронних осцилографів:

- 1 – зміна основної похибки під час вимірювання напруги за 48 год;
- 2 – зміна основної похибки під час вимірювання часових інтервалів;
- 3 – зміна коефіцієнта відхилення за 48 год;
- 4 – зміна коефіцієнта розгортки за 48 год

З рис. 5.4 видно, що ефективність контролю перелічених параметрів осцилографів одного типу істотно різна. Наприклад, контроль основної похибки осцилографа першого типу під час вимірювання напруги характеризується найбільшою значущістю в оцінюванні якості ($E_1 = 0,9$), контроль коефіцієнта розгортки – найменшою ($E_4 = 0,65$).

Відзначена також істотна різниця у показниках ефективності контролю аналогічних параметрів приладів різних типів. Наприклад, найбільшою значущістю в осцилографа першого типу характеризується контроль похибки вимірювання напруги ($E_1 = 0,9$), а в осцилографа другого типу – $E_1 = 0,74$. Параметри з найменшою значущістю оцінюють відповідно $E_4 = 0,65$ і $E_4 = 0,25$.

Враховуючи, що ці серійні осцилографи розроблено у одному науково-дослідному інституті й виготовлено за однаковою технологією у одному виробничому об'єднанні, можна зробити висновок, що відмінність у ефективності контролю їх параметрів переважно зумовлена схемно-конструкційними особливостями.

Виконані дослідження ефективності контролю якості в процесі виробництва РЕА засвідчують можливість і способи її покращання з урахуванням специфіки сучасної апаратури – її схемної, конструкційної та технологічної складності. Вдосконалення традиційної методології статистичного контролю в аспекті індивідуального контролю систем, які характеризуються множинами вхідних, проміжних і вихідних нормованих і ненормованих показників якості з

оцінюванням їх інформативності, підтверджене експериментальними дослідженнями на реальних об'єктах.

Отже, підвищити ефективність контролю, як очевидно з аналізу наведених залежностей, можна, підвищивши точність оцінювання якості технологічних операцій (функція $P_{к,к}$), збільшивши глибину контролю (функція $P_{к(i)}$) і виконавши повторний контроль з доопрацюванням виробів, контролюючи ненормовані параметри виробів. Вибір оптимальних значень $P_{к,к}$ і $P_{к(i)}$, а також схеми контролю, що забезпечить виконання поставленої задачі з імовірністю $P_{в.з.к,i}$, становить частину загальної проблеми комплексної оптимізації процесу забезпечення якості виробів за розглянутими вище техніко-економічними критеріями його ефективності.

5.4. Види і моделі процесів контролю якості у виробництві РЕА

До типових варіантів контрольних процедур оцінювання якості РЕА в процесі виробництва належать розглянуті нижче.

На рис. 5.5 зображено схему підсистеми вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів.

Ця підсистема виробництва складається з комплексу процедур вхідного контролю, які характеризуються такими показниками:

$P_{деф.1}$ – імовірність наявності дефектів у матеріалах, напівфабрикатах, комплектуючих виробках, які надходять на вхідний контроль;

ω_1 – параметр початкового потоку дефектів;

N – кількість об'єктів, які надійшли на вхідний контроль;

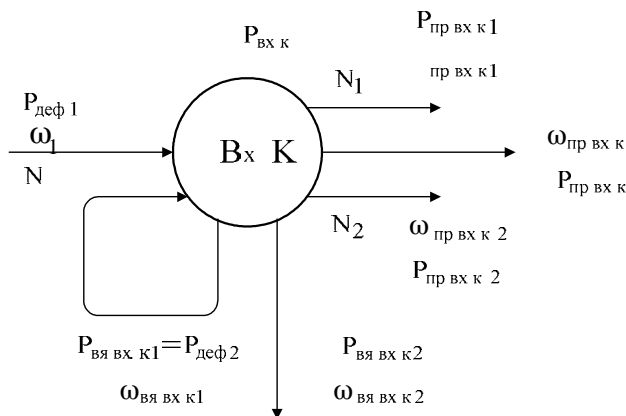


Рис. 5.5. Вхідний контроль матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів

N_1, N_2 – кількість об'єктів, які після першого і другого контролю визнано придатними;

$P_{\text{вх.к}}$ – імовірність правильного контролю на стадії, вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів;

$P_{\text{вя вх.к1}}, P_{\text{вя вх.к2}}$ – імовірності пропуску дефектів у разі першого і другого (повторного) вхідного контролю;

$P_{\text{пр вх.к1}}, P_{\text{пр вх.к2}}$ – імовірності виявлення дефектів у разі першого і другого вхідного контролю;

$P_{\text{пр вх.к}}, \omega_{\text{пр вх.к}}$ – результуюча імовірність пропуску дефектів і параметри потоку пропущених дефектів з вхідного контролю.

Ця стадія виробництва характеризується такими співвідношеннями:

$$P_{\text{пр вх.к1}} = P_{\text{деф1}}(1 - P_{\text{вх.к}});$$

$$P_{\text{вя вх.к1}} = P_{\text{деф1}} \cdot P_{\text{вх.к}} = P_{\text{деф2}}; \quad (5.22)$$

$$P_{\text{вя вх.к2}} = P_{\text{вя вх.к1}} \cdot P_{\text{вх.к}};$$

$$P_{\text{пр.вх.к2}} = P_{\text{вя вх.к1}}(1 - P_{\text{вх.к}}); \quad (5.23)$$

$$\omega_{\text{пр вх.к1}} = \omega_1 - \omega_{\text{вя вх.к1}};$$

$$\omega_{\text{пр вх.к2}} = \omega_{\text{вя вх.к1}} - \omega_{\text{вя вх.к2}}; \quad (5.24)$$

$$\omega_{\text{пр вх.к}} = \omega_{\text{вя вх.к1}} + \omega_{\text{вя вх.к2}};$$

$$N_1 = N(1 - P_{\text{деф1}} \cdot P_{\text{вх.к}});$$

$$N_2 = NP_{\text{деф1}}P_{\text{вх.к}}(1 - P_{\text{деф2}} \cdot P_{\text{вх.к}}). \quad (5.25)$$

Для ретельнішого виявлення браку здійснюють подвійний контроль якості, типовим прикладом якого є послідовний контроль якості виробів апаратом заводу-виробника і представником замовника. Параметри системи, яка працює за цим принципом, проілюстровано на рис. 5.6.

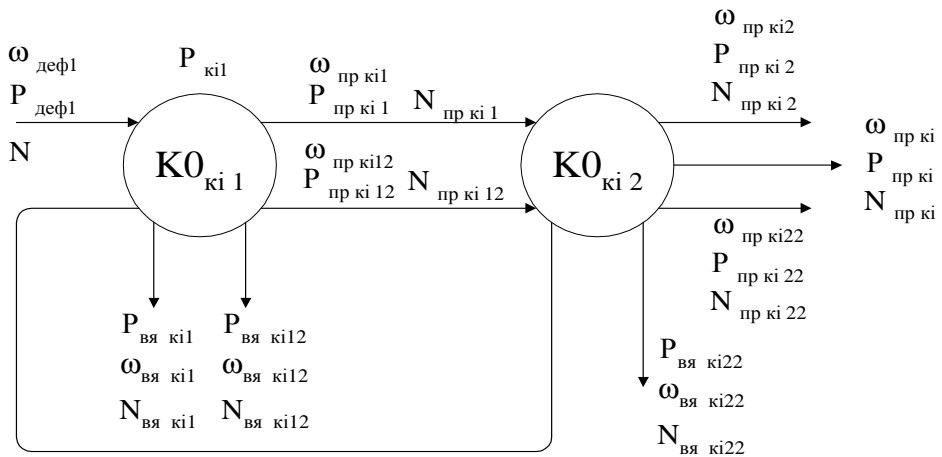


Рис. 5.6. Підсистема подвійного контролю якості

Вхідними параметрами цієї підсистеми є: N – кількість вхідних одиниць продукції; $P_{\text{деф}}$ і $\omega_{\text{деф}}$ – імовірність і параметр потоку вхідних дефектів; $P_{\text{вя кі2}}$ – імовірність виявлення дефектів виробів, що пред’явлені вперше на другий контроль. Імовірності виявлення дефектів у разі першого контролю – $P_{\text{вя кі1}}$ і у разі повторного контролю $P_{\text{вя кі12}}$, імовірність пропуску дефектів на виході системи $P_{\text{пр кі}}$ і відповідні параметри потоків дефектів $\omega_{\text{вя кі1}}$, $\omega_{\text{вя кі12}}$, $\omega_{\text{пр кі}}$, а також кількість виробів, визнаних придатними $N_{\text{пр кі}}$, є вихідними параметрами підсистеми. $P_{\text{кі1}}$ і $P_{\text{кі2}}$ – імовірності правильного контролю – параметри керування. Імовірності пропуску дефектів під час першого і повторного контролю – $P_{\text{пр кі1}}$ і $P_{\text{пр кі12}}$, параметри потоків дефектів $\omega_{\text{пр кі1}}$ і $\omega_{\text{пр кі12}}$, а також кількість виробів $N_{\text{пр кі1}}$ і $N_{\text{пр кі2}}$, є проміжними параметрами.

Усі параметри пов’язані залежностями, а саме:

$$P_{\text{вя кі1}} = P_{\text{деф1}} P_{\text{кі1}}; \quad (5.26)$$

$$P_{\text{пр кі1}} = P_{\text{деф1}} (1 - P_{\text{кі1}}); \quad (5.27)$$

$$\omega_{\text{пр кі1}} = \omega_{\text{деф1}} - \omega_{\text{вя кі1}}; \quad (5.28)$$

$$N_{\text{пр кі1}} = N - N_{\text{вя кі1}} = N(1 - P_{\text{деф1}} P_{\text{кі1}}); \quad (5.29)$$

$$P_{\text{пр кі2}} = P_{\text{пр кі1}} (1 - P_{\text{кі2}}); \quad (5.30)$$

$$\omega_{\text{пр кі12}} = \omega_{\text{пр кі1}} - \omega_{\text{вя кі2}};$$

$$N_{\text{пр кі2}} = N_{\text{пр кі1}} - N_{\text{вя кі2}} = N_{\text{пр кі1}} (1 - P_{\text{пр кі1}} P_{\text{кі2}}); \quad (5.31)$$

$$P_{\text{вя кі12}} = P_{\text{вя кі2}} \cdot P_{\text{кі1}}; \quad (5.32)$$

$$P_{\text{пр кі12}} = P_{\text{вя кі2}} (1 - P_{\text{кі1}}); \quad (5.33)$$

$$\omega_{\text{пр кі12}} = \omega_{\text{вя кі2}} - \omega_{\text{вя кі12}}; \quad (5.34)$$

$$N_{\text{пр кі12}} = N_{\text{вя кі2}} - N_{\text{вя кі12}} = N_{\text{вя кі2}} (1 - P_{\text{пр кі12}} P_{\text{кі1}}); \quad (5.35)$$

$$P_{\text{вя кі22}} = P_{\text{пр кі12}} \cdot P_{\text{кі2}}; \quad (5.35)$$

$$P_{\text{пр кі22}} = P_{\text{пр кі12}} (1 - P_{\text{кі2}}); \quad (5.36)$$

$$\omega_{\text{пр кі22}} = \omega_{\text{вя кі12}} - \omega_{\text{вя кі22}}; \quad (5.36)$$

$$N_{\text{пр кі22}} = N_{\text{пр кі12}} - N_{\text{вя кі22}} = N_{\text{пр кі12}} (1 - P_{\text{пр кі12}} P_{\text{кі2}}). \quad (5.37)$$

Сумарна імовірність пропуску дефектів під час подвійного контролю визначається співвідношенням

$$P_{\text{пр кі}} = \frac{N_{\text{пр кі2}}}{N} \cdot P_{\text{пр кі2}} + \frac{N_{\text{пр кі22}}}{N} \cdot P_{\text{пр кі22}}.$$

Загальна кількість прийнятих одиниць продукції на виході системи

$$N_{\text{пр кі}} = N_{\text{пр кі2}} + N_{\text{пр кі22}}. \quad (5.38)$$

Сумарний потік пропущених дефектів

$$\omega_{\text{пр кі}} = \omega_{\text{пр кі2}} + \omega_{\text{пр кі22}}. \quad (5.39)$$

Розглянемо підсистему виробництва, яка об’єднує велику сукупність технологічних процесів структуроутворення, формоутворення, електричного монтажу,

нанесення покриття, травлення, скрайбування, герметизації, збирання, регулювання тощо. Цю підсистему можна побудувати за різними схемами, але в будь-якому разі вона може об'єднувати елементи самоконтролю якості після виконання технологічних операцій або функціонувати без них (рис. 5.7). Перший варіант є характерним для малосерійного виробництва, другий – для серійного.

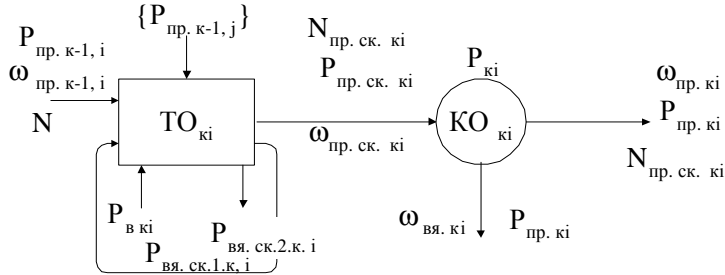


Рис. 5.7. Підсистема виробництва із самоконтролем якості

На цьому рисунку позначено:

$$P_{в\ k, i} = P(P_{в\ k, i}^*; P_{пр\ k-1, 1}; P_{пр\ k-1, 2}; \dots; P_{пр\ k-1, i-1}), \quad i = \overline{1, k-1};$$

$$P_{деф\ k, i} = P_{пр\ k-1, i} + (1 - P_{пр\ k-1, i})P_{в\ k, i};$$

$P_{в\ я\ ск\ k, i} = P_{деф\ k, i} \cdot P_{ск\ k, i}$ – імовірність виявлення дефектів під час самоконтролю якості виконавцем i -ї технологічної операції на k -му кроці технологічного процесу.
 $P_{ск\ k, i}$ – імовірність правильного контролю якості під час виконання самоконтролю.

У разі усувних дефектів імовірність їх пропуску під час самоконтролю визначається функцією $P_{пр\ ск\ k, i}$, аргументами якої є імовірності пропуску дефектів у разі першого і другого самоконтролю, тобто

$$P_{пр\ ск\ 1\ k, i} \cdot P_{пр\ ск\ 2\ k, i};$$

$$P_{пр\ ск\ k, i} = P(P_{пр\ ск\ 1\ k, i}, P_{пр\ ск\ 2\ k, i}). \quad (5.40)$$

Вони визначаються співвідношеннями:

$$P_{пр\ ск\ 1\ k, i} = [P_{пр\ k-1, i} + (1 - P_{пр\ k-1, i})P_{в\ k, i}](1 - P_{ск\ k, i}),$$

$$P_{пр\ ск\ 2\ k, i} = [P_{в\ я\ 1\ ск\ k, i} + (1 - P_{в\ я\ 1\ ск\ k, i})P_{в\ k, i}](1 - P_{ск\ k, i}). \quad (5.41)$$

Значимо, що наведені співвідношення відображають варіант одноразового виконання технологічної операції, щоб усунути дефекти, виявлені під час самоконтролю. При цьому імовірності вводу дефектів $P_{в\ k, i}$ і правильного самоконтролю $P_{ск\ k, i}$ залишаються незмінними.

Розглянемо інші показники цієї підсистеми.

Імовірності виявлення дефектів під час самоконтролю якості виробів $P_{в\ я\ ск\ k, i}$

$$P_{в\ я\ ск\ k, i} = P(P_{в\ я\ ск\ 1\ k, i}, P_{в\ я\ ск\ 2\ k, i}),$$

де $P_{в\ я\ 1\ ск\ k, i}$, $P_{в\ я\ 2\ ск\ k, i}$ – імовірності виявлення дефектів у разі відповідно першого і другого самоконтролю.

Кількість одиниць продукції $N_{пр}$, які після виготовлення і самоконтролю визнано придатними для їх спрямування на технічний контроль:

$$N_{пр\ ск\ кі} = N_{пр1\ ск\ кі} + N_{пр2\ ск\ кі}, \quad (5.42)$$

де $N_{пр1\ ск\ кі}$ і $N_{пр2\ ск\ кі}$ – кількість одиниць продукції, які після першого і другого самоконтролю визнані придатними

$$\begin{aligned} N_{пр\ ск1\ кі} &= N(1 - P_{деф\ ск\ кі} P_{ск1\ кі}), \\ N_{пр\ ск2\ кі} &= N P_{деф\ ск1\ кі} P_{ск1\ кі} (1 - P_{деф\ ск2\ кі} P_{ск2\ кі}), \end{aligned} \quad (5.43)$$

де N – кількість виробів, що надійшли на k -й крок технологічного процесу для формування i -го параметра, $P_{деф\ ск1\ кі}$ і $P_{деф\ ск2\ кі}$ – імовірності наявності дефектності перед першим і другим самоконтролем виробів. Сумарна імовірність пропуску дефектів у разі першого і другого самоконтролю визначається співвідношенням

$$P_{пр\ ск\ кі} = \frac{N_{пр1\ ск\ кі}}{N_{пр\ ск\ кі}} P_{пр1\ ск\ кі} + \frac{N_{пр2\ ск\ кі}}{N_{пр\ ск\ кі}} P_{пр2\ ск\ кі}.$$

Параметр потоку дефектів після виконання k -ї технологічної операції та процедур самоконтролю $\omega_{пр\ ск\ кі}$ дорівнюватиме сумі

$$\omega_{пр\ ск\ кі} = \omega_{пр\ ск1\ кі} + \omega_{пр\ ск2\ кі}, \quad (5.44)$$

де $\omega_{пр\ ск1\ кі}$ і $\omega_{пр\ ск2\ кі}$ – параметри потоків дефектів після першого і другого самоконтролю.

Показники $P_{пр\ ск\ кі}$, $N_{пр\ ск\ кі}$ і $\omega_{пр\ ск\ кі}$ можна розглядати як вхідні параметри підсистеми контролю $КО_{кі}$, вихідними параметрами і параметром керування якої є:

$P_{пр\ кі}$ – імовірність пропуску дефектів після виконання контрольної процедури;

$\omega_{пр\ кі}$ – параметр потоку дефектів продукції після виконання процедури контролю;

$\omega_{вя\ кі}$ – параметр потоку виявлених дефектів;

$P_{вя\ кі}$ – імовірність виявлення дефектів під час контролю;

$P_{кі}$ – імовірність правильного контролю.

Ці параметри визначаються такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} P_{пр\ кі} &= P_{пр\ ск\ кі} (1 - P_{кі}); \\ P_{вя\ кі} &= P_{пр\ ск\ кі} \cdot P_{кі}; \\ \omega_{вя\ кі} &= \omega_{пр\ ск\ кі} - \omega_{пр\ кі}. \end{aligned} \quad (5.45)$$

В умовах серійного виробництва з високим ступенем автоматизації технологічних процесів і досконалим метрологічним забезпеченням самоконтроль переважно не проводиться, а контроль якості виконують під час виконання контрольної операції $КО_{кі}$ (рис. 5.7).

Розглянемо варіант підсистеми виробництва, який передбачає виправлення дефектів, що виявляються під час технічного контролю, повторним виконанням технологічної операції (рис. 5.8).

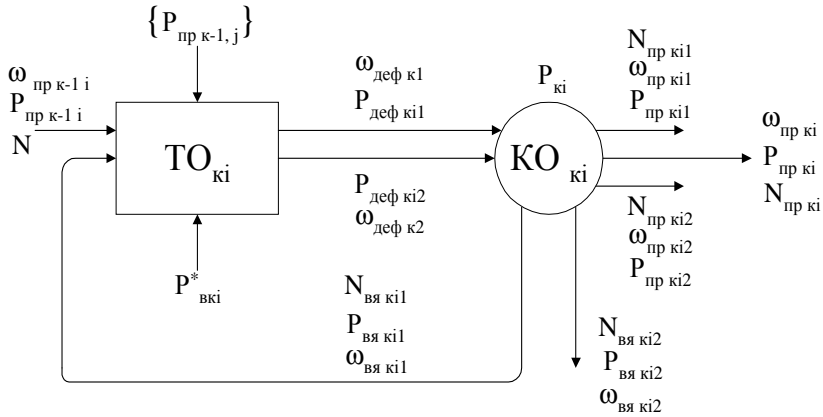


Рис. 5.8. Підсистема виробництва з доопрацюванням виробів

Параметри такої підсистеми пов'язані співвідношеннями

$$\begin{aligned}
 P_{вкi} &= P(P_{вкi}^*, P_{пр\ k-1,1}, P_{пр\ k-1,2}, \dots, P_{пр\ k-1,k-1}) = P(P_{вкi}^*, P_{пр\ k-1,j}), j = \overline{1,i}; \\
 P_{деф\ кi1} &= P_{пр\ k-1,i} + (1 - P_{пр\ k-1,i})P_{вкi}; \\
 P_{пр\ кi1} &= P_{деф\ кi1}(1 - P_{кі}); \\
 P_{вя\ кi1} &= P_{деф\ кi1} \cdot P_{кі};
 \end{aligned} \tag{5.46}$$

$$\begin{aligned}
 P_{деф\ кi2} &= P_{вя\ кi1} + (1 - P_{вя\ кi1})P_{вкi}; \\
 P_{пр\ кi2} &= P_{деф\ кi2}(1 - P_{кі}); \\
 P_{вя\ кi2} &= P_{деф\ кi2} \cdot P_{кі};
 \end{aligned} \tag{5.47}$$

$$\omega_{пр\ кi1} = \omega_{деф\ кi1} - \omega_{вя\ кi1}; \tag{5.48}$$

$$\begin{aligned}
 N_{пр\ кi1} &= N - N_{вя\ кi1} = N(1 - P_{деф\ кi1} \cdot P_{кі}); \\
 P_{деф\ кi2} &= P_{вя\ кi1} + (1 - P_{вя\ кi1})P_{вкi}; \\
 P_{пр\ кi2} &= P_{деф\ кi2}(1 - P_{кі}); \\
 P_{вя\ кi2} &= P_{деф\ кi2} \cdot P_{кі};
 \end{aligned} \tag{5.49}$$

$$\omega_{пр\ кi2} = \omega_{деф\ кi2} - \omega_{вя\ кi2};$$

$$\begin{aligned}
 N_{вя\ кi1} &= NP_{кі} \cdot P_{деф\ кi1}; \\
 N_{пр\ кi2} &= N_{вя\ кi1} P_{деф\ кi2}(1 - P_{кі}); \\
 N_{пр\ кi} &= N_{пр\ кi2}.
 \end{aligned} \tag{5.50}$$

$$\omega_{пр\ кi} = \omega_{пр\ кi1} + \omega_{пр\ кi2}. \tag{5.51}$$

Сумарна імовірність пропуску дефектів на виході підсистеми

$$P_{\text{пркі}} = \frac{N_{\text{пркі1}}}{N} P_{\text{пркі1}} + \frac{N_{\text{пркі2}}}{N} P_{\text{пркі2}}.$$

Реальним є поєднання підсистеми з самоконтролем із повторним виконанням технологічної операції, тобто поєднання структур, зображених на рис. 5.7 і 5.8. Результатом такого поєднання є комбінована підсистема виробництва та контролю (рис. 5.9).

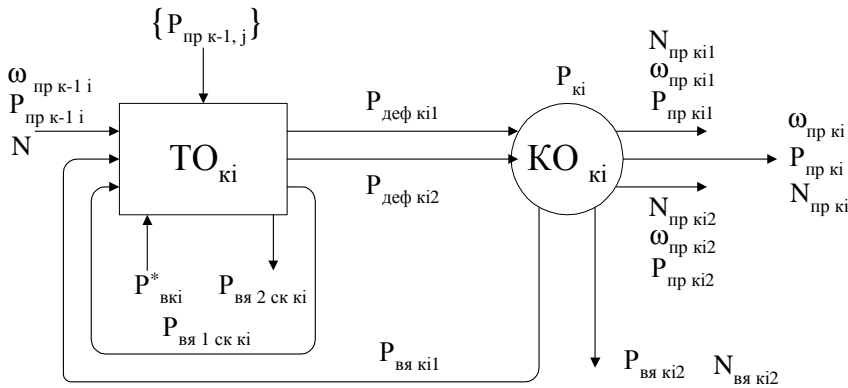


Рис. 5.9. Комбінована підсистема виробництва і контролю

Зазначимо, що, розглядаючи наведені структури підсистем формування та контролю якості виробів, робили припущення, що повторне виконання технологічної операції, а також здійснення контрольних процедур не супроводжується вводом додаткових дефектів, що здебільшого спостерігається на практиці.

У разі послідовного з'єднання технологічних та контрольних процедур, як це найчастіше спостерігається у реальних технологічних процесах, проявляється ефект успадкування під час формування заданих властивостей виробів. Внаслідок дії цього ефекту переносяться і нагромаджуються дефекти виробництва, які допустили і не виявили на ранніх стадіях виробництва (рис. 5.10).

Враховуючи рекурентність залежностей параметрів технологічних і контрольних процедур у такій структурі, к-ту стадію технологічного процесу характеризують параметрами

$$P_{\text{пркі}} = \langle [P_{\text{прк-2,i}} + (1 - P_{\text{прк-2,i}})P_{\text{вк-1,i}}](1 - P_{\text{к-1,i}}) + \{1 - [P_{\text{прк-2,i}} + (1 - P_{\text{прк-2,i}})P_{\text{вк-1,i}}](1 - P_{\text{к-1,i}})\}P_{\text{вкі}} \rangle (1 - P_{\text{кі}}) \quad (5.52)$$

$$P_{\text{обкі}} = \langle [P_{\text{прк-2,i}} + (1 - P_{\text{прк-2,i}})P_{\text{вк-1,i}}](1 - P_{\text{к-1,i}}) + \{1 - [P_{\text{прк-2,i}} + (1 + P_{\text{прк-2,i}})P_{\text{вк-1,i}}](1 - P_{\text{к-1,i}})\}P_{\text{вкі}} \rangle P_{\text{кі}}. \quad (5.53)$$

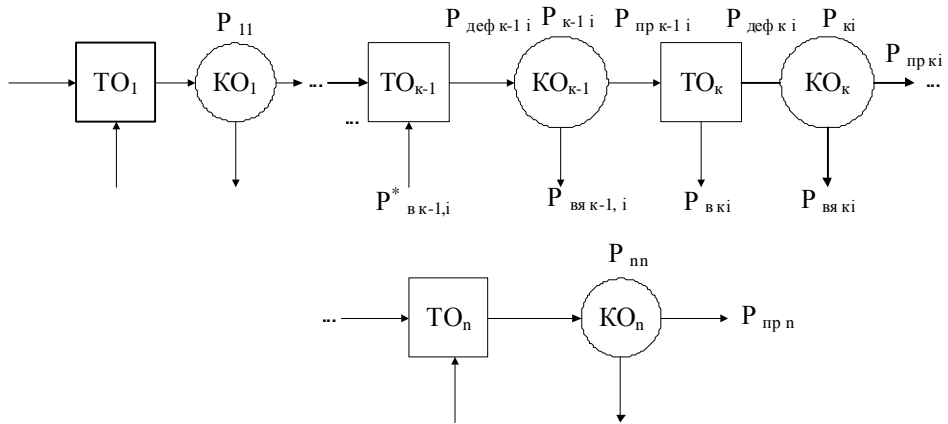


Рис. 5.10. Фрагмент процесу послідовної структури

Формування кожного i -го параметра на k -й стадії технологічного процесу є подіями сумісними, тому математична модель сумарної пропущеної дефектності на його виході визначається рівнянням

$$P_{\text{пр } k, 1, 2, \dots, n} = \sum_{1 \leq i \leq n} P_{\text{пр } ki} - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P_{\text{пр } ki_1} P_{\text{пр } ki_2} + \dots + (-1)^{s-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq n} P_{\text{пр } ki_1} P_{\text{пр } ki_2} \dots P_{\text{пр } ni_s} + \dots + (-1)^{n-1} P_{\text{пр } k, 1} \times \dots \times P_{\text{пр } u, n}. \quad (5.54)$$

Отже, досягнення остаточних показників якості готової продукції є результатом сумісного функціонування двох формалізованих підсистем – технологічної підсистеми формування якості та підсистеми контролю якості.

Якщо правильно виконано контроль якості, досягається ефект виявлення дефектів з імовірністю $P_{\text{вя}}$, неправильний контроль спричиняє пропуск дефектів у прийнятій партії готової продукції з імовірністю $P_{\text{пр}}$.

Користуючись прийнятими раніше позначеннями, оцінку функціонування виробничої системи S у складі підсистем формування якості $S_{\text{фя}}$ і контролю якості $S_{\text{кя}}$ зобразимо почленним добутком відповідних матриць

$$\|P_{\text{вя}}^S\| = \|P_{\text{деф}}^{S_{\text{фя}}}\| \cdot \|P^{S_{\text{кя}}}\| \quad (5.55)$$

$$\|P_{\text{пр}}^S\| = \|P_{\text{деф}}^{S_{\text{фя}}}\| \cdot \|1 - P^{S_{\text{кя}}}\|, \quad (5.56)$$

в яких матриці $\|P^{S_{\text{кя}}}\|$ і $\|1 - P^{S_{\text{кя}}}\|$ є математичними моделями правильного й неправильного контролю якості виробів. У розгорнутому варіанті ці моделі набувають вигляду (наводяться без позначення систем):

$$\|P^{S_{кя}}\| = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{22}P_2(1) & P_{33}P_3(1) & \dots & P_{nn}P_n(1) \\ & P_{22} & P_{33}P_3(2) & \dots & P_{nn}P_n(2) \\ & & P_{33} & \dots & P_{nn}P_n(3) \\ & & & \ddots & \\ & & & & P_{nn}P_n(n-1) \\ & & & & P_{nn} \end{vmatrix} \quad (5.57)$$

$$\|1 - P^{S_{кя}}\| = \begin{vmatrix} 1 - P_{11} & 1 - P_{22}P_2(1) & 1 - P_{33}P_3(1) & \dots & 1 - P_{nn}P_n(1) \\ & 1 - P_{22} & 1 - P_{33}P_3(2) & \dots & 1 - P_{nn}P_n(2) \\ & & 1 - P_{33} & \dots & 1 - P_{nn}P_n(3) \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 - P_{nn}P_n(n-1) \\ & & & & 1 - P_{nn} \end{vmatrix}. \quad (5.58)$$

Аналогічно можна отримати математичні моделі процесу формування дефектності для будь-якої стадії технологічного процесу. Вони є універсальними і тому придатні для процесів будь-якої структури і складності.

Розглянуті варіанти підсистеми формування і контролю якості виробів характеризуються параметрами, отриманими за припущення, що операції контролю не супроводжуються введенням додаткових дефектів. Здебільшого справедливості такого припущення підтверджується на практиці.

Отже, підвищити ефективність контролю, як очевидно з аналізу наведених залежностей, можна за рахунок точнішого оцінювання якості технологічних операцій (функція $P_{к,к}$), збільшення глибини контролю (функція $P_{к(i)}$) і виконання повторного контролю з доопрацюванням виробів, контролем ненормованих параметрів виробів. Вибір оптимальних значень $P_{к,к}$ і $P_{к(i)}$, а також схеми контролю, що забезпечить виконання поставленого завдання з імовірністю $P_{в.з.к.і}$, і становить частину загальної проблеми комплексної оптимізації процесу забезпечення якості виробів за розглянутими раніше техніко-економічними критеріями його ефективності.

РОЗДІЛ 6

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ВИТРАТ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕА

6.1. Структура витрат на забезпечення якості під час проектування, виробництва та гарантійного обслуговування РЕА в процесі експлуатації

Сумарні витрати C_{Σ} на забезпечення якості під час проектування, виробництва та експлуатації РЕА описуються адитивною функцією C_{Σ} зі складовими витрат на кожній з цих стадій, тобто

$$C_{\Sigma} = C_{\Pi} + C_{\text{В}} + C_{\text{е}}, \quad (6.1)$$

де C_{Π} , $C_{\text{В}}$, $C_{\text{е}}$ – витрати на забезпечення якості відповідно на стадії проектування, виробництва та експлуатації. Кожна з цих стадій характеризується індивідуальною структурою, комплексом задіяних ресурсів, організацією і проведенням відповідного процесу формування і підтримки заданих властивостей. Узагальнену структуру процесу формування витрат C_{Σ} на забезпечення якості під час проектування, виробництва та експлуатації РЕА наведено на рис. 6.1. Зазначимо, що складові сумарних витрат за природою є функціоналами, оскільки залежать від багатьох часткових функцій, що відображають витрати, які створюються під час окремих процесів і процедур у межах кожної з цих стадій, тобто

$$C_{\Pi} = \Phi(C_{\text{стп}}, C_{\text{схп}}, C_{\text{кп}}, C_{\text{тп}}); \quad (6.2)$$

$$C_{\text{В}} = \alpha(C_{\text{всу}}, C_{\text{вфу}}, \dots, C_{\text{вп}}); \quad (6.3)$$

$$C_{\text{е}} = \psi(C_{\text{ео}}), \quad (6.4)$$

де $C_{\text{стп}}$, $C_{\text{схп}}$, $C_{\text{кп}}$ і $C_{\text{тп}}$ – витрати на забезпечення якості виробів під час проведення системотехнічного, схемотехнічного, конструкторського та технологічного проектування; $C_{\text{всу}}$, $C_{\text{вфу}}$, ..., $C_{\text{вп}}$ – витрати на забезпечення якості під час технологічних операцій: структуроутворення, формоутворення тощо, разом з останніми технологічними операціями, які суттєво впливають на показники якості готової продукції, операціями регулювання та технологічного припрацювання виробів; $C_{\text{ео}}$ – витрати на підтримання рівня якості виробів у користувача упродовж періоду гарантійного обслуговування силами і засобами виробника.

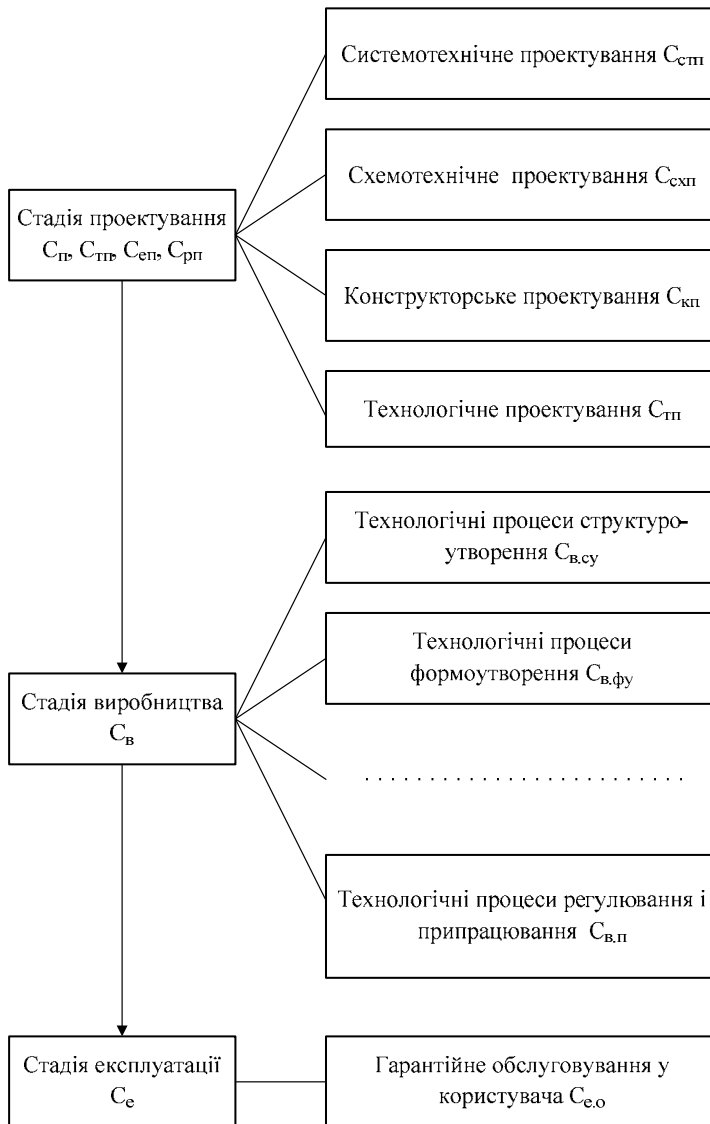


Рис. 6.1. Узагальнена структура процесу формування витрат із забезпечення якості під час проектування, виробництва та експлуатації РЕА

Підкреслимо, що тут йдеться про всі витрати заводу-виробника на виконання технологічних операцій за типовою, а отже, базовою технологією. За калькуляцією такі витрати визначаються вартістю обладнання, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, всіх видів енергії, заробітною платнею виконавців тощо.

До них належать також витрати, пов'язані з поліпшенням показників якості виробів завдяки використанню якісніших матеріалів, надійнішої елементної бази, досконалішого технологічного обладнання, ретельнішого і ефективнішого контролю.

Для кожної стадії життєвого циклу апаратури складають і постійно поновлюють програму робіт, зорієнтованих на підвищення якості та надійності виробів. Для прикладу наведено деякі з них.

Під час проектування виконують комплекс робіт, метою яких є забезпечення певних запасів працездатності й живучості у граничних і позаграничних умовах експлуатації. Це такі роботи:

- функціонально-логічне моделювання і аналіз працездатності схем у заданих умовах експлуатації;

- дослідження параметрів схем, встановлення допусків, аналіз надійності за раптовими і поступовими відмовами, оцінка чутливості параметрів схем до дії дестабілізуючих факторів;

- розрахунок і забезпечення міцності елементів конструкції, на які діють механічні фактори;

- визначення оптимальних режимів технологічних процесів виготовлення пристроїв, розроблення способів їх оптимального керування;

- обґрунтування напрямів підвищення ефективності контролю якості на всіх стадіях технологічного процесу за рахунок оптимального розміщення контрольних процедур і впровадження оптимальної глибини контролю.

У процесі виробництва РЕА комплекс заходів із забезпечення якості та надійності виробів передбачає виконання таких робіт:

- проведення ефективного вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів;

- збільшення точності виконання технологічних операцій;

- підвищення ефективності контролю і керування технологічними процесами, встановлення обґрунтованих виробничих допусків на вихідні параметри виробів;

- оптимізація технологічних і контрольних процедур.

На стадії експлуатації:

- регулярне проведення профілактичних робіт із встановленням оптимальних експлуатаційних запасів на вихідні параметри виробів;

- виконання ремонтних робіт з корекцією режимів для підвищення надійності виробів тощо.

Отже, програма робіт із забезпечення якості та надійності апаратури на стадіях проектування, виробництва і експлуатації синтезує цілі й принципи контролю і керування всім процесом її створення і використання. Вона об'єднує

роботу багатьох проектних і виробничих систем, націлює їх на розв'язання глобальної задачі забезпечення рівня якості та надійності виробів з раціональним використанням усіх видів ресурсів.

Ці процеси характеризуються великими економічними витратами, які описуються функціоналами з аргументами у вигляді множин показників якості та надійності виробів. Аналіз їх складових наведено в наступних підрозділах.

6.2. Моделювання витрат під час проведення проектно-конструкторських робіт

Складність моделювання проектно-конструкторських робіт під час створення нових радіоелектронних пристроїв визначається складністю їх узагальнення і формалізації. Ці роботи, переважно, не зв'язані якоюсь єдиною методикою. Їх виконання і задачі, які при цьому ставляться, щоразу відрізняються від попередніх і визначаються оригінальністю рішень, підвищеними вимогами до властивостей і параметрів майбутніх виробів, а також вимогами, зокрема економічними, до виробничих процесів їх виготовлення та експлуатації.

Процеси проектування характеризуються різномірною побудовою і вхідною інформацією у вигляді графіків, таблиць, рекомендацій, формул, методик проведення експериментів і аналізу результатів. Закономірності їх перебігу в узагальненому вигляді поки що не з'ясовано, а доцільність їх встановлення поки що взагалі не визначена. Сучасні системи автоматизованого проектування відрізняються повнотою, досконалістю і ефективністю алгоритмів і програм, а також загальною вартістю їх впровадження і практичного використання.

На основі цього далеко не повного переліку особливостей системотехнічного, схемотехнічного, конструкторського і технологічного проектування доводиться констатувати, що для розроблення і оптимізації цих процесів створення нової техніки і технології ще немає достатньої теоретичної бази. В цих умовах у комплексних моделях формування заданих властивостей виробів і економічних витрат, які супроводжують їх, на цій стадії їх життєвого циклу можна врахувати лише емпіричні зв'язки між дефектністю, спричиненою недоліками розробленої технічної документації і витратами на усунення дефектів під час виробництва та експлуатації виробів. Ці недоліки і дефекти є наслідком недосконалості проектних робіт.

Під час прогнозування вартості робіт, передбачених програмами проектування РЕА, доводиться орієнтуватися передовсім на апіорі встановлені закономірності зміни вартості проектування під час розроблення нових видів РЕА. Дослідження показують, що це можна зробити тільки на основі статис-

тики про витрати на проектування достатньо великої кількості раніше розроблених аналогічних пристроїв. Встановлення цих закономірностей пов'язано зі значними труднощами і потребує систематичних досліджень, які зводяться до порівняння витрат на кожну розробку з витратами прототипу і зіставлення поточних витрат з витратами базового варіанта. В результаті такого порівняння можна встановити числову відмінність між витратами на отримання базового варіанта пристрою і витратами на створення нового варіанта. Такий коефіцієнт в роботі умовно названо коефіцієнтом варіації витрат K , який під час формування показників якості на кожній стадії проектування і кожному кроці технологічного процесу набуває конкретного змісту.

Для визначення коефіцієнта варіації витрат виконують статистичний активний чи пасивний експеримент з використанням апарату кореляційного або регресійного аналізу.

Сумарні витрати на проектування C_{Π} в загальному вигляді визначаються залежністю

$$C_{\Pi} = K_{\Pi} C_{\Pi 6}, \quad (6.5)$$

де K_{Π} – адаптаційний коефіцієнт варіації витрат на стадії проектування; $C_{\Pi 6}$ – витрати на проектування базового варіанта.

Такий підхід до визначення витрат, пов'язаних з проектуванням виробів, передбачає зарахування кожного виду апаратури, що розробляється, до одного з класів, кожний з яких характеризується відповідним коефіцієнтом варіації витрат $K_{\Pi i}$. За його допомогою можна розрахувати ймовірні витрати на проведення проектних робіт. Варіантом такої класифікації є апаратура:

- стаціонарна – $K_{\Pi 1}$;
- побутова – $K_{\Pi 2}$;
- польова – $K_{\Pi 3}$;
- призначена для використання на наземних транспортних засобах – $K_{\Pi 4}$;
- на літальних апаратах – $K_{\Pi 5}$;
- призначена для роботи в морських умовах – $K_{\Pi 6}$ і т. д.

Зрозуміло, що значення коефіцієнтів $K_{\Pi i}$ можна отримати статистично, з урахуванням багаторічного досвіду розроблення нової техніки конкретними проектними організаціями.

Отже, сумарні витрати на забезпечення якості виробів на стадії проектування подають функцією:

$$C_{\Pi} = C_{\text{стп}} + C_{\text{сх.п}} + C_{\text{кп}} + C_{\text{тп}}. \quad (6.6)$$

Просте підсумовування складових витрат C_{Π} можливе і доцільне тільки за припущення про повну незалежність процесів системотехнічного, схемотехнічного, конструкційного і технологічного проектування. Це припущення здебільшого не є виправданим. Визначаючи раціональне співвідношення цих

витрат наскрізною оптимізацією всього процесу проектування і виробництва РЕА, необхідно враховувати їх взаємовпливи. Цей шлях визначення сумарних витрат набагато складніший, недостатньо висвітлений в науково-технічній літературі і тому реалізується здебільшого на підставі евристичних міркувань.

6.3. Математичне моделювання виробничих витрат

Виготовлення радіоелектронної апаратури є складним процесом, який характеризується багатьма цільовими функціями. Це насамперед формування заданих властивостей виробів, які повинні забезпечити виконання ними під час експлуатації поставлених завдань. Крім того, у процесі виробництва постійно здійснюють контроль технологічних процедур, контроль якості виробів, прогнозування їх надійності, моделювання і оптимізацію технологічного процесу загалом. Найбільш трудомісткими серед них є процеси структуро- і формотворення, нанесення покриттів, збирання та монтаж, настроювання і випробування, а також проведення значних обсягів контрольних процедур, щоб досягти потрібних показників якості готової продукції. Для забезпечення ефективності виробництва загалом ці витрати повинні бути виправданими й оптимізованими, що можна забезпечити використанням відповідних математичних моделей. На них витрачається найбільша кількість різноманітних ресурсів. Керування такими процесами зводиться переважно до забезпечення потрібного рівня технологічного обладнання, використання відповідних матеріальних ресурсів, залучення персоналу високої кваліфікації. Розвиток сучасної технології як науки йде шляхом вирішення комплексу проблем, головні з яких – вивчення і встановлення закономірностей перебігу технологічних процесів, виявлення найефективніших факторів підвищення якості виробів та інтенсифікація виробництва. Саме на цій основі розробляють і впроваджують на підприємствах нову прогресивну технологію.

Кількісно витрати C_v на формування заданих властивостей виробів за допомогою відповідних технологічних процесів подають рівнянням:

$$C_v = N \sum_{i=1}^m K_i C_{vi}, \quad (6.7)$$

де C_{vi} – середні витрати на формування i -ї властивості або параметра виробу з використанням базової технології і обладнання; K_i – коефіцієнт варіації витрат на формування заданої i -ї властивості виробу.

Контроль окремих пристроїв та систем в умовах серійного виробництва – це складний процес, який може мати різні цілі. Найчастіше це оцінка якості

продукції, діагностика, прогнозування, ідентифікація тощо, мета яких – виявити та ліквідувати дефекти і несправності деталей та складних одиниць, а також з'ясувати потенційні джерела відмов та оптимізації контролю. Якість оцінюють за допомогою всебічного контролю на різних етапах виготовлення продукції – під час вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, структуро- і формоутворення, проведення операцій збирання, монтажу, регулювання тощо. Контроль є суцільним (стовідсотковим) або вибірковим, здійснюється на кожному кроці технологічного процесу або після групи технологічних операцій. Від вибору варіанта контролю залежить ефективність процесу забезпечення якості продукції загалом.

Критерієм ефективності можуть бути витрати, спричинені дефектами виробництва, які виявляють у ході виготовлення продукції та під час її експлуатації. Мінімізація може слугувати основою оптимізації процесу забезпечення якості виробів, що випускаються. Сьогодні вибір того чи іншого варіанта контролю проводиться інтуїтивно, без достатнього техніко-економічного аналізу, що супроводжується великими економічними витратами. Оцінити ефективність контролю, а також оптимізувати його можливо на основі статистичного моделювання процесу забезпечення і контролю якості виробів під час їх виготовлення та експлуатації.

Імовірнісну модель формування витрат, спричинених дефектами виготовлення, можна отримати з урахуванням структури технологічного процесу. Процес серійного виробництва продукції розглядається як деяка послідовність кроків, кожен з яких призначений для забезпечення відповідного показника якості виробу. Нагадаємо, що крок складається з операції формування якості (TO_i) та операції контролю якості (KO_i). Враховуючи випадковий характер параметрів технологічного процесу і отриманих при цьому оцінок показників якості продукції, узагальненою імовірнісною характеристикою якості k -го кроку прийнято імовірність виконання задачі $P_{в.з.к}$.

$$P_{в.з.к} = P_k(X \in \{X^D\}). \quad (6.8)$$

При цьому оптимальний процес здебільшого характеризується умовами:

$$P_{в.з.к} \geq P_{в.з.к}^n \quad \text{і} \quad C_k = \min C_k, \quad (6.9)$$

де X – показник, що характеризує якість виробу; $\{X^D\}$ – множина допустимих значень показників якості; $P_{в.з.к}^n$ – потрібне значення імовірності виконання задачі на k -му кроці технологічного процесу; C_k – сумарні витрати на проведення технологічних і контрольних процедур, а також спричинені дефектами виробництва на k -му кроці технологічного процесу.

Внаслідок недосконалості технології виготовлення і технології контролю якості на кожному кроці технологічного процесу можуть відбуватися події вводу дефектів, а також пропускання дефектних виробів на наступні операції. Останнє визначається передусім вибраним варіантом контролю, кваліфікацією контролюючого персоналу, точністю і надійністю вимірювальних засобів.

Оцінками цих подій є:

$P_{в.к} = P\{(x_k < X_{н.к}^D) \cup (x_k > X_{в.к}^D)\}$ – імовірність вводу дефекту у виріб за x_k

параметром на k -му кроці технологічного процесу, $k = \overline{1, n}$, n – кількість кроків;

$X_{н.к}^D$ і $X_{в.к}^D$ – нижня і верхня границі допуску;

$P_{в.к}$ – імовірність виявлення дефекту на k -му кроці технологічного процесу, що є умовною імовірністю виявлення дефекту, якщо його введено у виріб з імовірністю $P_{в.к}$;

P_k – імовірність правильного контролю якості виробу після проведення k -ї операції;

$P_{пр.к}$ – імовірність пропуску дефекту з k -го кроку технологічного процесу через недостатньо достовірний контроль.

На етапі експлуатації виробів відповідними оцінками є $P_{в.е}$, P_e , $P_{пр.е}$.

Отже, сумарні виробничі витрати на забезпечення потрібного рівня якості виробів – $C_{в\Sigma}$ являють собою суму витрат, пов'язаних з їх виготовленням – $C_{в}$, проведенням комплексу контрольних процедур – $C_{кон}$, виявленням і усуненням допущених дефектів – C_k , а також витрат, зумовлених запланованими роботами на гарантійне обслуговування, і витрат, пов'язаних з відмовами РЕА під час експлуатації – C_e , спричиненими виробничими дефектами. Узагальнено сумарні витрати C_{Σ} описуються адитивною функцією вигляду:

$$C_{в\Sigma} = C_{в}(C_{в.к,i}, K_{в.к,i}) + C_{кон}(C_{кон.к,i}, \alpha_{к,i}) + C_k(C_{к.к,i}, P_{в.я.к,i}) + C_e(C_{е,i}, P_{в.я.е,i}), \quad (6.10)$$

де $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, n}$ – відповідно номер кроку технологічного процесу і номер показника якості (параметра виробу), який формується на цьому кроці; $C_{в.к,i}$ – витрати на формування i -го параметра; $K_{в.к,i}$ – коефіцієнт варіації витрат; $C_{кон.к,i}$ – витрати на проведення контролю якості формування i -го параметра; $\alpha_{к,i}$ – показник глибини контролю; $C_{к.к,i}$ – витрати, пов'язані з забракуванням виробу за i -м параметром; $C_{е,i}$ – витрати, пов'язані з відмовою виробу під час експлуатації; $P_{в.я.к,i}$ – імовірність виявлення браку i -го параметра; $P_{в.я.е,i}$ – імовірність виявлення відмови виробу під час експлуатації.

Використовуючи ці позначення, етапи технологічного процесу подамо з використанням залежностей:

перший крок технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{\text{деф.1}} &= P_{\text{пр.0}} + (1 - P_{\text{пр.0}}) P_{\text{в.1}} \\ P_{\text{вя.1}} &= P_{\text{деф.1}} P_1 \\ P_{\text{пр.1}} &= P_{\text{деф.1}}(1 - P_1) \end{aligned} \quad (6.11)$$

другий крок технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{\text{деф.2}} &= P_{\text{пр.1}} + (1 - P_{\text{пр.1}}) P_{\text{в.2}} \\ P_{\text{вя.2}} &= P_{\text{деф.2}} P_2 \\ P_{\text{пр.2}} &= P_{\text{деф.2}}(1 - P_2) \end{aligned} \quad (6.12)$$

.....

n -й крок технологічного процесу:

$$\begin{aligned} P_{\text{деф. n}} &= P_{\text{пр. n-1}} + (1 - P_{\text{пр. n-1}}) P_{\text{в. n}} \\ P_{\text{вя. n}} &= P_{\text{деф. n}} P_n \\ P_{\text{пр. n}} &= P_{\text{деф. n}}(1 - P_n) \end{aligned} \quad (6.13)$$

етап експлуатації:

$$P_{\text{вя. e}} = P_{\text{пр. n}} = P_{\text{деф. n}}(1 - P_n). \quad (6.14)$$

Якщо під час виготовлення виробів використовуються необоротні технологічні процеси, що характерно для складних видів виробництва, таких як приладобудування, електровакуумне приладобудування, мікроелектроніка тощо, то у сукупності виявлених дефектів розрізняють дефекти усувні та неусувні. Останні приводять до повного забракування і списання виробу. У цих випадках імовірність введення, виявлення і пропуску дефектів, а також середні питомі витрати позначаються індексами; $\delta_{\text{у}}$ – брак усувний і $\delta_{\text{о}}$ – брак остаточний. При цьому k -й крок технологічного процесу характеризується рівняннями:

$$\begin{aligned} P_{\text{вя.к}}^{\delta_{\text{у}}} &= \left[P_{\text{пр.к-1}} + (1 - P_{\text{пр.к-1}}) P_{\text{в.к}}^{\delta_{\text{у}}} \right] P_{\text{к}} ; \\ P_{\text{вя.к}}^{\delta_{\text{о}}} &= \left[P_{\text{пр.к-1}} + (1 - P_{\text{пр.к-1}}) P_{\text{в.к}}^{\delta_{\text{о}}} \right] P_{\text{к}} ; \\ P_{\text{пр.к}}^{\delta_{\text{у}}} &= \left[P_{\text{пр.к-1}} + (1 - P_{\text{пр.к-1}}) P_{\text{в.к}}^{\delta_{\text{у}}} \right] (1 - P_{\text{к}}) ; \\ P_{\text{пр.к}}^{\delta_{\text{о}}} &= \left[P_{\text{пр.к-1}} + (1 - P_{\text{пр.к-1}}) P_{\text{в.к}}^{\delta_{\text{о}}} \right] (1 - P_{\text{к}}) ; \end{aligned} \quad (6.15)$$

Якщо в технологічному процесі є неусувні дефекти, слід враховувати зменшення кількості виробів у ході виробництва за рахунок вилучення частини бракованих виробів:

$$\begin{aligned} N_1 &> N_2 > \dots > N_k > \dots > N_{n-1} > N_n \\ N_n &= N_1 \prod_{k=1}^n \{1 - [P_{\text{пр.к-1}} + (1 - P_{\text{пр.к-1}}) P_{\text{в.к}}^{\delta_{\text{о}}}] P_{\text{к}}\}, \end{aligned} \quad (6.16)$$

де N_1, \dots, N_n – кількість виробів, що надходять на перший і n -й крок технологічного процесу.

Отже, формула сумарних витрат, викликаних усувними дефектами виробництва, а також вартістю повністю забракованих виробів у разі виявлення в кожному з них як мінімум одного неусувного дефекту, набуває вигляду:

$$C = N_1(P_{\text{вя.1}}^{\text{б.у}} C_1^{\text{б.у}} + P_{\text{вя.1}}^{\text{б.о}} C_1^{\text{б.о}}) + N_2(P_{\text{вя.2}}^{\text{б.у}} C_2^{\text{б.у}} + P_{\text{вя.2}}^{\text{б.о}} C_2^{\text{б.о}}) + \dots \quad (6.17)$$

$$\dots + N_n(P_{\text{вя.н}}^{\text{б.у}} C_n^{\text{б.у}} + P_{\text{вя.н}}^{\text{б.о}} C_n^{\text{б.о}}) + N_n(P_{\text{пр.н}}^{\text{б.у}} C_e^{\text{б.у}} + P_{\text{пр.н}}^{\text{б.о}} C_e^{\text{б.о}}).$$

Спрощена математична модель сумарних виробничих витрат на забезпечення показників якості РЕА в загальному вигляді описується рівнянням:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{су.1,1}} K_{\text{су.1,1}} + C_{\text{су.2,2}} K_{\text{су.2,2}} + \dots + C_{\text{су.н,н}} K_{\text{су.н,н}} +$$

$$+ C_{\text{фу.1,1}} K_{\text{фу.1,1}} + C_{\text{фу.2,2}} K_{\text{фу.2,2}} + \dots + C_{\text{фу.н,н}} K_{\text{фу.н,н}} +$$

$$+ C_{\text{з.1,1}} K_{\text{з.1,1}} + C_{\text{з.2,2}} K_{\text{з.2,2}} + \dots + C_{\text{з.н,н}} K_{\text{з.н,н}} + \quad (6.18)$$

$$+ C_{\text{м.1,1}} K_{\text{м.1,1}} + C_{\text{м.2,2}} K_{\text{м.2,2}} + \dots + C_{\text{м.н,н}} K_{\text{м.н,н}} +$$

$$+ C_{\text{р.1,1}} K_{\text{р.1,1}} + C_{\text{р.2,2}} K_{\text{р.2,2}} + \dots + C_{\text{р.н,н}} K_{\text{р.н,н}} +$$

$$+ C_{\text{тп.1,1}} K_{\text{тп.1,1}} + C_{\text{тп.2,2}} K_{\text{тп.2,2}} + \dots + C_{\text{тп.н,н}} K_{\text{тп.н,н}} +$$

$$+ C_{\text{кон.су.1,1}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{су.1,1}}) + C_{\text{кон.су.2,2}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{су.2,2}}) + \dots + C_{\text{кон.су.н,н}}(\mathfrak{a}_{\text{су.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{кон.фу.1,1}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{фу.1,1}}) + C_{\text{кон.фу.2,2}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{фу.2,2}}) + \dots + C_{\text{кон.фу.н,н}}(\mathfrak{a}_{\text{фу.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{кон.з.1,1}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{з.1,1}}) + C_{\text{кон.з.2,2}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{з.2,2}}) + \dots + C_{\text{кон.з.н,н}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{з.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{кон.м.1,1}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{м.1,1}}) + C_{\text{кон.м.2,2}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{м.2,2}}) + \dots + C_{\text{кон.м.н,н}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{м.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{кон.р.1,1}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{р.1,1}}) + C_{\text{кон.р.2,2}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{р.2,2}}) + \dots + C_{\text{кон.р.н,н}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{р.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{кон.тп.1,1}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.1,1}}) + C_{\text{кон.тп.2,2}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.2,2}}) + \dots + C_{\text{кон.тп.н,н}} K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{к.су.1,1}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{су.1,1}}) + C_{\text{к.су.2,2}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{су.2,2}}) + \dots + C_{\text{к.су.н,н}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{су.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{к.фу.1,1}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{к.фу.1,1}}) + C_{\text{к.фу.2,2}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{к.фу.2,2}}) + \dots + C_{\text{к.фу.н,н}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{к.фу.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{к.з.1,1}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{з.1,1}}) + C_{\text{к.з.2,2}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{з.2,2}}) + \dots + C_{\text{к.з.н,н}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{з.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{к.м.1,1}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{м.1,1}}) + C_{\text{к.м.2,2}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{м.2,2}}) + \dots + C_{\text{к.м.н,н}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{м.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{к.р.1,1}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{р.1,1}}) + C_{\text{к.р.2,2}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{р.2,2}}) + \dots + C_{\text{к.р.н,н}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{р.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{к.тп.1,1}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.1,1}}) + C_{\text{к.тп.2,2}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.2,2}}) + \dots + C_{\text{к.тп.н,н}} K_{\text{к}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{е.су.1,1}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{су.1,1}}) + C_{\text{е.су.2,2}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{су.2,2}}) + \dots + C_{\text{е.су.н,н}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{су.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{е.фу.1,1}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{фу.1,1}}) + C_{\text{е.фу.2,2}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{фу.2,2}}) + \dots + C_{\text{е.фу.н,н}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{фу.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{е.з.1,1}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{з.1,1}}) + C_{\text{е.з.2,2}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{з.2,2}}) + \dots + C_{\text{е.з.н,н}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{з.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{е.м.1,1}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{м.1,1}}) + C_{\text{е.м.2,2}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{м.2,2}}) + \dots + C_{\text{е.м.н,н}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{м.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{е.р.1,1}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{р.1,1}}) + C_{\text{е.р.2,2}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{р.2,2}}) + \dots + C_{\text{е.р.н,н}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{р.н,н}}) +$$

$$+ C_{\text{е.тп.1,1}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.1,1}}) + C_{\text{е.тп.2,2}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.2,2}}) + \dots + C_{\text{е.тп.н,н}} K_{\text{е}}(\mathfrak{a}_{\text{тп.н,н}}).$$

У цьому рівнянні $C_{\text{су}}$, $C_{\text{фу}}$, $C_{\text{з}}$, $C_{\text{м}}$, $C_{\text{р}}$, $C_{\text{тп}}$ – середні витрати на проведення операцій структуроутворення, формоутворення, збирання, монтажу, регулювання та технологічного припрацювання; $K_{\text{су}}$, $K_{\text{фу}}$, $K_{\text{з}}$, $K_{\text{м}}$, $K_{\text{р}}$, $K_{\text{тп}}$ – коефіцієнти варіації витрат на проведення перелічених операцій; $C_{\text{кон.су}}$, $C_{\text{кон.фу}}$, $C_{\text{кон.з}}$, $C_{\text{кон.м}}$, $C_{\text{кон.р}}$, $C_{\text{кон.тп}}$ – середні витрати на проведення контрольних операцій; $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{су}})$, $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{фу}})$, $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{з}})$, $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{м}})$, $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{р}})$, $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a}_{\text{тп}})$ – коефіцієнти варіації витрат на

проведення відповідних контрольних операцій; $C_{к.су}$, $C_{к.фу}$, $C_{к.з}$, $C_{к.м}$, $C_{к.р}$, $C_{к.тп}$ – середні витрати, пов’язані з остаточними неусувними і усувними дефектами виробництва; $K_{к}(æ_{су})$, $K_{к}(æ_{фу})$, $K_{к}(æ_{з})$, $K_{к}(æ_{м})$, $K_{к}(æ_{р})$, $K_{к}(æ_{тп})$ – коефіцієнти варіації витрат, пов’язаних з результатами контролю; $C_{е.су}$, $C_{е.фу}$, $C_{е.з}$, $C_{е.м}$, $C_{е.р}$, $C_{е.тп}$ – витрати, пов’язані з відмовами апаратури в процесі експлуатації, викликані дефектами виробництва; $K_{е}(æ_{су})$, $K_{е}(æ_{фу})$, $K_{е}(æ_{з})$, $K_{е}(æ_{м})$, $K_{е}(æ_{р})$, $K_{е}(æ_{тп})$ – коефіцієнти варіації витрат на стадії експлуатації.

Характер залежностей сумарних витрат на забезпечення якості C_{Σ} і їх складових від показників глибини контролю ω проілюстровано на рис. 6.2.

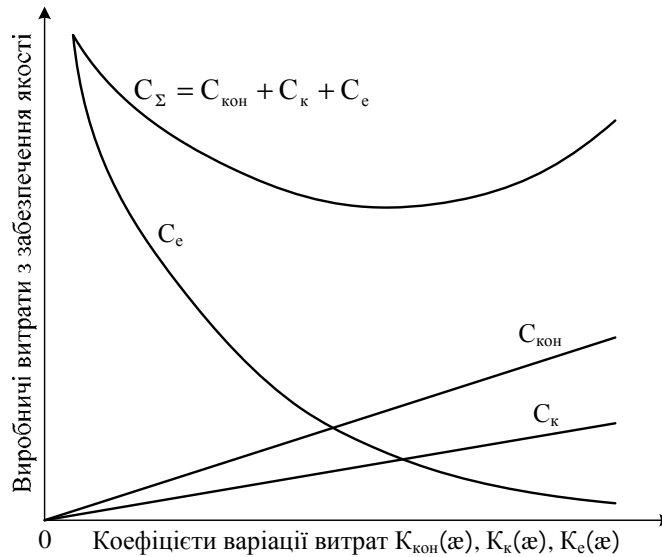


Рис. 6.2. Залежність сумарних витрат C_{Σ} від показників глибини контролю ω у процесі виробництва

Дві складові сумарних витрат C_{Σ} на забезпечення якості під час виробництва і експлуатації РЕА, тобто складові $C_{кон}$ і $C_{к}$, належать до “зовнішніх” виробничих витрат. Вони виникають під час проведення операцій контролю якості, а також під час виявлення і оперативного усунення браку. Характеризуються зростаючою не обов’язково лінійною залежністю від глибини контролю ω .

Складова $C_{е}$ є “зовнішніми” витратами виробника, пов’язаними з дефектами виробництва, які проявляються на стадії експлуатації виробів у замовника. Спадна залежність цих витрат від показника ω разом зі зростаючими витратами $C_{кон}$ і $C_{к}$, як видно з рисунка, створюють можливість мінімізації сумарних витрат C_{Σ} шляхом оптимізації співвідношення складових.

У рівнянні (6.18) коефіцієнти $K_{\text{кон}}(\mathfrak{a})$, $K_k(\mathfrak{a})$, $K_e(\mathfrak{a})$ мають наступний зміст.

Витрати, пов'язані з проведенням контрольних процедур на k -му кроці технологічного процесу:

$$C_{\text{кон.к}} = C_{\text{кон.сер.к}} a_k P_k ; \text{ при } P_k = 1 - \exp\{-\epsilon \mathfrak{a}_k\}$$

або

$$C_{\text{кон.к}} = C_{\text{кон.сер.к}} K_{\text{кон.к}} , \text{ де } K_{\text{кон.к}}(\mathfrak{a}_k) = a P_k . \quad (6.19)$$

Витрати, пов'язані з усуненням виявлених дефектів або з остаточним забракуванням виробу:

$$C_k = C_{\text{к.сер.к}} \cdot K_{\text{к.к}}(\mathfrak{a}_k) \text{ де } K_{\text{к.к}}(\mathfrak{a}_k) = P_{\text{деф.к}} C [1 - \exp\{-d \mathfrak{a}_k\}]. \quad (6.20)$$

За умови, що виробничі дефекти, пропущені з останнього кроку технологічного процесу на стадію експлуатації, є рівновагомими причинами відмов апаратури, сумарні витрати її виробника C_e описуються залежністю:

$$C_e \approx C_{\text{е.сер}} a_e P_{\text{пр.н}} \quad (6.21)$$

або

$$C_e \approx C_{\text{е.сер}} K_e(\mathfrak{a}), \quad (6.22)$$

де $C_{\text{е.сер}}$ – середнє значення витрат на ремонт апаратури; a_e – адаптаційний коефіцієнт;

$$K_e(\mathfrak{a}) = P_{\text{деф.н}} [1 - P(\mathfrak{a}_n)], \quad (6.23)$$

де $P_{\text{пр.н}}$ – імовірність пропуску виробничих дефектів на стадію експлуатації, яка визначається сумою:

$$P_{\text{пр.н}} = P_{\text{пр.н,н}} \oplus P_{\text{пр.н,н-1}} \oplus P_{\text{пр.н,н-2}} \oplus \dots \oplus P_{\text{н,2}} \oplus P_{\text{н,1}} ,$$

де \oplus – знак імовірнісного підсумовування.

За умови сумісності вказаних подій

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.н}} = & P_{\text{пр.н,н}} + P_{\text{пр.н,н-1}} + P_{\text{пр.н,н-2}} + \dots + P_{\text{пр.н,2}} + P_{\text{пр.н,1}} - \\ & - P_{\text{пр.н,н}} P_{\text{пр.н,н-1}} - P_{\text{пр.н,н}} P_{\text{пр.н,н-2}} - \dots - P_{\text{пр.н,н}} P_{\text{пр.н,2}} \\ & - P_{\text{пр.н,н}} P_{\text{пр.н,1}} + P_{\text{пр.н,н}} P_{\text{пр.н,н-1}} P_{\text{пр.н,н-2}} + \dots \\ & \dots + P_{\text{пр.н,3}} P_{\text{пр.н,2}} P_{\text{пр.н,1}} + (1)^n P_{\text{пр.н,н}} P_{\text{пр.н,н-1}} \dots P_{\text{пр.н,2}} P_{\text{пр.н,1}}. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Наведена модель сумарних виробничих витрат є громіздкою багато-параметричною залежністю. Складність таких моделей, отриманих для повних реальних технологічних процесів, що містять сотні кроків, через рекурентність імовірностей $P_{\text{пр.к,i}}$ і $P_{\text{в.к,i}}$ надмірно зростає і користуватись ними стає практично неможливо. Вони є незручними і при діалоговій роботі з ЕОМ. Описаний далі метод базується на використанні матричного зображення розподілу дефектів у ході виробництва і параметрів потоків дефектів з урахуванням їх ущільнення та розрідження під впливом технологічних і контрольних процедур. Зображення моделей в матричному вигляді не має вказаних вище недоліків.

6.4. Матричні моделі витрат на забезпечення якості на стадіях життєвого циклу РЕА

Представлення функції $C_{\Sigma B}$ у матричному вигляді забезпечує їй компактність і полегшує процедуру моделювання загалом. При цьому спрощується також порівняльний аналіз значущості окремих кроків технологічних процесів з погляду ефективності формування властивостей виробів і виникнення витрат, що має важливе значення для вибору раціональної стратегії оптимізації виробництва.

Матриці величин, які входять у рівняння (6.18), характеризуються числом n і можуть мати вигляд стовпчикових, діагональних, трикутних, квадратних, якщо $m = n$ (n – кількість параметрів виробу) або прямокутних при $m > n$ матриць. Умова $m > n$ відповідає випадку, коли один параметр виробу формується на двох або більше кроках технологічного процесу, що характерно для виробництва складної апаратури. Враховуючи, що між цими варіантами немає принципової відмінності, розглянемо всі матриці, окрім стовпчикових та діагональних, як квадратні.

Значення величин $C_{B,K,i}$, $K_{B,K,i}$, $C_{\text{кон},K,i}$, $\alpha_{K,i}$, $C_{K,K,i}$ і $P_{\text{вя},K,i}$ визначаються умовами:

$$C_{B,K,i}, K_{B,K,i}, C_{\text{кон},K,i}, \alpha_{K,i} = \begin{cases} \neq 0, & \text{якщо } k = i \\ 0, & \text{якщо } k \neq i \end{cases} \quad (6.25)$$

$$C_{K,K,i}, P_{\text{вя},K,i} = \begin{cases} \neq 0, & \text{якщо } k \geq i \\ 0, & \text{якщо } k < i \end{cases} \quad (6.26)$$

Громіздкість моделей типу (6.18) можна суттєво зменшити, а зручність користування ними відповідно збільшити, подавши ці величини у матричному вигляді. Тоді матриці C_B , K_B , $C_{\text{кон}}$ і α представляються матрицями діагонального вигляду:

$$\begin{aligned} C_B &= \text{diag} \parallel C_{B,1,1}, C_{B,2,2}, \dots, C_{B,n,n} \parallel; \\ K_B &= \text{diag} \parallel K_{B,1,1}, K_{B,2,2}, \dots, K_{B,n,n} \parallel; \\ C_{\text{кон}} &= \text{diag} \parallel C_{\text{кон},1,1}, C_{\text{кон},2,2}, \dots, C_{\text{кон},n,n} \parallel; \\ \alpha &= \text{diag} \parallel \alpha_{1,1}, \alpha_{2,2}, \dots, \alpha_{n,n} \parallel, \end{aligned} \quad (6.27)$$

матриці C_K і $P_{\text{вя}}$ набувають верхньотрикутного вигляду:

$$C_K = \begin{pmatrix} C_{K,1,1} & C_{K,2,1} & \dots & C_{K,n,1} \\ 0 & C_{K,2,2} & \dots & C_{K,n,2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & C_{K,n,n} \end{pmatrix}; P_{\text{вя}} = \begin{pmatrix} P_{\text{вя},1,1} & P_{\text{вя},2,1} & \dots & P_{\text{вя},n,1} \\ 0 & P_{\text{вя},2,2} & \dots & P_{\text{вя},n,2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{\text{вя},n,n} \end{pmatrix}, \quad (6.28)$$

а матриці C_e і $P_{в.е}$ – вигляду стовпцевих матриць:

$$C_e = \left\| C_{e,1}, C_{e,2}, \dots, C_{e,n} \right\|^T, \quad (6.29)$$

$$P_{в.е} = \left\| P_{в.е,1}, P_{в.е,2}, \dots, P_{в.е,n} \right\|^T. \quad (6.30)$$

Матриці $P_{пр}$, P_v і P також мають верхньотрикутну структуру. Кожний їх елемент у межах k -го кроку технологічного процесу визначає відповідно імовірності пропуску і введення дефектів, а також імовірність правильного контролю якості:

$$P_{пр} = \left\| \begin{array}{cccc} P_{пр,01} & P_{пр,11} & \dots & P_{пр,m-1,1} \\ \cdot & P_{пр,21} & \dots & P_{пр,m-1,2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{пр,m-1,m} \end{array} \right\|; \quad (6.31)$$

$$P_v = \left\| \begin{array}{cccc} P_{в,11} & P_{в,21} & \dots & P_{в,m1} \\ \cdot & P_{в,22} & \dots & P_{в,m2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{в,mm} \end{array} \right\| \quad (6.32)$$

$$P = \left\| \begin{array}{cccc} P_{11} & P_{21} & \dots & P_{m1} \\ \cdot & P_{22} & \dots & P_{m2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & P_{mm} \end{array} \right\|; \quad (6.33)$$

Елементи цих матриць можуть задаватись або визначатись за допомогою залежностей:

$$\begin{aligned} P_{пр, k,i} &= f(P_{пр, k-1,i}, P_{в, k,i}, P_{k,i}); \\ P_{в, k,i} &= \varphi(P_{в, k,k}, P_{в, k,i}(i)); \\ P_{в, k,i} &= \psi(P_{к,k}(\mathbf{x}), P_k(i)). \end{aligned} \quad (6.34)$$

Матриця \mathbf{x} є матрицею керування, її елементи або випадково, або цілеспрямовано змінюються у процесі пошуку оптимального варіанта контролю для оптимізації конкретного технологічного процесу.

Враховуючи рекурентність залежності (6.34), матрицю (6.31) слід розглядати у вигляді

$$P_{\text{пр}} = \begin{pmatrix} P_{\text{пр.0,1}} & P_{\text{пр.1,1}}(\mathbf{x}_{1,1}) & P_{\text{пр.2,1}}(\mathbf{x}_{1,1}, \mathbf{x}_{2,1}) & \dots & P_{\text{пр.m-1,1}}(\mathbf{x}_{1,1}, \mathbf{x}_{2,1}, \dots, \mathbf{x}_{m-1,1}) \\ 0 & P_{1,2} & P_{\text{пр.2,2}}(\mathbf{x}_{2,2}) & \dots & P_{\text{пр.m-1,2}}(\mathbf{x}_{2,2}, \mathbf{x}_{3,2}, \dots, \mathbf{x}_{m-1,2}) \\ 0 & \cdot & P_{\text{пр.2,3}} & \dots & P_{\text{пр.m-1,3}}(\mathbf{x}_{3,3}, \mathbf{x}_{4,3}, \dots, \mathbf{x}_{m-1,3}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{\text{пр.m-1,n}}(\mathbf{x}_{m-1,n}) \end{pmatrix}. \quad (6.35)$$

Пропущені дефекти виробництва зумовлюють витрати на їх виправлення в процесі гарантійного обслуговування. Сумарне значення імовірності пропуску дефектів з m -го кроку визначається матрицею-стовпчиком

$$P_{\text{пр.m}} = [P_{\text{пр.m1}}, P_{\text{пр.m2}}, \dots, P_{\text{пр.mn}}]^T. \quad (6.36)$$

Імовірність виявлених дефектів на стадії експлуатації $P_{\text{вя.ei}}$ знаходять з рівняння

$$P_{\text{вя.ei}} = a P_{\text{пр.mi}}, \quad (6.37)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, що визначає частку пропущених дефектів, які виявляються під час експлуатації;

$P_{\text{пр.mi}}$ – значення імовірності пропуску дефектів з m -го кроку технологічного процесу.

Раніше зазначалося, що оптимізувати процеси серійного виробництва РЕА, як і інших видів електронних пристроїв, можна за різними принципами. Ці принципи здебільшого визначаються вимогами до якості продукції та можливостями підприємств. Доволі часто проектування процесів виробництва нової техніки характеризується тим, що параметри технології, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів і технологічного обладнання задають, а параметри контролю (розміщення контрольних точок по ходу технологічного процесу, встановлення контрольованих параметрів, глибини контролю тощо) доводиться визначати в процесі оптимізації. На ці параметри накладають певні обмеження і в цих ситуаціях право вибору конкретних рішень залишається за дослідником, що працює в режимі діалогу з ЕЦОМ.

Для спрощення всієї підсистеми контролю, скорочення виробничих площ, чисельності персоналу і найефективнішого використання контрольованого облад-

нання процедури контролю нарощуються на одних стадіях технологічного процесу і послаблюються або повністю виключаються на інших. У багатокрокових технологічних процесах, характерних для виробництва РЕА, варіантів розміщення контролю за таким принципом може бути дуже багато. В таких випадках вказати машині ті стадії технологічного процесу, де контроль доцільно ввести, а де ні, можна за допомогою булевої матриці \mathbf{B} з елементами b_{kk} , які дорівнюють 0 або 1. Це діагональна матриця вигляду:

$$\mathbf{B} = \text{diag}[b_{11}, b_{22}, \dots, b_{mn}]. \quad (6.38)$$

При цьому наскрізна математична модель сумарних виробничих витрат із забезпечення якості виробів у процесі виробництва, побудована з використанням скалярного добутку матриць, набуде такого вигляду:

$$\mathbf{C}_{\Sigma} = (\mathbf{C}_B, \mathbf{K}_B) + (\mathbf{B}, \mathbf{x}, \mathbf{C}_{\text{кон}}) + (\mathbf{C}_K, \mathbf{P}_{\text{вя}}) + (\mathbf{C}_e, \mathbf{P}_{\text{вя.е}}), \quad (6.39)$$

де $(\mathbf{C}_B, \mathbf{K}_B), \dots, (\mathbf{C}_e, \mathbf{P}_{\text{вя.е}})$ – скалярні добутки відповідних матриць, які визначаються за правилом:

$$(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_m) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \alpha_{k,i}^{(1)} \alpha_{k,i}^{(2)} \dots \alpha_{k,i}^{(m)}, \quad (6.40)$$

де $(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_m)$ – скалярний добуток матриць, у якому

$$\mathbf{A}_j = \|\alpha_{k,i}^{(j)}\|, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (6.41)$$

У формулі (6.38) \mathbf{B} – булева діагональна матриця

$$\mathbf{B} = \text{diag}\|b_{1,1}, b_{2,2}, \dots, b_{n,n}\|. \quad (6.42)$$

Математична модель сумарних витрат для типової структури процесу забезпечення якості на стадіях проектування, виробництва і експлуатації РЕА має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\Sigma} = & (\mathbf{K}_{\text{схп}}, \mathbf{C}_{\text{схп}}) + (\mathbf{K}_{\text{стп}}, \mathbf{C}_{\text{стп}}) + (\mathbf{K}_{\text{кп}}, \mathbf{C}_{\text{кп}}) + (\mathbf{K}_{\text{тп}}, \mathbf{C}_{\text{тп}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{су}}, \mathbf{C}_{\text{су}}) + (\mathbf{K}_{\text{фу}}, \mathbf{C}_{\text{фу}}) + (\mathbf{K}_{\text{с}}, \mathbf{C}_{\text{с}}) + (\mathbf{K}_{\text{м}}, \mathbf{C}_{\text{м}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{р}}, \mathbf{C}_{\text{р}}) + (\mathbf{K}_{\text{тп}}, \mathbf{C}_{\text{тп}}) + (\mathbf{K}_{\text{кон.су}}, \mathbf{V}_{\text{су}}, \boldsymbol{\theta}_{\text{су}}, \mathbf{C}_{\text{кон.су}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{кон.фу}}, \mathbf{V}_{\text{фу}}, \boldsymbol{\theta}_{\text{фу}}, \mathbf{C}_{\text{кон.фу}}) + (\mathbf{K}_{\text{кон.с}}, \mathbf{V}_{\text{с}}, \boldsymbol{\theta}_{\text{с}}, \mathbf{C}_{\text{кон.с}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{кон.м}}, \mathbf{V}_{\text{м}}, \boldsymbol{\theta}_{\text{м}}, \mathbf{C}_{\text{кон.м}}) + (\mathbf{K}_{\text{кон.р}}, \mathbf{V}_{\text{р}}, \boldsymbol{\theta}_{\text{р}}, \mathbf{C}_{\text{кон.р}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{кон.тп}}, \mathbf{V}_{\text{тп}}, \boldsymbol{\theta}_{\text{тп}}, \mathbf{C}_{\text{кон.тп}}) + (\mathbf{K}_{\text{к.су}}, \mathbf{C}_{\text{к.су}}, \mathbf{P}_{\text{вя.су}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{к.фу}}, \mathbf{C}_{\text{к.фу}}, \mathbf{P}_{\text{вя.фу}}) + (\mathbf{K}_{\text{к.с}}, \mathbf{C}_{\text{к.с}}, \mathbf{P}_{\text{вя.с}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{к.м}}, \mathbf{C}_{\text{к.м}}, \mathbf{P}_{\text{вя.м}}) + (\mathbf{K}_{\text{к.р}}, \mathbf{C}_{\text{к.р}}, \mathbf{P}_{\text{вя.р}}) + (\mathbf{K}_{\text{к.тп}}, \mathbf{C}_{\text{к.тп}}, \mathbf{P}_{\text{вя.тп}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{е.схп}}, \mathbf{C}_{\text{е.схп}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.схп}}) + (\mathbf{K}_{\text{е.стп}}, \mathbf{C}_{\text{е.стп}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.стп}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{е.кп}}, \mathbf{C}_{\text{е.кп}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.кп}}) + (\mathbf{K}_{\text{е.тп}}, \mathbf{C}_{\text{е.тп}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.тп}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{е.су}}, \mathbf{C}_{\text{е.су}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.су}}) + (\mathbf{K}_{\text{е.фу}}, \mathbf{C}_{\text{е.фу}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.фу}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{е.с}}, \mathbf{C}_{\text{е.с}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.с}}) + (\mathbf{K}_{\text{е.м}}, \mathbf{C}_{\text{е.м}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.м}}) + (\mathbf{K}_{\text{е.р}}, \mathbf{C}_{\text{е.р}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.р}}) + \\ & + (\mathbf{K}_{\text{е.тп}}, \mathbf{C}_{\text{е.тп}}, \mathbf{P}_{\text{вя.е.тп}}). \end{aligned} \quad (6.43)$$

У наведеній моделі використано такі індекси:

схп – схемотехнічне проектування;

стп – системотехнічне проектування;

кп – конструкторське проектування;

тп – технологічне проектування;

су і фу – структуро- і формоутворення;

с – складання;

м – монтаж;

р – регулювання;

тп – технологічне припрацювання;

кон – контроль якості;

к – індекс величин, пов'язаних з визначенням втрат від виявленого браку;

е – експлуатація.

Зміст інших індексів пояснено в попередніх підрозділах.

З наведених моделей видно, що мінімізувати сумарні витрати, спричинені дефектами проектування, виробництва та експлуатації РЕА, можна комплексною оптимізацією всіх процесів, об'єднаних її життєвим циклом.

6.5. Оптимізація процесів формування і контролю якості РЕА

Технологічні та контрольні операції – значна і доволі трудомістка частина виробничого процесу. Ефективність цих операцій здебільшого визначає якість виробів. Тому проблема їх оптимізації сьогодні чи не найбільш привертає увагу спеціалістів.

Побудувати процес забезпечення і контролю якості виробів якнайліпше – означає встановити оптимальні у широкому розумінні цього слова умови і режими його проведення. Вибір варіантів таких процесів без належного комплексного підходу часто приводив до далеко не найкращого варіанта, а це негативно впливає на загальну ефективність виробництва та якість продукції.

Мета оптимального проектування технологічного процесу – визначити його параметри і структуру, оптимальні для заданих конкретних умов. Проблема оптимізації надто широка, розглянута у численних наукових працях як вітчизняних, так і закордонних авторів. Розгляд усіх аспектів проблеми оптимізації виходить далеко за межі цієї роботи. Зупинимось на головних із них.

На підставі аналізу публікацій, а також проведених спеціальних досліджень встановлено два основні напрями робіт щодо оптимізації технологічних

процесів. Перший напрям націлений на оптимальний синтез параметрів елементів системи із заданою структурою. Другий – на оптимальний синтез структури системи із заданими параметрами елементів. Можливий і суміщений варіант.

Сучасні методи оптимізації виробництва РЕА ґрунтуються на використанні математичних моделей систем забезпечення якості, встановлених критеріїв оптимальності та параметрів оптимізації, а також на обґрунтованих обмеженнях. Важливо зазначити, що результати оптимізації процесів мають практичну цінність лише тоді, коли основані на реальній вхідній інформації.

Залежно від призначення апаратури, вимог до її надійності, умов виробництва та експлуатації цілі оптимізації можна конкретизувати. При цьому виникає багато задач екстремального типу, які відрізняються набором змінних параметрів і функціями відгуку. Розглянемо деякі з них.

У формальному запису процедуру оптимізації можна подати у такому вигляді.

Оцінюючи ефективність технологічних процесів за допомогою двох критеріїв – імовірності виконання завдання $P_{вз}$ і сумарних виробничих витрат C , кожен з яких може бути головним, варто розглянути два основних варіанти задачі оптимізації.

Перший варіант розглядається як пряма задача забезпечення заданого значення головного критерію – $P(x_0)$ під час проведення технологічного процесу за мінімальних виробничих витрат. У загальному вигляді її записують так:

$$\begin{aligned} P(x_0) &= \sup P(x); \\ x_0 &\in \{x\}; \\ C(x) &\leq C_0. \end{aligned} \tag{6.44}$$

Другий варіант оптимізації розглядається як обернена задача забезпечення мінімального значення головного критерію $C(x_0)$ за допустимих значень $P(x)$:

$$\begin{aligned} C(x_0) &= \inf C(x); \\ x_0 &\in \{x\}; \\ P(x) &\geq P_0, \end{aligned} \tag{6.45}$$

де $P(x)$ і $P(x_0)$ – формалізований показник процесу та його експериментальний рівень; x_0 – рішення з усіх допустимих рішень x , яке задовольняє обмеження; $C(x)$, C_0 – показник обмеження і його допустимий рівень.

Отже, змінюючи $P(x)$ у першому варіанті задачі та $C(x)$ – у другому варіанті за встановлених обмежень, можна знайти значення прийнятих критеріїв у оптимальному варіанті технологічного процесу.

Зважаючи на вимоги до виробництва конкретної РЕА, задачі оптимізації розв'язують з використанням відповідних кількісних критеріїв. При цьому оптимі-

заційні моделі будують з урахуванням множин показників якості використовуваних ресурсів, а також показників якості технологічних і контрольних процедур.

Оптимізація повинна охоплювати найважливіші стадії виробництва щодо забезпечення заданих властивостей виробів. До них належать вхідний контроль матеріалів, напівфабрикатів, електрорадіоелементів і вузлів, що надходять з інших підприємств, виготовлення деталей і вузлів власного виробництва, процеси складання, монтажу, регулювання і технологічного припрацювання виробів. Кожна з цих стадій, крім першої, характеризується певною сукупністю технологічних (формувальних) операцій і операцій контролю. У деяких випадках, наприклад, на стадіях регулювання і припрацювання виробів, технологічні та контрольні операції можна об'єднати.

Враховуючи наведене, з використанням раніше прийнятих визначень і позначень, запишемо пряму і зворотну задачі оптимізації в такому вигляді:

Пряма задача

$$\begin{aligned}
 P_{\text{вз}} &= P(P_{\text{вз.вх.к}}, P_{\text{вз.в.1}}, P_{\text{вз.в.2}}, \dots, P_{\text{вз.в.п}}, P_{\text{вз.р}}, P_{\text{вз.тп}}) = \max \\
 P_{\text{вз.вх.к}} &\in G_{P_{\text{вз.вх.к}}} \\
 P_{\text{вз.в.1}} &\in G_{P_{\text{вз.в.1}}} \\
 P_{\text{вз.в.2}} &\in G_{P_{\text{вз.в.2}}} \\
 &\dots \\
 P_{\text{вз.в.п}} &\in G_{P_{\text{вз.в.п}}} \\
 P_{\text{вз.р}} &\in G_{P_{\text{вз.р}}} \\
 P_{\text{вз.тп}} &\in G_{P_{\text{вз.тп}}} \\
 C_{\Sigma} &= C(C_{\text{вх.к}}, C_{\text{в.1}}, C_{\text{в.2}}, \dots, C_{\text{в.п}}, C_{\text{р}}, C_{\text{тп}}) \leq C_{\text{доп}},
 \end{aligned} \tag{6.46}$$

де

$$\begin{aligned}
 P_{\text{вз.в.1}} &= P(P_{\text{вз.то.1}}, P_{\text{вз.ко.1}}) \\
 P_{\text{вз.в.2}} &= P(P_{\text{вз.то.2}}, P_{\text{вз.ко.2}}) \\
 &\dots \\
 P_{\text{вз.в.п}} &= P(P_{\text{вз.то.п}}, P_{\text{вз.ко.п}}) \\
 C_{\text{вх.к}} &= C(P_{\text{вз.вх.к}}) \\
 C_{\text{в.1}} &= C(P_{\text{вз.то.1}}, P_{\text{вз.ко.1}}) \\
 C_{\text{в.2}} &= C(P_{\text{вз.то.2}}, P_{\text{вз.ко.2}}) \\
 &\dots \\
 C_{\text{в.п}} &= C(P_{\text{вз.то.п}}, P_{\text{вз.ко.п}}) \\
 C_{\text{р}} &= C(P_{\text{в.р}}) \\
 C_{\text{тп}} &= C(P_{\text{вз.тп}})
 \end{aligned}$$

ймовірностей введення, виявлення та пропуску дефектів дає змогу моделювати процеси виробництва широкого класу технічних об'єктів, виконувати процедури декомпозиції і синтезу систем, розв'язувати задачі комплексної оптимізації.

Процедуру оптимізації можна розглянути в складі деяких стадій. Наприклад, параметрична оптимізація пов'язана зі зміною параметрів виробничих процесів за заданої структури. Її можна провести на рівні переходів, операцій, маршрутів і процесів загалом, знайшовши оптимальні режими формування і контролю заданих властивостей виробів. Конкретні цілі оптимізації систем – встановлення оптимальних вимог до матеріалів, технологічного і контрольного обладнання, енергоресурсів, кваліфікації виконавців. Визначають оптимальні технологічні режими під час виконання операцій:

- структуроутворення;
- формоутворення;
- нанесення захисних, захисно-декоративних і спеціальних покриттів, обволікання, просочування, заливання і герметизації деталей і вузлів апаратури;
- складальних операцій;
- монтажу;
- регулювання апаратури з дотриманням оптимальних виробничих допусків на вихідні параметри виробів, які встановлюються, щоб гарантувати їх точність протягом заданого періоду експлуатації;
- технологічного припрацювання апаратури з визначенням оптимальної тривалості та режимів припрацювання;
- визначення оптимальних вимог до вхідного контролю якості матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, а також до контролю якості готової продукції, контрольного обладнання і кваліфікації виконавців.

Структурна оптимізація передбачає не тільки вибір раціональних технологічних і контрольних режимів, а також вибір оптимальних варіантів структури виробничого процесу загалом або окремих його частин. У такій постановці питання структурна оптимізація є вищою формою оптимізації, що становить одну з основних проблем проектування виробничого процесу. Складність параметричної і структурної оптимізації зумовлена численністю варіантів процедур формування і контролю, яка визначає множинність варіантів виробничих процесів. Властивості вказаних процедур найчастіше задають не у вигляді чисел або функцій, але алгоритмічно у вигляді правил, рекомендацій, технологічних інструкцій і вказівок, що суттєво ускладнює формалізацію, математичне моделювання і оптимізацію таких процесів.

Отже, оптимізація виробничого процесу дає змогу з урахуванням встановлених обмежень визначити характеристики формувальних (технологічних) і контрольних операцій, за яких забезпечується випуск апаратури із заданими

властивостями за мінімальних сумарних виробничих витрат. Змінними параметрами кожної технологічної операції можуть бути ймовірності введення дефектів під час її проведення, середній рівень дефектності тощо. За реальних умов не виключена ситуація, коли за наявних виробничих можливостей випуск приладів із заданими властивостями виявиться технічно нездійсненним або економічно невиправданим. Вирішальну роль відіграють якість і вартість матеріалів, напівфабрикатів і електрорадіоелементів, що надходять на підприємство, рівень технологічного обладнання, засоби контролю, кваліфікація виробничого персоналу. Тому частковим вирішенням розглянутого завдання може стати оцінка підготовленості конкретного підприємства до випуску приладів із заданими властивостями, тобто його виробничого потенціалу.

Для підприємств, які випускають прецизійну апаратуру з підвищеними вимогами щодо параметричної надійності, важливе завдання забезпечення гарантованого часу збереження виробами заданої точності за мінімальних виробничих витрат.

Актуальним є також визначення точності технологічного і контрольного обладнання, необхідного для забезпечення заданої точності виробництва і вірогідності контролю готових виробів.

У виробничих умовах формулювання задач оптимізації технологічних процесів, звичайно, не потребує великих зусиль. Сама процедура знаходження оптимального варіанта пов'язана з труднощами суто обчислювального характеру. Трудомістким і відповідальним етапом оптимізації є побудова математичної моделі, яка мусить бути адекватною досліджуваному процесу. Побудові такої моделі повинно передувати детальне вивчення процесів забезпечення і контролю властивостей приладів на різних стадіях виготовлення, причин утворення дефектності продукції, закономірностей зміни параметрів і похибок виробів та інших питань, пов'язаних з використанням основних положень теорії точності виробництва.

На рис. 6.3 наведено результат оптимізації технологічного процесу виготовлення друкованих плат з використанням технології комбінованого позитивного формування електропровідного рисунка. Критерієм оптимальності прийнято сумарні виробничі витрати на його створення і витрати, викликані дефектами виробництва. Останні виникають як на стадії виготовлення плат, так і на стадії експлуатації у разі їх відмов. Параметрами оптимізації слугували показники глибини контролю якості на основних стадіях виробництва α_i . Отриманий суттєвий розкид оптимальних значень показників α_i та їх переважне зміщення у бік менших значень відносно стартових ($\alpha = 1,0$), а також мінімізація сумарних витрат, засвідчують технічну та економічну доцільність оптимізації.

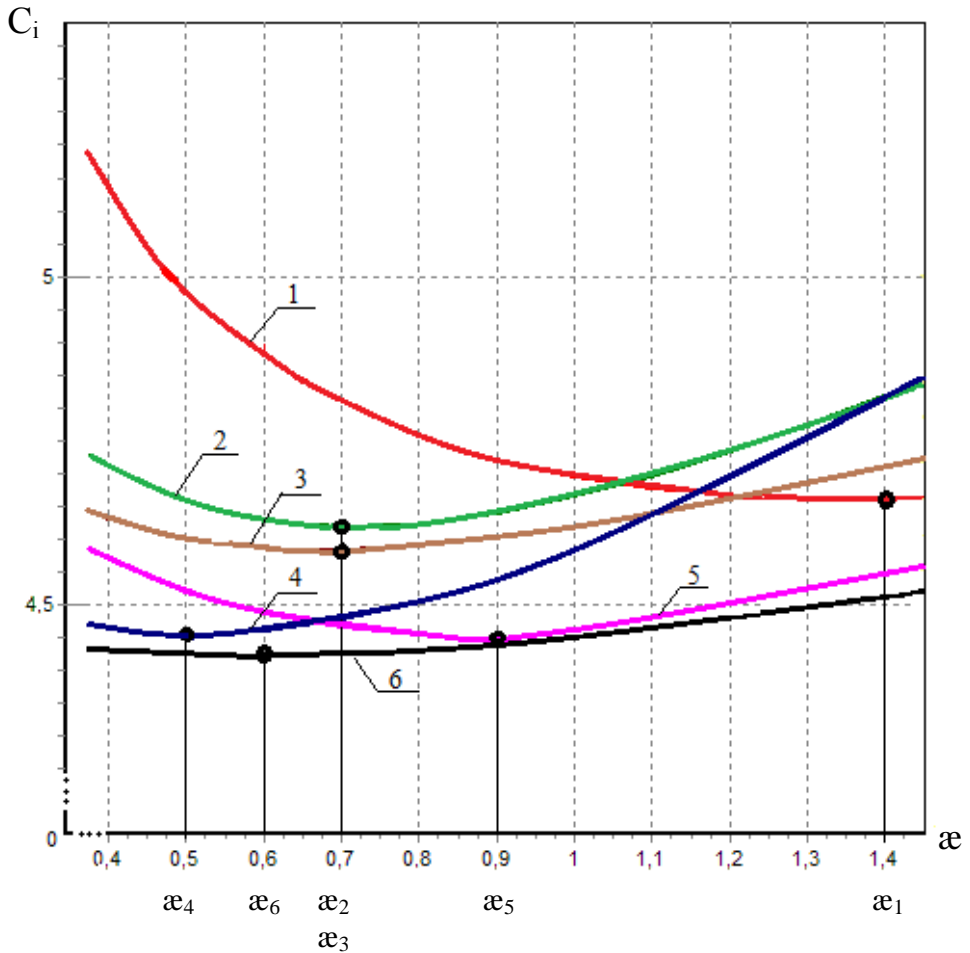


Рис. 6.3. Залежності сумарних витрат від параметрів глибини контролю для кожного кроку технологічного процесу виготовлення друкованих плат комбінованим позитивним методом:

- 1 – виготовлення заготовок, виконання базових отворів;
- 2 – підготовка поверхні й нанесення рисунка друкованої схеми;
- 3 – свердлування монтажних отворів; 4 – хімічне міднення, гальванічне нарощування провідників; 5 – травлення міді;
- 6 – обробка друкованих плат по контуру, маркування і нанесення захисного покриття

Розглянуті оптимізаційні моделі процесів утворення дефектності та сумарних витрат під час проектування, виробництва й експлуатації РЕА характеризуються високою адекватністю, зумовленою їх універсальністю та гнучкістю і тому, на відміну від відомих моделей, можуть використовуватись для комплексної оптимізації цих процесів для широкого класу цього виду техніки без будь-яких принципових обмежень.

Моделі побудовано з використанням рекурентних залежностей показників якості, що послідовно формуються і підтримуються відповідними підсистемами упродовж повного життєвого циклу. Вони складні за структурою і громіздкі за представленням, що обмежує можливості їх використання для розв'язання оптимізаційних задач з активною участю у цьому процесі технологів і представників інших служб підприємств. У зв'язку з цим актуальним є розроблення принципів подання цих моделей у формі, зручній для проведення діалогу зацікавлених спеціалістів з ЕЦОМ у процесі оптимізації. Цим забезпечується висока ефективність прийнятих рішень завдяки їх адекватності конкретним умовам виробництва і експлуатації виробів.

Матричний варіант моделі сумарних витрат для забезпечення якості апаратури, елементами якої є часткові моделі, які, на відміну від відомих у комплексі, дають змогу оптимізувати витрати, пов'язані з проведенням технологічних, контрольних, випробувальних та інших процедур на основних стадіях проектування і виробництва, а також витрати на гарантійне обслуговування виробів у користувача з урахуванням встановлених техніко-економічних вимог.

Список літератури

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М. : ЮНИТА, 1998.
2. 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.
3. Бобало Ю.Я. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури: [монографія] / Ю.Я. Бобало, М.Д. Кіселичник, Л.А. Недоступ. – Львів : Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1996. – 167 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 2001. – 575 с.
5. Гаскаров Д.В. Оптимизация технологических процессов в производстве электронных приборов: [учеб. пособие для вузов по спец. “Пром. электрон.”] / Д.В. Гаскаров, А.А. Дахнович. – М.: Высшая школа, 1986. – 188 с.
6. Гудков А.Г. Радиоаппаратура в условиях рынка. Комплексная технологическая оптимизация / А.Г. Гудков. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 334 с.
7. Даншина С.Ю. Методология сквозного управления качеством на всех этапах жизненного цикла радиотехнических систем / С.Ю. Даншина // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 2 (43). – С. 14–19.
8. Дружинин Г.В. Методы оценки и прогнозирования качества / Г.В. Дружинин. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
9. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
10. Евристична оптимізація розстановки контрольних точок в технологічних процесах при багатовимірному просторі типів дефектів / О.П. Ротштейн, С.Д. Штовба, С.Б. Дубіненко, О.М. Козачко // Вісник Вінницького політех. ін-ту. – 2004. – № 1: Інформаційні технології та комп'ютерна техніка. – С. 54–62.
11. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
12. Кендалл М. Теория распределений / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1966. – 587 с.
13. Кіселичник М.Д. Оцінка ефективності та забезпечення якості радіоелектронних пристроїв / М.Д. Кіселичник, Л.А. Недоступ // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2001. – № 415: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 210–214.
14. Кофанов Ю.Н. Автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры / Ю.Н. Кофанов // Инф. технол. в проектир и пр-ве. – 2000. – № 3. – С. 67–73.
15. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М., 1975. – 648 с.
16. Лазько О. Моделювання розподілів рядами Грама-Шарлье та їх застосування в технологічних САПР / О. Лазько, Л. Недоступ, Ю. Бобало // Вісник Держ. ун-ту “Львів. політехніка”. – 2000. – № 387: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 59–65.
17. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер; пер. с англ. – М.: Наука, 1982.
18. Любчик Л.М. Оптимальное управление запасами в дискретных производственных системах / Л.М. Любчик, Г.Л. Гринберг // Вестник Харьков. гос. политех. ун-та. – 1999. – Вып. 57.
19. Малютин Н.В. Применение системы АСОНИКА при проектировании высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры на основе CALS-технологий / Н.В. Малютин, С.С. Коломейцев // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума, Пенза, Россия, 25–31 мая 2006 г. Т. 1. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2006. – С. 168–169.
20. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М., 1971. – 576 с.

21. Недоступ Л. Моделирование дефектности процессов последовательной структуры / Л. Недоступ, М. Киселичник, Ю. Бобало // *Elektronika ir elektrotechnika*. – Kaunas, 1997. – № 1(10). – С. 80–83.
22. Недоступ Л. Моделювання процесів формування якості при серійному виробництві радіоелектронних приладів / Л. Недоступ, М. Киселичник, Ю. Бобало // *I-st Intern. Modeling School – Krym Autumn'96*, September 12–17, 1996, Alushta, Ukraine : Proceedings. – Rzeszów, 1996. – Р. 57.
23. Недоступ Л. Оцінка надійності виробів з врахуванням ефекту спадковості при їх виготовленні та експлуатації / Л. Недоступ, М. Киселичник, Ю. Бобало // *III Спільна українсько-польська школа-семинар "Актуальні проблеми теоретичної електротехніки: наука і дидактика"* : доповіді, Крим – Алушта, 3–7 верес. 2001 р. – Варшава, 2001. – С. 69–71.
24. Недоступ Л. Питання теорії перетворення потоків при проведенні технологічних і контрольних процедур / Л. Недоступ, М. Киселичник, Ю. Бобало // *Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 1999. – № 367 : *Радіоелектроніка та телекомунікації*. – С. 172–176.
25. Недоступ Л.А. Оптимизация контроля, регулировки и технологической приработки приборов / Л.А. Недоступ. – Львов : Вища школа, 1987. – 152 с.
26. Недоступ Л.А. Основы надійності радіоелектронних пристроїв: навч. посібник для студ. радіотехн. спец. вищ. навч. закл. / Л.А. Недоступ, М.Д. Киселичник, Ю.Я. Бобало. – Львів: Вид-во Держ. ун-ту "Львівська політехніка", 1998. – 218 с.
27. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
28. Оптимизация структур больших систем / [В.И. Борщ, В.А. Донец, В.В. Коваль и др.]. – К. : Наукова думка, 2000. – 191 с.
29. Острейковский В.А. Многофакторные испытания на надежность / В.А. Острейковский. – М. Энергия, 1978. – 152 с.
30. Острейковский В.А. Теория надежности / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
31. Пінчук С.Й. Організація експерименту при моделюванні та оптимізації технічних систем : навч. посіб. / С.Й. Пінчук. – Дніпропетровськ: Дніпро – VAL, 2009. – 289 с.
32. Приходько И. Современные методы тестирования и испытаний в системе качества ISO 9000 / И. Приходько // *Электронные компоненты*. – 2002. – № 8. – С. 31–36.
33. Приходько И. Тестирование печатных плат / И. Приходько // *Электронные компоненты*. – 2003. – № 8.
34. Радченко С.Г. Багатофакторне математичне моделювання та компромісна оптимізація технологічного процесу електроерозійного прощиття отворів / С.Г. Радченко // *Математичні машини і системи*. – 2003. – № 3–4. – С. 186–200.
35. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К.: ЗАО "Укрспецмонтажпроект", 1998. – 274 с.
36. Роїк О.М. Контроль і діагностика радіоелектронної апаратури на етапах її виробництва / О.М. Роїк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2000. – 170 с.
37. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем : монография / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 485 с.
38. Точность производства в машиностроении и приборостроении / [Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов, А.Н. Гаврилов и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
39. Шайко-Шайковский А.Г. Определение допустимых значений характеристик материалов при проектировании РЭА / А.Г. Шайко-Шайковский // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 1998. – № 2. – С. 12–13.

40. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / [В.И. Городецкий, А.К. Дмитриев, В.М. Марков и др.]. – Л.: Энергия, 1978. – 191 с.
41. Bagdanavicius N. Efficiency of Electronic Device Manufacturing Process Control / Bagdanavicius N., Zickis A. // 26 Int. Conf. Information Technology Interfaces (ITI 2004), June 7–10, 2004, Cavtat. Croatia. – ISSN 1330-1012.
42. Bobalo Yu. Generalized Robust Parameters Distribution Model / Yu. Bobalo, L. Nedostup, O. Lazko // Przegląd Elektrotechniczny : konferencje. – 2007. – № 2: VIII-th Intern. Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering” (CPEE 2007), Sept. 14–16, 2007, Wilkasy, Poland. – P. 237.
43. Bobalo Yu. Parametric Synthesis Optimization with Genetic Algorithms / Yu. Bobalo, L. Nedostup, O. Lazko // Proc. of the VII Intern. Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering” (CPEE’06), August 27–30, 2006, Odessa, Ukraine. – [Lviv : Publ. house of Lviv polytechnic nat. univ., 2006]. – P. 33–34.
44. Complex Modeling of Electronic Devices Production Systems Quality Maintenance / L. Nedostup, Yu. Bobalo, M. Kiselychnyk, O. Lazko // Proc. of the VI-th Intern. Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, Zakopane, Poland, Sept. 1–4, 2004. – Warszawa, 2004. – P. 225.
45. Matematyczny model defektnosci aparatury radioelektronicznej w trakcie jej wytwarzania / L. Nedostup, Ju. Bobalo, M. Kiselychnyk [et al.] // Modelowanie i symulacja komputerowa w technice : III –Sympozjum , Łódź, 2004. – Łódź, 2004. – S. 73–74.
46. Nedostup L. Usage of Gram-Charlie and Edgeworth Series in Product Parameters Distribution Modeling / L. Nedostup, O. Lazko, Yu. Bobalo // Deuxième conf. intern. sur les méthodes math. en fiabilité : Méthodologie, pratique et inférence “MMR’ 2000”, Bordeaux (France), 4-7 Juill 2000 : Livre des actes. – Bordeaux, 2000. – Vol. 2. – P. 809–812.
47. Nedostup L. Modelling and optimization of total costs in the radioelectronic devices quality maintenance process / L. Nedostup, M. Kiselychnyk, Yu. Bobalo // Proc. of the IV Sympozjum “Modelowanie i symulacja komputerowa w technice”, Łódź, 2005. – Łódź, 2005. – S. 167–168.
48. OPTAN – Software for Modelling, Analysis and Optimization of Electronic Devices Process Improvement / Yu. Bobalo, L. Nedostup, O. Nadobko [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2009. – R. 85. – NR 4. – P. 59–61.
49. Žickis A. Structural Model of Electronic Device Manufacturing Process Quality / Žickis A. // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas : Technologija, 2006. – Nr. 5 (69). – P. 37–40.
50. Kalnius R. Applications of Generalized Beta-distribution in Quality Control Models / Kalnius R., Eidukas D. // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas : Technologija, 2007. – № 1 (73). – P. 5–12.
51. Bobalo Yu. Analysis of quality of radio electronic devices in multistage production systems / Yu. Bobalo, M. Kiselychnyk, L. Nedostup // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2010. – R. 86. – NR 1. – P. 124–126.
52. Caramia M. Effective Resource Management in Manufacturing Systems Optimization Algorithms for Production Planning / Caramia M., Dell’Olmo P. – Springer, 2006. – 216 p. – ISBN-10: 1-84628-005-2.

Бобало Юрій Ярославович, доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, ректор Національного університету “Львівська політехніка”. Стаж педагогічної діяльності у вищій школі понад 30 років. Автор понад 150 наукових та науково-методичних праць, серед яких 3 монографії, 3 підручники та 7 навчальних посібників з грифом МОН України.

Тематика наукових досліджень – теорія електронних кіл та методи забезпечення їх відмовостійкості.

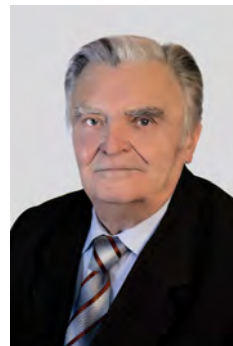


Недоступ Леонід Аврамович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань (з 2004 р.).

Після закінчення Львівського політехнічного інституту працював на підприємствах і в науково-дослідних закладах міністерств радіотехнічної та електронної промисловості.

У вищій школі викладає близько 40 років.

Автор 7 наукових монографій, 5 навчальних посібників, понад 250 наукових публікацій. Заступник голови спецради Д35.052.10 із захисту докторських дисертацій.



Кіселичник Мирослав Дмитрович, кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Львівської політехніки. Викладає у вищій школі понад 40 років. Автор понад 190 наукових та науково-методичних праць, серед яких 3 авторські свідоцтва, 2 монографії, 6 навчальних посібників (3 з грифом МОН).

Тематика наукових досліджень – багатокритеріальна оптимізація і багатофакторне математичне моделювання процесів проектування, виробництва та експлуатації радіоелектронних пристроїв, теорія і практика забезпечення їх безвідмовності та якості.



Книги для навчання і роботи!



За ред. проф. Ю.Я. Бобала, проф. Б.А. Мандзія
**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ
ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ**

*Навчальний посібник. – 2013. – 320 с.
ISBN 978-617-607-355-0*

Розглянуто основні поняття теорії та математичні моделі радіоелектронних кіл, математичні моделі зовнішньої дії на електронне коло, лінійні кола з постійними параметрами, нелінійні кола та лінійні кола з розподіленими параметрами.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються на базових напрямках, пов'язаних з обробленням та пересиланням інформації, поданої у вигляді електричних сигналів.

Рекомендувало Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів базових напрямів “Радіотехніка”, “Електронні апарати”, “Телекомунікації”, “Електроніка”, “Комп’ютерні науки”, “Лазерна та оптоелектронна техніка”.



Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д.
**СИСТЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ. ПРАКТИКУМ**

*Навчальний посібник. – 2012. – 128 с.
ISBN 978-617-607-328-4*

Подано п’ять проектних завдань, які повинні сформулювати у студента розуміння сутності етапу системотехнічного проектування телекомунікаційних мереж, його практичну значущість. Виконання кожного проектного завдання дає можливість перейти до виконання дипломної роботи. Темі дипломних робіт сформульовані так, щоб розвинути проектне завдання.

Для студентів таких системних спеціальностей: “Інформаційні мережі зв’язку”, “Технології та засоби телекомунікацій”, “Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси”, “Апаратура радіозв’язку, радіомовлення та телебачення”, “Радіотехніка”, “Комп’ютерні системи та мережі”, “Комп’ютеризовані системи управління та автоматика”, а також аспірантів, які займаються проектуванням або удосконаленням інформаційних мереж зв’язку.

Бондарев А.П. та ін.
**ПРИСТРОЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ
СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Навчальний посібник. – 2011. – 224 с.
ISBN 978-617-607-184-6

Викладено основні поняття та принципи побудови цифрових систем стільникового зв'язку на прикладі систем стандартів GSM та CDMA. Розглянуто функціональну і просторову структуру систем, прийняті для використання типи сигналів, функції та будову пристроїв і підсистем стільникової телефонії.

Навчальний посібник призначений для студентів радіотехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів III–IV рівнів акредитації.

Рекомендувало Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів України, які навчаються за напрямом підготовки “Радіотехніка”.



Бобало Ю.Я. та ін.

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ

Підручник. – 2008. – 332 с.
ISBN 978-966-553-815-8

Висвітлено основні поняття теорії сигналів, розкрито базові положення теорії електричних кіл, описано їхні компоненти. Значну увагу приділено аналізу електронних кіл, а також перетворенням сигналів в електронних колах.

Видання охоплює всі три види занять з теорії електронних кіл. Кожний розділ закінчується питаннями для самоконтролю, прикладами розв'язання типових задач та задачами для самостійного розв'язування.

Додано електронний підручник, який ґрунтується на двох попередніх виданнях. Він містить три частини, перша з яких значною мірою повторює попередні видання, а дві інші – дають студентів зможу здійснити комп'ютерну самооцінку отриманих знань, а також підготуватись до виконання лабораторних робіт.

Для студентів ВНЗ III–IV рівнів акредитації, які навчаються на базових напрямах “Комп'ютерні науки”, “Мікро- та наноелектроніка”, “Електронні пристрої та системи”, “Оптоелектроніка” тощо і вивчають курс “Основи теорії електронних кіл” або подібні курси.

Затверджено Міністерством освіти і науки України.



Видавництво Львівської політехніки

вул. Ф. Колесси, 2, корп. 23 А, м. Львів, 79000

тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136, <http://vlp.com.ua>, vmr@vlp.com.ua



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**Бобало Юрій Ярославович
Недоступ Леонід Аврамович
Кіселичник Мирослав Дмитрович**

**ЯКІСТЬ,
НАДІЙНІСТЬ
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ
АПРАТУРИ**

ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ І МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Редактор *Оксана Чернигевич*
Коректор *Олена Сенік*
Технічний редактор *Лілія Саламін*
Комп'ютерне верстання *Ірини Жировецької*
Художник-дизайнер *Маріанна Рубель-Кадирова*

Здано у видавництво 15.04.2013. Підписано до друку 15.07.2013.
Формат 70×100¹/₁₆. Папір офсетний. Друк офсетний.
Умовн. друк. арк. 15,8. Обл.-вид. арк. 11,9.
Наклад 300 прим. Зам. 130424.

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4459 від 27.12.2012 р.

вул. Ф. Колесси, 2, Львів, 79000
тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136
vlp.com.ua, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua

ISBN 978-617-607-481-6



9 786176 074816 >