

П.В. Тарадаха, О.В. Надобко, М.Д. Кіселичник, Л.А. Недоступ,
Національний університет "Львівська політехніка"

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПАРЕТО-ОБЛАСТЕЙ

© Тарадаха П.В., Надобко О.В., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А., 2013

P. Taradakha, O. Nadobko, M. Kiselychnyk, L. Nedostup,
Lviv Polytechnic National University

DEVELOPMENT THE PROCESS OPTIMIZATION METHOD OF MANUFACTURING THE RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT WITH USING OPTIMIZATION PARETO-REGIONS

© P. Taradakha, O. Nadobko, M. Kiselychnyk, L. Nedostup, 2013

At the department of theoretical radioengineering and radiomeasurements of Lviv Polytechnic National university the theory and methods of modeling and a process optimization the quality assurance processes of the radio-electronic equipment (REE) at a manufacture stage have been developed. As part of this common problem tasks of modeling and optimization the production and technological processes as the main stages with the formation of given (desired) properties REE are also considered. The last task solution reduces to the parameter optimization of control procedures by optimizing the depth control, compliance of them guarantees the set quality level REE at the lowest total production and maintenance costs. For such tasks realization methods of modeling procedure, optimization techniques have been proposed. Appropriate software, which has been used for solving a number of practical problems has been developed. One of the mentioned approach deficiency is the fact that received optimal values of depth control can not always use in practice. In most cases, these values have been found as a result of a purely mathematical solution of optimization task and thus received optimal values of depth control is not always possible to implement in conditions of real production.

The aim of this work is the development of a universal method of optimization that uses the principles of Pareto optimization and is as close to the real production conditions, including taking into account the possible configurations of used technological and control equipment, requirements for quality and reliability of products in general.

Proposed method involves the use of optimization Pareto-regions for solving problems of optimization processes (TP) which can be considered as modification of Pareto. Idea of the method is as follows: for creation Pareto-region a detailed analysis of all possible variants of TP with the fixation sets of technologies and control equipment and calculation of depth control values for all these variants of TP has been performed. Based on this, the research protocol of TP's selected values in the form of depth control parameter sets. Next, using the developed methods and software, the evaluation of integral index of products quality in the form of the probability of formation output defectiveness and total costs, that are further displayed on the corresponding Pareto-region as a point has been estimated. By asking permitted defectiveness levels and total costs you can select those options of TP implementation, which guarantee the specified quality level of REE at acceptable cost levels. The typical optimization problems which take place in a real production has been examined in details.

Keywords: technological processes of radio electronic equipment production, multi-objective optimization, Pareto-region

Пропонується метод оптимізації технологічних процесів виготовлення радіоелектронної апаратури, який базується на використанні оптимізаційних Парето-областей. Метод є універсальний, не містить обмежень на складність процесів і дозволяє

встановлювати варіанти технологічних процесів, які відповідають умовам забезпечення заданого рівня дефектності виробів при допустимих витратах.

Ключові слова: технологічні процеси виготовлення РЕА, багатопараметрична оптимізація, Парето-область

Вступ та постановка задачі. Основним підсумком наукових досліджень, проведених на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету “Львівська політехніка” за останні роки, є розробка теорії та методів моделювання та оптимізації процесів забезпечення якості радіоелектронної апаратури (РЕА) на стадії виготовлення [1-3]. В рамках цієї загальної проблеми розглядаються також задачі моделювання та оптимізації виробничо-технологічних процесів як основних стадій із формування заданих (потрібних) властивостей РЕА. Вирішення останньої задачі зводиться до оптимізації параметрів контрольних процедур шляхом оптимізації глибини контролю, дотримання яких гарантує заданий рівень якості РЕА при мінімальних сумарних (виробничих та експлуатаційних) витратах. Саме для такої задачі сьогодні запропоновані методики реалізації процедури моделювання, методи оптимізації [4] та розроблене відповідне програмне забезпечення, яке уже використане для вирішення ряду практичних задач [5,6]. Одним із недоліків вказаного підходу є те, що отримувані оптимальні значення глибини контролю не завжди можна практично реалізувати. В більшості випадків ці значення знаходяться як результат чисто математичного рішення задачі оптимізації. Пов’язано це, в першу чергу, з тим, що для відповідного набору контрольних обладнання значення глибини контролю (це значення визначається як відношення числа фактично контрольованих параметрів до нормативно встановленого числа контрольних параметрів на відповідній технологічній операції) є величиною фіксованою. Можлива заміна контрольного обладнання приведе до зміни одного фіксованого значення глибини контролю на інше, тоді як отримане класичними методами оптимальне значення може відрізнятись від цих значень і ці відмінності, як показує практика, в деяких випадках є досить відчутними. Звідси і виникає запитання, як такі оптимальні значення глибини контролю можна реалізувати в умовах реального виробництва?

Метою даної роботи є розробка універсального методу оптимізації, який використовує принципи Парето-оптимізації і максимально наближеного до умов реального виробництва, в тому числі враховує можливі конфігурації використовуваного технологічного та контрольного обладнання, вимоги до якості та надійності продукції в цілому.

Розробка методу оптимізації. Як уже відмічалось, основною складністю і особливістю вирішення задач комплексної оптимізації технологічних процесів (ТП) виготовлення РЕА є їх багатопараметричність та багатокритеріальність. Складність ця більше стосується практичного аспекту, ніж теоретичного, оскільки в роботах авторів висвітлені всі питання стосовно вибору параметрів оптимізації, сформовані критерії оптимальності, розроблені конкретні методики та рекомендації щодо їх використання. Показано, що в більшості випадків критерії оптимальності процесів виготовлення РЕА формуються у вигляді системи умов, які в цілому відображають технічні, технологічні, економічні, організаційні та інші вимоги щодо організації виробничо-технологічних процесів та забезпечення якості виробів в цілому. Врахування всіх цих критеріїв перетворює задачу оптимізації на багатовимірну задачу, потребує використання спеціальних методів оптимізації, їх адаптації до особливостей комплексної оптимізації процесів виготовлення РЕА в авторській постановці. До цього слід додати відсутність потрібного програмного забезпечення для вирішення вказаних проблем, розробка якого є окремою задачею.

В рамках запропонованої методології задача оптимізації процесів виготовлення РЕА розглядається і реалізується як задача багатопараметрична та багатокритеріальна, хоча і при певних обмеженнях та допущеннях. По-перше, оптимізація процесів виготовлення РЕА, як уже було зазначено, зводиться до оптимізації процедур контролю на кожній технологічній операції. В цій ситуації абсолютно обґрунтованим є вибір в якості параметра оптимізації параметра глибини контролю. В такій постановці задача оптимізації виглядає як задача однопараметрична. Однак слід враховувати, що в реальних ТП число технологічних операцій, переходів і т.д. може складати від декількох десятків до сотень і тому пошук оптимального вектора значень глибини контролю проводиться в багатовимірному просторі. В такій постановці задача оптимізації без сумніву є

задачею багатопараметричною. Для її вирішення в програмно-методичному комплексі ОПТАН використано метод Хука-Дживса. Відмітимо також, що при використанні методів покрової оптимізації та “золотого січення” проводиться незалежний пошук оптимальних значень глибини контролю для кожного кроку ТП (технологічної операції, переходу і т. ін.). Таке спрощення дозволяє трактувати задачу оптимізації як задачу однопараметричну. Важливо, що для багатьох проаналізованих ТП паралельне використання трьох методів оптимізації дають практично однакові результати. Це свідчить про правильний вибір стратегії оптимізації. По-друге, що стосується багатокритеріальності, то тут можна відмітити наступне. В запропонованій процедурі оптимізації використовується два основних критерії – критерій мінімуму сумарних витрат (сюди входять власне виробничі витрати і витрати за період гарантійної експлуатації, які, як відомо, перекладаються на виробника продукції) і критерій допустимого рівня дефектів. Враховуючи це, можна говорити, що така задача оптимізації є задачею багатокритеріальною. Як один із варіантів її вирішення в ОПТАНі передбачається можливість використання лише одного критерію – критерію мінімуму сумарних витрат. Встановлено, що при цьому для деяких ТП може спостерігатися деяке збільшення дефектів в порівнянні з базовим варіантом ТП при одночасному зменшенні витрат. Такий ефект можна пояснити збільшенням “дешевих” дефектів, які в сумі не приводять до суттєвого зростання витрат в цілому. На прикладі це виглядає так. Можна, наприклад, дефектну заготовку друкованої плати пропустити на наступні етапи ТП, встановити елементи і лише після цього, уже на завершальних стадіях виготовлення, виявити пропущений дефект. Загальні витрати виготовлення, зрозуміло, в цьому випадку будуть великими. Можна навпаки зразу виявити дефект заготовки плати, зняти її з виробництва і таким чином суттєво зменшити витрати, пов’язані з таким забракуванням. Якщо навіть число дефектів збільшиться, але вони будуть виявлятися на як можна ранніх стадіях ТП, то в сумі, як показали дослідження, витрати виготовлення можна зменшити. Такий висновок повністю підтверджується результатами досліджень багатьох ТП, для яких встановлена тенденція перерозподілу вимог до контрольних операцій – більш жорсткіші вимоги щодо якості контролю переносяться на початкові етапи ТП і цим самим блокується проходження дефектних виробів через весь технологічний процес.

Із наведеного аналізу можна зробити такий висновок. Запропонована стратегія оптимізації, яка, в тому числі, реалізована в програмно-методичному комплексі ОПТАН, дозволяє досить часто знайти чисто математичні оптимуми. Результати такої оптимізації не завжди можна реалізувати на практиці. В процесі вирішення реальних задач, розробнику нерідко приходиться йти на компроміс, відхиляючись від екстремальних значень показників для того, щоб задовольнити вимоги, які задаються в технічному завданні. При цьому на практиці зручно розглядати сукупність рішень, для яких покращення значення одного критерію призводить до збільшення значення другого.

На принципі компромісу заснована векторна постановка задачі, коли може бути використаний метод Парето. Він дозволяє виділити сукупність рішень, де зменшення значення одного критерію приводить до збільшення значень інших критеріїв.

В основі методу Парето лежить ідея побудови набору альтернатив (множини Парето) на основі правила 80/20. В даному випадку це означає, що 20 відсотків всіх можливих наборів дають 80 відсотків оптимальних рішень. Після побудови такої множини і її наочного представлення експерту пропонується обрати чи сформулювати критерії прийняття рішення та виділити множини Парето-оптимальних розв’язків, зробивши вибірку з загальної множини.

Запропонований далі метод передбачає використання для вирішення задач оптимізації ТП оптимізаційних Парето-областей, що можна розглядати як модифікацію методу Парето. Ідею методу ілюструє рис.1. Для побудови Парето-областей проводиться детальний аналіз всіх можливих варіантів реалізації ТП з фіксацією наборів використовуваного контрольно-технологічного обладнання і обчислення значень глибини контролю для всіх технологічних операцій. Після цього формується протокол досліджень відповідного ТП у вигляді множини наборів параметрів глибини контролю. Далі за допомогою розробленого програмного забезпечення для кожного із сформованих варіантів ТП обчислюються оцінки інтегрального показника якості у вигляді імовірності формування вихідної дефектності виробів та сумарних витрат на забезпечення потрібного рівня якості, які в подальшому відображаються на відповідній Парето-області у вигляді точок. Задаючи допустимі рівні дефектності та сумарних витрат, можна виділити ті варіанти ТП, які гарантують заданий рівень якості РЕА при допустимих рівнях витрат.

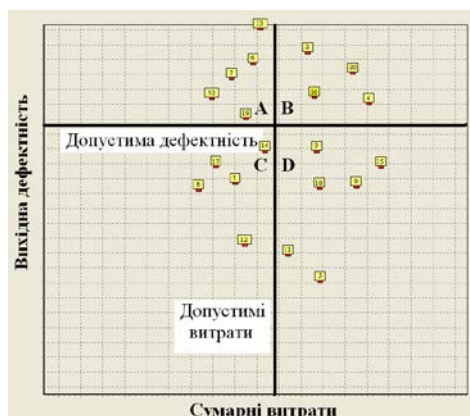


Рис. 1. Принцип побудови оптимізаційної Парето-області “сумарні витрати – вихідна дефектність”

На наведеній площині можна виділити чотири умовні області, які позначені відповідними буквами (рис. 1). Зрозуміло, що в область С попадають ті варіанти ТП, які відповідають вимогам забезпечення допустимих рівнів дефектності та витрат і в такому розумінні є оптимальними (раціональними). Практика показує, що таких варіантів ТП може бути декілька, тоді вибір остаточного варіанта залежить від умов конкретного виробництва, враховуючи наявність потрібного контрольного та технологічного обладнання, рівень ресурсного забезпечення, кваліфікацію виконавців та інші фактори. Область В містить варіанти ТП, реалізація яких не забезпечує потрібних рівнів якості виробів і витрат. Очевидно, що з цього погляду вони є непридатними для практичної реалізації.

Цікаві практичні висновки та рекомендації можна сформулювати стосовно областей А та D. Так область А можна умовно назвати областю "дешевих дефектів". Реалізація ТП, які попадають в цю область, веде до деякого збільшення дефектів, хоча сумарні витрати при цьому залишаються меншими допустимого рівня. Цей факт уже частково розглядався вище і його можна проілюструвати аналогічним прикладами. Нехай при виготовленні друкованої плати на стадії формування заготовок плат появляється механічний дефект, який не виявляється на початкових стадіях ТП, а виявляється лише після установки елементів на стадії вихідного контролю якості функціонування плати, або навіть під час гарантійної експлуатації. Очевидно, що витрати, пов'язані із забракуванням плати в цьому випадку, будуть великими. Суттєво меншими витрати будуть, коли після появи такого дефекту він практично зразу ж виявляється. Навіть, якщо число таких дефектів буде більше допустимого рівня, сумарні витрати можуть залишатися меншими заданого значення.

В область D попадають варіанти ТП, які реалізуються за принципом "досягнення потрібного рівня якості виробів за будь-яку ціну". Хоча цей принцип організації ТП використовується рідко, для деяких видів РЕА – таких як апаратура відповідального призначення, виготовлена в одиничних екземплярах та ін., такий підхід може бути обґрунтованим.

Результати досліджень багатьох ТП показують, що базові (існуючі) варіанти ТП переважно попадають або в область В, або С. Перший випадок свідчить про необхідність удосконалення ТП, в тому числі і шляхом покращення процедур контролю. Другий випадок – це додаткове підтвердження високої якості організації ТП, які не потребують жодних корекцій.

Варіанти оптимальних ТП, отримані з використанням класичних методів оптимізації, в переважній більшості розміщуються в області С, "переміщуючись" сюди із області В після проведення процедури оптимізації. Якщо відсутні обмеження на дефектність виробів, то можливий варіант попадання оптимальних ТП і в область А. При жорстких обмеженнях вихідної дефектності оптимальні варіанти ТП розміщуються на границі областей С і D. Є можливість навіть встановити залежність між максимальними витратами і відповідним значенням вихідної дефектності.

Важливу додаткову інформацію при дослідженні реальних ТП можна отримати аналізуючи взаємне розміщення множини досліджуваних процесів відносно виділених областей. Тут можливі декілька ситуацій, які відображені на рис. 2.

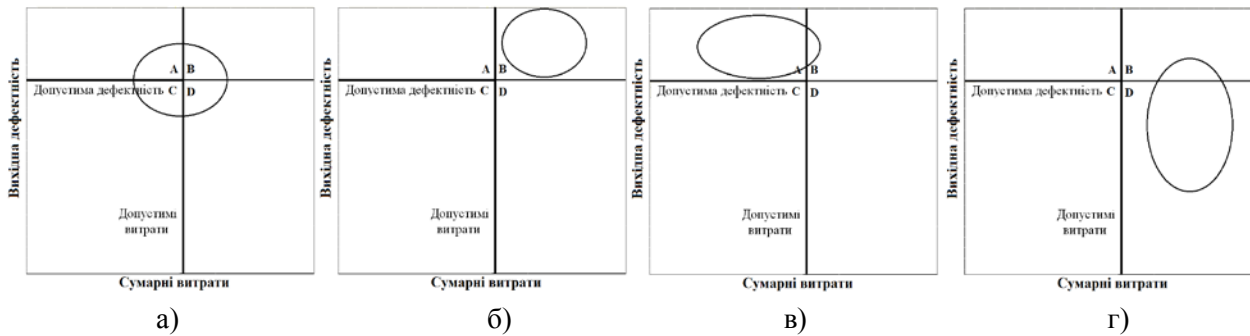


Рис. 2. Ілюстрація практичних варіантів оптимізаційних задач: а) класичний варіант оптимізації; б) відсутність оптимальних розв'язків; в) варіант "дешевих дефектів"; г) забезпечення якості за будь-яку ціну

Основною і найбільш поширеною є ситуація, коли існуючі варіанти ТП майже "рівномірно" попадають в усі чотири області оптимізаційної Парето-області (рис.2,а). Саме в цій ситуації є можливість вибрати оптимальний (раціональний) варіант ТП, який максимально врахував би особливості конкретного виробництва. Протилежною є ситуація, коли множина досліджуваних ТП займає лише область В (рис. 2,б). Це свідчить про те, що серед можливих варіантів ТП немає жодного, який би відповідав заданим вимогам щодо якості виробів та організації ТП в цілому. Така ситуація - це підтвердження низького рівня використовуваних технологічних рішень. Очевидно, що в цьому випадку слід шукати нових, більш сучасних і ефективних підходів до побудови ТП.

Можливі також і інші варіанти взаємного розміщення множини досліджуваних процесів відносно виділених областей, які відображені на рис. 2,в – рис. 2,г і аналіз яких також дозволяє сформулювати потрібні практичні висновки та рекомендації.

Практичною особливістю запропонованого методу оптимізації ТП є можливість побудови також інших оптимізаційних Парето-областей, наприклад, "сумарні витрати – імовірність введення дефектів на відповідних технологічних операціях", "сумарні витрати – імовірність пропуску дефектів із вхідного контролю" тощо. Положення відповідної точки на кожній із таких площин однозначно визначається значеннями глибини контролю на кожній контрольній операції, а також іншими параметрами математичної моделі ТП. Число можливих варіантів, як уже зазначалося, формується у вигляді протоколу досліджень ТП, який враховує можливість зміни глибини контролю на кожній контрольній операції, варіанти використовуваного технологічного та контрольного обладнання та інші фактори з максимальним врахуванням реальної ситуації для досліджуваного ТП. Аналізуючи положення кожної точки на всіх площинах, а також враховуючи всі можливі критерії, вимоги та обмеження, можна виділити оптимальну (раціональну) область розв'язків.

Як приклад, на рис. 3,а представлений варіант протоколу дослідження ТП виготовлення друкованих плат комбінованим позитивним методом, а на рис. 3,б – відповідна Парето-область. Із 18-ти наведених в протоколі варіантів контролю не всі можна практично реалізувати і тому цей приклад можна розглядати як ілюстрацію можливостей запропонованого методу. Бачимо, що лише частина варіантів ТП відповідають заданим вимогам (ті, які попадають в область С, тобто рівень дефектності та сумарних витрат менше допустимих значень). Серед них і будуть знаходитись потрібні (раціональні) розв'язки. В залежності від технічних вимог можуть бути використані і ті значення, які знаходяться і в областях А та D, відповідно варіант "дешевих дефектів" та забезпечення якості за будь-яку ціну.

Наведений на рис. 3 приклад – це приклад параметричної оптимізації, який передбачає підбір параметрів глибини контролю для кожної технологічної операції без зміни структури ТП. Якщо структурну оптимізацію ТП розуміти як вибір оптимальної структури ТП, то запропонований метод придатний також для вирішення задач структурної оптимізації ТП. Для цього кожен із варіантів ТП, які мають свої структури, або використовують різне обладнання достатньо представити як окремі технологічні процеси, сформулювати для них протоколи досліджень і після комплексних досліджень всіх варіантів вибрати найбільш вдалий. При цьому результати таких досліджень можна відображати як на одній Парето-області, так і на різних, наприклад, для різних структур ТП.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Csum	Pdef
1	0,7	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,5762	0,0938
2	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,4246	0,0886
3	2,8	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,5342	0,0879
4	1,4000	0,35	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,5709	0,0981
5	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,4246	0,0886
6	1,4000	1,4	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,6141	0,0824
7	1,4000	0,7000	0,35	0,5000	0,9000	0,7000	4,5013	0,0938
8	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,4246	0,0886
9	1,4000	0,7000	1,4	0,5000	0,9000	0,7000	4,5488	0,0861
10	1,4000	0,7000	0,7000	0,25	0,9000	0,7000	4,4995	0,0947
11	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,4246	0,0886
12	1,4000	0,7000	0,7000	1	0,9000	0,7000	4,5474	0,0786
13	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,45	0,7000	4,5215	0,1031
14	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,4246	0,0886
15	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	1,8	0,7000	4,5830	0,0816
16	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,35	4,4606	0,0886
17	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	0,7000	4,4246	0,0886
18	1,4000	0,7000	0,7000	0,5000	0,9000	1,4	4,5146	0,0886

а



б

Рис. 3. Приклад оптимізації 6-ти крокового ТП виготовлення друкованих плат: а – варіант протоколу дослідження; б – оптимізаційна Парето-площина ”сумарні витрати – вихідна дефектність”

При формуванні протоколів досліджень ТП в перелік досліджуваних процесів рекомендується обов’язково включати базові варіанти ТП (для них всі значення глибини контролю рівні одиниці) і оптимізовані варіанти, які отримуються після використання класичних методів оптимізації, використаних у [5, 6]. Ці варіанти ТП можуть, наприклад, займати перші стрічки протоколу досліджень – як найбільш важливі. Взагалі, чим більше число реальних ТП буде проаналізовано, тим повнішою буде інформація і більш обґрунтованим буде вибір оптимального варіанту ТП. Що стосується можливого числа варіантів досліджуваного ТП, то їх число суттєво залежить від ступеня деталізації ТП і складає від декількох десятків до сотень варіантів. Дослідження такої кількості ТП за запропонованою методикою не складає жодних труднощів.

Розробка програмного забезпечення. При розробці програмного забезпечення враховано, що запропонований метод оптимізації є одним із можливих в рамках вирішення загальної проблеми комплексної оптимізації виробничо-технологічних процесів виготовлення РЕА, для вирішення якої уже розроблений програмно-методичний комплекс ОПТАН. Враховуючи це, запропоновано створити окрему версію ОПТАНу з орієнтацією на вирішення задачі Парето-оптимізації.

Висновки та рекомендації. 1. Запропонований метод є універсальним, простим для практичного використання, не передбачає жодних обмежень на складність та призначення технологічних процесів, дозволяє проводити як параметричну, так і структурну оптимізацію ТП.

2. За результатами оптимізації в більшості випадків рекомендуються для реалізації декілька варіантів ТП. Цей факт дозволяє вибрати такий варіант, який максимально наближений до умов конкретного виробництва, враховує наявний парк технологічного і контрольного обладнання, ресурсні можливості підприємства, вимоги щодо якості виробів та передбачуваних сумарних витрат в цілому.

3. Для практичного використання методу повністю придатне раніше розроблене програмне забезпечення, яке відоме під загальною назвою "програмно-методичний комплекс ОПТАН". В рамках цього комплексу задача оптимізації технологічних процесів за допомогою оптимізаційних Парето-площин сформована для зручності у вигляді окремої задачі.

4. Результати досліджень рекомендуються для використання при оцінці ефективності існуючих варіантів ТП, пошуку шляхів їх удосконалення, підвищенні якості виробів в цілому, а також при розробці нових технологічних процесів, включаючи формування їх структури, підбір технологічного та контрольного обладнання тощо.

1. Бобало Ю. Я. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури / Ю.Я. Бобало, М.Д. Кіселичник, Л.А. Недоступ // За ред. Л.А. Недоступа. – Львів: ДУ

"Львів. політехніка", 1996.–168 с. 2. Недоступ Л. А. Забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристроїв шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва / Л.А. Недоступ, Ю.Я. Бобало, М.Д. Кіселичник, О.В. Лазько // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. – 2005. – № 534: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 45-51.

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

4. Bobalo Yu., Nedostup L., Nadobko O., Kiselychuk M., Lazko O. OPTAN - Software for Modelling, Analysis and Optimization of Electronic Devices Process Improvement // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – ISSN 0033-2097. - 2009. – R. 85. - NR 4. - P. 59-61.

5. Програмний комплекс для вирішення задач моделювання та оптимального керування процесами забезпечення якості радіоелектронної апаратури / Кіселичник М.Д., Надобко О.В., Недоступ Л.А., Чирун Л.В., Шестакевич Т.В. // АВТОМАТИКА / AUTOMATICS-2011.: матеріали конф., Львів - Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2011. – С. 394-395.

6. Надобко О.В. Методи оптимізації процесів забезпечення якості РЕА на стадії виготовлення / О.В. Надобко, Л.А. Недоступ, Л.В. Чирун, Т.В. Шестакевич // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. – 2011. – № 705: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 237-242.

7. Катренко А.В. Дослідження операцій: підручник / Катренко А.В.; за ред. В.В. Пасічника.- [2-ге видання]. – Львів: Магнолія – 2006,2007. – 480 с.