

СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРНО-СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

В статті здійснено огляд сучасного стану проблеми забезпечення заданого рівня характеристик якості структурно-складних технічних виробів, виходячи з еволюції підходів до її постановки і розв'язання. Проаналізовано переваги і недоліки існуючих методів забезпечення технологічності конструкцій та ефективності технологічних процесів виготовлення технічних виробів шляхом обґрунтованого вибору допусків відповідних первинних факторів, які гарантують забезпечення заданого рівня характеристик якості. Сформульовано нерозв'язані задачі.

The paper reviews the current state of the problem of providing a given performance level of structurally complex techware, based on the evolution of approaches to its setting and resolution. The study is focused on the advantages and disadvantages of existing methods of technological design and efficiency of technological processes of techware production by reasonable choice of tolerances of appropriate primary factors that guarantee a given quality level. Unsolved problems have also been formulated.

Ключові слова: аналіз, синтез, допуски, фактори, зворотна задача, некоректно поставлена задача, погано обумовлена система рівнянь, багатомодальний закон розподілу.

Вступ

В широкому розумінні, якість виробу – це сукупність його властивостей, що обумовлюють придатність виробу задовольняти певні потреби відповідно до його призначення. Під якістю технічних виробів розуміють відповідність вихідних характеристик досліджуваних об'єктів нормативним рівням їх значень. Питання забезпечення якості технічних виробів на різних етапах проектування і виробництва розглянуті у численних вітчизняних і закордонних роботах та монографіях. Частина їх повністю присвячена вказаній проблемі, інші торкаються лише деяких її аспектів.

Однією з основних задач, пов'язаних із забезпеченням технологічності конструкцій і ефективності технологічних процесів виготовлення технічних виробів, є обґрунтований вибір таких допустимих відхилень від номінальних значень (допусків) відповідних первинних факторів, які для конкретних техніко-економічних і організаційних умов серійного виробництва конструктивно і технологічно гарантують отримання вихідних характеристик виробу у передбачених ТУ межах.

Аналіз методів розв'язку задачі

Описані в літературі методи розв'язку вказаної задачі можна поділити на три основні групи, що відповідають еволюції підходів до її постановки. Розробка і розвиток методів, що відносяться до кожної з груп, історично були обумовлені ростом рівня складності систем, їх конструкцій і, відповідно технологічних процесів їх виготовлення, ускладненням умов експлуатації і задач, що ними виконуються, а також досягнутим на відповідному етапі рівнем розвитку обчислювальної техніки, засобів виробництва і ступенем автоматизації. Характерною відмінністю методів однієї групи від іншої є конкретні цілі, що ставляться перед дослідниками і розробниками об'єктів на тому чи іншому етапі, а також засоби їх досягнення.

Охарактеризуємо методи кожної з цих груп. При цьому для отримання найповнішого уявлення про стан проблеми технологічності виробів і ефективності технологічних процесів їх виробництва поряд з методами синтезу допусків розглянемо і методи їх аналізу, а також інші питання, пов'язані з особливостями практичної реалізації кожного типу вказаних методів.

До *першої групи* можуть бути віднесені методи одержання будь-якого з можливих сполучень допусків на первинні фактори об'єктів, їх конструкцій і технологічних процесів їх виготовлення, що забезпечують їх працездатність, точність, надійність та інші характеристики якості. У відповідності до способів одержання розв'язку представники цієї групи можуть бути поділені на *розрахунково-експериментальні, розрахунково-аналітичні і статистичні методи*.

До *розрахунково-експериментальних* відносять методи граничних і матричних випробувань.

Метод граничних випробувань [1, 2, 3] дозволяє розв'язувати як задачу аналізу, так і синтезу допусків, базується на визначенні розрахунковим шляхом граничного параметра, тобто того з первинних факторів, який найбільше впливає на вихідну характеристику, і побудові за результатами випробувань області працездатності в просторі двох первинних факторів (граничного параметра і будь-якого з решти факторів). Даний метод отримав широке застосування завдяки наочності і відносно простій реалізації. Тим не менше він має суттєвий недолік – проведення досліджень значень вихідної характеристики при одночасній зміні лише двох первинних факторів.

Метод матричних випробувань позбавлений цього недоліку і є подальшим розвитком і вдосконаленням попереднього методу [1]. Його суть полягає в моделюванні області стійкої роботи виробу при випробуваннях при всіх значеннях первинних факторів. Перевагою цього методу є можливість визначення допусків на первинні фактори з врахуванням їх взаємного впливу на вихідну характеристику. До

недоліків слід віднести трудомісткість і громіздкість обчислень при дослідженні вихідних характеристик, які залежать від великої кількості первинних факторів.

Загальним недоліком *розрахунково-експериментальних* методів є те, що при їх використанні процес визначення і відпрацювання допусків починається на підготовчому етапі і продовжується на всіх етапах проектування, а подальше уточнення допусків проводиться в процесі серійного виробництва і експлуатації. З розвитком складних об'єктів деякі етапи налаштування, на яких забезпечувалась відповідність вихідних характеристик заданим вимогам, стають взагалі нездійсненним.

Отже, вимоги визначення допусків на етапі вибору і розрахунок конструкції виробу обумовили перехід від емпіричного способу їх встановлення до розрахункового.

Розрахунково-аналітичний метод визначення допусків обумовлює встановлення залежностей, по-перше, між вихідними характеристиками об'єкту і їх первинними факторами (*математичних моделей*), і, по-друге, зміни вихідних характеристик виробів або їх вузлів від розкиду первинних факторів. Зупинимось докладніше на способах встановлення кожного з вказаних видів залежностей.

Питаннями побудови математичних моделей об'єктів і технологічних процесів їх виготовлення, що відображають залежності їх вихідних характеристик від первинних факторів, присвячена достатньо велика кількість робіт, наприклад [4–7], а також приділяється увага практично в кожній роботі, в якій розглядаються проблеми проектування, точності, надійності технічних виробів [1, 8–12], адже адекватність математичних моделей реальним об'єктам і процесам є однією з основних умов ефективного використання будь-яких розрахункових методів забезпечення якості на етапах проектування і виробництва.

В роботах [8, 4, 7, 9, 13–16], присвячених загальним проблемам моделювання, розглядаються різноманітні варіанти класифікації математичних моделей, основні принципи їх побудови, головні властивості, вимоги до них та інші питання.

Поклавши в основу класифікації способи побудови математичних моделей, їх можна поділити на *аналітичні (детерміновані)* і *статистичні*.

Аналітичні моделі, одержання яких вимагає знань особливостей внутрішніх процесів досліджуваного об'єкту або процесу, можуть бути запозичені з літератури або з числа вже розроблених схем аналогічних об'єктів [10], або ж вимагають проведення спеціальних досліджень.

Слід відмітити, що не завжди можна розробити розрахункову модель, яка б достатньо точно описувала реальний об'єкт, чисто аналітичними методами. Так, за умови значної складності об'єкта, така задача стає або дуже складною, або отримана модель малопридатна для отримання конкретних результатів. В цьому випадку при наявності дослідного зразка застосовують один із відомих *експериментально-статистичних* методів, наприклад активного планування експерименту (АПЕ), пасивного експерименту та ін. Існуючі плани АПЕ дозволяють побудувати моделі у вигляді лінійних, неповних або повних квадратичних поліномів, а також поліномів третього порядку [17–22]. Порівняльна оцінка планів показує, що вони відрізняються один від одного порядком моделей, можливістю врахування ефектів взаємодії первинних векторів, обсягом експерименту і ступенем простоти його обробки, а також точністю отриманих результатів [23–34].

Практика планування експерименту отримала в наш час широке поширення. Однак, як зазначають автори [35], складність природи кидає свій виклик планування експерименту. З побудовою порівняно простих моделей все більш-менш нормально, але дослідники прагнуть будувати все складніші – багатопараметричні, нелінійні за параметрами моделі. Складності, які тут виникають, наприклад, через необхідність проведення занадто великої кількості експериментів для побудови математичних моделей об'єктів, що складаються з значної кількості каскадів, вузлів та деталей, настільки серйозні, що питання можливості зниження кількості вказаних експериментів стає питанням перспективності самого методу АПЕ.

Однією з основних вимог, що пред'являються до математичних моделей, є їх стійкість. Доцільно коротко зупинитись на самому понятті «стійкість», оскільки зміст, який інженер інтуїтивно в нього вкладає, часто дещо розходиться з визначеннями з підручників. Р. Белман охарактеризував «стійкість» як сильно переважаний термін з неусталеним визначенням [36], і це зауваження можна цілком і повністю віднести до даного поняття в проектуванні. У найширшому розумінні стійкість характеризує співвідношення між змінами збурюючих причин і змінами наслідків, що з них витікають. Незбурений процес називають стійким, якщо, зменшуючи причини, які викликають відхилення від нього, можна зробити наслідок меншим за довільні наперед задані величини. Строге визначення стійкості моделі за всіма або окремою групою первинних факторів наведене в [37]. Поняття стійкості тісно пов'язане з поняттям «коректності моделі» [38]. Причому, дуже часто в задачах з практичним значенням, приходять до некоректних моделей [39], які також називають «погано обумовленими».

Мірою обумовленості, наприклад, систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) є число обумовленості матриці системи, яке характеризує, в скільки разів відносна похибка величин, що визначаються, може перевищувати відносну похибку вхідних даних [9]. В роботі [40] наводиться інше трактування обумовленості матриці з імовірнісної точки зору. Якщо при розгляді системи вектор правої частини заданий точно, а елементи системи є незалежними випадковими величинами з однаковими дисперсіями, то число обумовленості показує, в скільки разів відношення середньоквадратичних похибок невідомих до середньоквадратичного самих невідомих перевищує відношення середньоквадратичних похибок елементів матриці до середньоквадратичного самих елементів.

Цілий ряд авторів пропонують різні характеристики обумовленості матриць [9, 41, 42]. У вказаних роботах приводяться приклади систем, число обумовленості яких досягає 20000. Однак при цьому зустрічаються лише деякі загальні якісні міркування фізичного характеру, які покликані збільшити точність розв'язку таких погано обумовлених систем. Питання стійкості тісно пов'язане з питанням вибору математичної моделі. В роботах [37, 41] показано, що стійкість розв'язків різко падає з ростом порядку системи. І в цьому полягає протиріччя, суть якого в тому, що прийнята лінійна модель тим точніше описує реальний об'єкт, чим більше різноманітних факторів, які впливають на його функціонування, вона враховує, тобто чим більше порядок системи; але в цьому випадку різко зростає похибка розв'язку. Це протиріччя є наслідком недосконалості прийнятої розрахункової моделі і підкреслює необхідність пошуку оптимального розрахункового варіанта, прийнятого з точки зору стійкості, який би дав задовільну точність опису об'єкта.

В роботі [43] розроблені методи, які базуються на представленні досліджуваного об'єкту у вигляді крупних каскадів, кожен з яких описується лінійною системою, дослідженні кожного каскаду окремо і далі – їх взаємодії. Така ідея, на жаль, може бути застосована не завжди, оскільки зазвичай реальний об'єкт не вдається представити у вигляді незалежних каскадів.

Математичній проблемі розв'язку погано обумовлених СЛАР або задач, які зводяться до їх розв'язку, присвячені роботи [38, 44–49] та ін.

В [49] Д. Філіпс пропонує евристичний підхід, суть якого полягає в пошуку замість точного розв'язку СЛАР, сімейства розв'язків, яке б задовольняло цю систему в межах похибки задання вихідних даних, і подальшому виборі єдиного значення на основі деякого критерію гладкості.

Загальний підхід до розв'язку СЛАР запропонований А.Н. Тихоновим (метод регуляризації). Він полягає в побудові згладжуючого функціонала і знаходження розв'язку, яке доставляє йому екстремальне значення [38]. Метод зводиться, фактично, до накладання обмеження на гладкість допустимого розв'язку, тобто відповідає заданню апріорної інформації про властивості розв'язку.

Відомі також методи підвищення стійкості розв'язків шляхом ортогоналізації строк і стовбців матриці, застосування певним чином побудованих ітераційних процесів і т.д. [42, 47], однак, як і метод регуляризації, вони не дають універсального підходу до розв'язку вказаних задач, оскільки для своєї реалізації потребують врахування індивідуальних особливостей матриці системи, як то достатньої кваліфікованої математичної кваліфікації виконавця, тривалості роботи на ЕОМ, врахування фізичної сутності системи, що не завжди може бути виконано, особливо у виробничих умовах.

З цих причин виникає задача розробки вільних від вказаних недоліків методів підвищення точності ідентифікації об'єктів, що описуються погано обумовленими лінійними моделями.

Як відмічалось раніше, розрахунковий метод визначення допусків передбачає встановлення, окрім розглянутих залежностей вихідних характеристик технічних об'єктів від їх первинних факторів, залежностей між їх розкидами (похибками). Визначення цього типу залежностей за умови, що математичні моделі вже побудовані, базується на основних положеннях теорії точності, розробленої Н.Г. Бруєвичем і Н.А. Бородачевим [50–55], узагальненої і розвинутої в роботах [56, 57].

Основними напрямками проблеми точності виробництва є дослідження виробничих похибок, обґрунтування розрахунку допусків, конструктивне і технологічне забезпечення розрахункової точності [57]. Розв'язок цих питань потребує в першу чергу дослідження законів розподілу виробничих похибок.

Слід відмітити, що дослідження законів розподілу представляє собою самостійну проблему. Її приходиться розв'язувати при ідентифікації технологічних процесів, розробці нормативної документації, контролі якості продукції, що випускається, прогнозуванні ресурсів виробів, що експлуатуються і в ряді інших задач забезпечення якості виробів, причому значення величин, що контролюються визначають випробовуючи дослідні зразки з наступною обробкою експериментальних матеріалів методами математичної статистики.

Найбільш загальною задачею математичної статистики є вибір статистичної моделі розподілу досліджуваних ознак, що містить оцінку невідомих законів розподілу і їх параметрів, перевірку статистичних гіпотез і т.д. Метою побудови статистичної моделі є представлення даних спостережень шляхом підбору апроксимуючого розподілу. Історично склалося так, що нормальний розподіл вважався майже всеохоплюючою статистичною моделлю через достатню загальні умови його появи [58]. Тому більшість статистичних критеріїв, методів і оцінок розроблені саме для цього випадку.

Між тим, таке положення речей не завжди відповідає дійсності. Так, наприклад, в [57] вказується, що нормальний закон розподілу похибок насправді може бути отриманий лише при виконанні значної кількості умов: у виборці представлена одна партія виробів, немає домінуючих причин виникнення похибок, не змінюється в часі кількість випадкових факторів, які обумовлюють виникнення похибок, всі випадкові фактори є взаємозалежними і т.д.

Наприклад, при виробництві часто відбувається зміщення партій деталей або відбір (відбракування) деталей або готових виробів із виробничих партій, що приводить до спотворення характеру розподілів [1, 57, 59-61] і появи усічених і багатомодальних законів розподілу.

В роботах [55, 57] представлені види таких розподілів і розв'язується задача визначення виду і параметрів результуючої кривої за заданими видами і параметрами складових законів розподілу. Однак при побудові статистичних моделей розподілу найважливішою представляється зворотна задача, оскільки структура отриманих при вибіркових спостереженнях даних, як правило, невідома. Це задача визначення

кількості, частки і параметрів кожної із підвбірок (партій, що змішуються) в загальній виборці (змішаному розподілі).

У нечисленних літературних джерелах, де розглядається питання визначення параметрів складових розподілів у суміші [39], зустрічаються два протилежних судження. Так, якщо у [57] стверджується, що багатомодальні розподіли поки що не вдавалось апроксимувати відомими законами, то у [39] вказано, що вмiлим усiченням i змішуванням відомих розподілів можна для даної емпіричної функції розподілу добре підібрати відповідну їй аналітичну функцію, правда, без опису способу такого підбору.

У важливості ж і необхідності вміння обробляти статистичні матеріали, які підкоряються багатомодальним законам розподілу, впевнені багато авторів [39, 59, 61], оскільки невміння працювати з такими статистичними матеріалами наносить колосальну шкоду виробництву через складність застосування науково обґрунтованих статистичних методів контролю і керування якістю продукції і перешкоджає впровадженню статистичних методів розрахунку виробів [1].

В роботах [62, 63] розглядається питання заміни ненормальних законів розподілу відносно невеликою кількістю нормальних складових для обчислення імовірності працездатності виробу, вираженої багатомірним інтегралом по ділянці працездатності від спільної функції розподілу імовірностей первинних факторів виробу. При цьому в [62] розбиття окремих законів розподілу імовірно сей на складові пропонується проводити шляхом прирівнювання моментів емпіричної і припустимої аналітичної функції розподілу імовірностей.

В [63] той же нормальний розподіл пропонується здійснювати, виходячи з умови мінімальної кількості складових, таким чином, щоб забезпечити задовільне узгодження суміші нормальних розподілів з результатами експерименту на основі критерію χ^2 або інших статистичних критеріїв.

Всі запропоновані підходи мають недоліки. По-перше, розглядаються суміші лише тільки нормальних законів, в той час, як можна було б змішувати і будь-які інші одно модальні закони розподілу імовірностей. По-друге, застосування ідеї, викладеної в [62], важко реалізується через складність визначення оцінок моментів третього і вище порядків, які, до того ж, дуже чутливі до крайніх елементів вибірки і піддаються суттєвим коливанням від вибірки до вибірки, тобто побудовані на їх основі статистичні моделі виявляються чутливими до індивідуальних особливостей вибірки. Вказаних недоліків позбавлений метод, в основу якого покладене наближення емпіричної функції розподілу аналітичної на основі критерію максимальної правдоподібності [64].

Незважаючи на високу теоретичну цінність, при розв'язку практичних задач всі описані методи зазвичай незастосовувані, оскільки суперпозиції (суміші) щільності імовірностей, як правило, задаються не графіками, а деякими кінцевими вибірками реалізації випадкової величини, що подаються у зручному для обробки вигляді, наприклад, у вигляді гістограми. Сама по собі гістограма дає можливість прогнозувати величину досліджуваного параметра лише на обмеженому інтервалі. Для побудови статистичної моделі розподілу і обґрунтованого прогнозування в області малих імовірностей необхідно наблизити її деякій аналітичній функції з продовженням останньої на числову вісь. Отже, вибір статистичної моделі розподілу визначається видом гістограми, який, в свою чергу, суттєво залежить від способу її побудови, і, особливо, від обраного кроку інтервалу значень.

Рекомендації з вибору кроку розбиття інтервалу значень досліджуваної випадкової величини, які є в літературі з теорії імовірностей і математичної статистики, носять чисто емпіричний характер. Зокрема Е.С. Вентцель [65] відмічає, що кількість кроків не має бути занадто великою (тоді ряд розподілу стає невиразним, і частоти виявляють в ньому нерівномірні коливання); з іншої сторони вона не має бути занадто малою (при малій кількості кроків властивості розподілу описуються статистичним рядом занадто грубо). В роботах [58, 61] теж дані рекомендації із вибору кількості інтервалів, але незважаючи на широке практичне використання вказаних рекомендацій, лишається відкритим питання обґрунтування вибору кроку розбиття інтервалу значень досліджуваної випадкової величини таким чином, щоб побудований статистичний ряд і гістограма відповідали дійсній структурі даних і забезпечували розкриття цієї структури, зокрема, наявності суміші розподілів.

Виходячи з основних напрямів теорії точності, розглянемо принципи побудови рівнянь похибок, на яких в свою чергу базуються методи розрахунку допусків. Розрізняють статистичний і розрахунково-аналітичний підходи до складання рівнянь похибок [57].

Розрахунково-аналітичний підхід [57, 66, 67] базується на розкладанні функції залежності вихідної характеристики виробу або процесу від його первинних факторів в ряд Тейлора в колі номінальної точки з точністю до лінійних членів і подальшому переході від абсолютних похибок до відносних. Коефіцієнти розкладання є основними якісними показниками параметричної чутливості виробу до зміни його первинних факторів і називаються функціями чутливості (ФЧ). На сьогодні в теорії параметричної чутливості [1, 68–70] розроблені методи знаходження ФЧ як для аналітичних, так і для інших видів математичних моделей.

Метод «максимум-мінімум» [57, 66] передбачає арифметичне сумування всіх граничних відхилень первинних факторів, при якому окремо складаються всі додатні, окремо – всі від'ємні відхилення. Недоліком цього методу є одержання перебільшених (у 1,5...10 разів) значень виробничих похибок вихідних характеристик при всіх різноманітних, але достатньо реальних комбінаціях відхилень первинних факторів.

Недоліком методу квадратичного складання [57], який полягає у обчисленні кореня квадратного із суми квадратів відхилень первинних факторів, є складність врахування і правильного сумування величин,

які характеризують центри групування, а також квадратичного сумування граничних, а не середньоквадратичних відхилень, що приводить до одержання занижених (приблизно у 6 разів) результатів.

Метод моментів [57, 67, 68] базується на дослідженні виробничих похибок первинних факторів як випадкових величин, що підкоряються нормальним законам розподілу імовірностей. Він передбачає алгебраїчне сумування математичних сподівань і квадратичного сумування середньоквадратичних відхилень (для незалежних первинних факторів) цих законів з метою отримання параметрів нормального закону розподілу вихідної характеристики.

Статистичний підхід дозволяє прийти до певних висновків, але не дозволяє виявити причинні залежності. Крім того, він може застосовуватись лише у випадку нормальних законів розподілу імовірностей первинних факторів.

Одержані описаними методами співвідношення теорії точності дозволили розробити методи аналізу допусків, що базуються на переході від рівнянь похибок до рівнянь допусків [57]. Такий підхід здійснюється заміною відносних і абсолютних похибок допусками, що характеризуються половиною поля допуску і координатою середини поля допуску. Такими методами аналізу допусків в повній мірі притаманні всі описані недоліки методів аналізу виробничих похибок.

Необхідно відмітити і поширені на практиці методи статистичних випробувань [72-74]. Найбільш прийнятним з них є метод статистичного аналізу – Монте-Карло, прийнятний для оцінки імовірності знаходження вихідних характеристик виробу в області працездатності при заданих обмеженнях на вихідні характеристики і відомій функції багатовимірної щільності імовірності розподілу первинних факторів виробу. Застосування цього методу ускладнено через застосування багатовимірної функції щільності імовірності сумісного розподілу первинних факторів, яка, як правило, невідома або важко визначається.

На описаних різноманітних методах аналізу допусків і положеннях теорії точності базуються методи синтезу допусків. Слід відмітити, що задача аналізу допусків є однозначною, задача ж синтезу допусків [75], яка є оберненою до задачі аналізу, є математично недовизначеною, має безліч розв'язків, тобто безліч можливих сполучень допусків або параметрів законів розподілу первинних факторів, що забезпечують заданий розкид значень вихідної характеристики. Отже, розрахунок допусків на первинні фактори конструкцій або технологічних процесів їх виготовлення лише на основі методів «максимума-мінімуму», квадратичного складання і моментів [52,57,76], відбувається підбором шуканих величин шляхом послідовного наближення в наступному порядку. На основі рівнянь допусків відповідно до вказаних методів їх аналізу, досліджується ступінь впливу похибок первинних факторів на похибки вихідних характеристик і, виходячи із відомих допусків на вихідні характеристики, вибираються допуски на первинні фактори. Далі розв'язується задача аналізу допусків, і у випадку, якщо розрахункове значення поля допуску більше заданого значення, то розрахунок повторюється. Таким чином, описані методи синтезу допусків з умови точності вимагають проведення громіздких обчислень без гарантії отримання задовільного результату на кожному текучому етапі процесу послідовних наближень. Крім того, застосування цих методів може призводити до отримання недоцільних (неоптимальних) з економічної, виробничої та інших точок зору.

Між тим, теорія точності слугувала основою, на якій розвивались методи розрахунку допусків **другої групи**. Методи цієї групи дозволили перейти до більш відповідального і важливого етапу комплексного вивчення похибок з метою не тільки аналізу і викриття причин, що їх породжують, але і відшукування шляхів керування процесом і переходу до оптимального синтезу похибок в реальних умовах виробництва. Отже, метою застосування методів другої групи є вибір раціональної системи допусків на первинні фактори виробів, а також технологічних процесів їх виготовлення з умов точності на їх вихідні характеристики і оптимальності обраних техніко-економічних показників [62, 71, 77]. З цієї причини, що методи цієї групи використовують співвідношення теорії точності, для них характерні всі ті ж труднощі, пов'язані з дослідженням виробничих похибок, побудови математичних моделей і забезпечення їх стійкості, що і для методів першої групи.

В постановочному плані методи оптимізації допусків розрізняються типами вибраних критеріїв оптимальності, які можна поділити на статистичні і детерміновані, видами і кількістю лімітованих факторів, а також типом використаних співвідношень теорії точності.

Більшість робіт присвячено вибору раціональної системи допусків за критерієм вартості [62, 77-83]. Так, наприклад, в [84] розглядається задача визначення такої системи допусків на первинні фактори, яка вибирається із умови забезпечення заданих допусків на вихідну характеристику і мінімізує функцію вартості. При цьому необхідне існування достатньо гладкої функціональної залежності для вихідної характеристики об'єкту від параметрів окремих деталей і вузлів. В [78] та ж задача розв'язується у дискретному просторі з додаванням одного ліміту чого фактора – досягнення заданого рівня параметричної надійності, що оцінюється імовірністю попадання вихідної характеристики в межі допуску. Для розв'язку обох задач передбачається використовувати метод найкращих приростів, який є модифікацією градієнтного методу оптимізації. В [80] розглянуто застосування методу динамічного програмування для визначення оптимального сполучення допусків елементів на базі існуючих класів точності при мінімальній вартості виробів (для дискретної функції вартості) і заданих обмеженнях на допуски за її вихідними характеристиками, в [81] для розв'язку аналогічної задачі використовується симплекс-метод. В [82] і [83] розглядаються задачі вибору механічної системи допусків за критерієм вартості при, відповідно, лінійній та нелінійній залежностях вартості обробки від величини допуску, для розв'язку яких застосовуються методи лінійного програмування.

Всі перераховані підходи до розв'язку задач оптимізації допусків за критеріями вартості потребують для кожного з первинних факторів попереднього виявлення кількісної залежності вартості його формування від можливих поточних значень допусків. При всіх своїх перевагах ці методи не отримали широкого практичного застосування саме через відсутність в розпорядженні конструкторів і технологів вказаних достовірних техніко-економічних залежностей.

Традиційний підхід до розв'язку задач вибору номінальних значень первинних факторів і допусків на ці фактори описаними методами полягав у їх роздільній постановці і розв'язанні на різних етапах проектування без необхідного врахування ступеня критичності вихідних характеристик до варіації первинних факторів при виборі базового варіанта виробу. Такий стан проблеми обумовив недостатнє та (або) несвоєчасне відпрацювання основних питань точності технологічних процесів виготовлення виробів, мірою яких є допуски. Лише останнім часом з'явилися методи, які враховують жорсткий взаємозв'язок питань забезпечення необхідної точності технологічних процесів зі специфікою конструктивних рішень, які приймаються на стадії проектування. В цих методах, які відносяться до третьої групи, визначення номінальних значень первинних факторів практично пов'язано з методами інженерної реалізації оптимальних рішень.

Аналізуючи методи **третьої групи**, необхідно відмітити, що в літературі визначаються два типи критеріїв оптимальності [85].

До першого з них відносяться процент виходу придатних виробів та імовірність працездатності виробів при зміні його первинних факторів, які необхідно максимізувати. Ці критерії характеризують оптимальність виробу для виробника.

Другий тип критеріїв характеризує оптимальність виробу для споживача. Тут важливо, щоб вихідні характеристики знаходили якомога далі від меж ділянки працездатності і якомога повільніше в часі просувались до цих меж. Оскільки для проектного виробу зазвичай невідома швидкість цього руху, то зазвичай критерій максимальної надійності (який характеризує імовірність того, що протягом певного часу параметри виробу не вийдуть за межі працездатності) замінюють критерієм максимально віддалення параметрів від меж ділянки працездатності без врахування відмінностей у швидкостях руху параметрів до цих границь. Однак ці задачі розроблені лише в постановочному плані [85], або для їх розв'язку застосовується вдосконалений метод проб і помилок [86].

Слід особливо відмітити роботу [9], в якій описаний метод "центрування" розв'язку і призначення допусків для одночасного розв'язку задач вибору номінальних значень первинних факторів f допусків на них. Задача вибору номінального проекту ставиться як задача оптимізації працездатності виробу при зміні його первинних факторів. Оптимізація допусків за критерієм вартості ставиться у відповідність вписуванню в ділянку працездатності деякого тіла при регулюванні допусків так, щоб мінімізувати вартість. Розв'язок цієї задачі передбачає зведення її до задачі лінійного програмування шляхом кусково-лінійної апроксимації ділянки працездатності та функції вартості і подальший її розв'язок симплекс-методом. Позитивною відмінністю запропонованого у [9] підходу від згадуваних раніше є оптимізація допусків за критерієм вартості при накладанні обмежень на самі вихідні характеристики, а не на їх допуски, оскільки перехід від рівнянь зв'язку вихідних характеристик з первинними факторами до рівнянь їх допусків пов'язаний з внесенням певних похибок. При всіх перевагах даного методу застосування його на практиці ускладнено, по-перше, через складність математичного апарата кусково-лінійної апроксимації ділянки працездатності і функції вартості при великій розмірності простору первинних факторів і, по-друге, через відсутність достовірних техніко-економічних, а також статистичних залежностей.

Найбільш загальний підхід до проблеми ціленапрявленого покращення якості виробів з врахуванням ступеня відхилення первинних факторів виробів від їх номіналів і вибору конструктивного виконання окремих елементів і технологічного процесу сформульований у [87]. Тут поставлена проблема формулюється у загальному випадку як задача параметричної оптимізації деякого узагальненого функціоналу, яка містить забезпечення максимальної працездатності виробу за рахунок вибору оптимального конструктивно-технологічного рішення, максимального виходу придатних виробів, мінімального значення техніко-економічного показника, який характеризує вартість при вибраному конструктивно-технологічному виконанні. Пошук значень вектору конструктивних параметрів здійснюється модифікованим методом моментів в обмеженій ділянці, яка є перетином ділянок фізичної реалізації, конструктивно-технологічних обмежень і обмежень, що накладаються зовнішніми збудниками. Однак на практиці цей метод не отримав широкого поширення через необхідність використання важко встановлювальних техніко-економічних залежностей.

Висновки

Проведений огляд дозволяє зробити висновок про те, що на сьогодні забезпечення заданого рівня характеристик якості при конструюванні і виробництві технічних об'єктів суттєво ускладнюється через наступні причини.

По-перше, поки що явно не завершена розробка загального методу розв'язку задач вибору оптимальних значень первинних (вхідних) параметрів, виходячи з обмежень, які накладаються на основні показники якості (надійність, точність, чутливість до технологічних та експлуатаційних збудників, масо-габаритні характеристики та ін.), отримання конструктивно, технологічно і економічно обґрунтованих допусків на вхідні параметри при заданих в технічних вимогах допустимих відхиленнях на вихідні

характеристики за відомих масштабів серійного виробництва.

По-друге, не в повному обсязі розв'язані теоретичні та практичні аспекти синтезу конструктивних варіантів технічних виробів, які б володіли оптимальною чутливістю до виробничих і експлуатаційних відхилень первинних факторів.

По-третє, недостатня надійність низки технологічних процесів виготовлення сучасних технічних виробів буває обумовлена відсутністю або складністю одержання наглядних і коректних математичних моделей, які відбивають вплив конструктивних і технологічних факторів на показники якості виробів.

Розв'язок цих задач вимагає додаткових досліджень багатьох питань, які мають самостійне значення в теорії і практиці конструювання і виробництва технічних виробів. До таких питань відносяться, наприклад, розробка принципів оперативної побудови математичних моделей технічних виробів, що містять незалежні каскади, вузли і елементи, розробка статистично-детермінованого методу отримання ефективних математичних моделей об'єктів дослідження, розробка методу побудови гістограм та обробки статистичних матеріалів з багатомодальними законами розподілу, розробка методу отримання розв'язків з наперед заданою точністю для погано обумовлених систем рівнянь.

Література

1. Лопухин В.А. Обеспечение точности электронной аппаратуры: Конструкторско-технологические методы / В.А. Лопухин. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отд-ние, 1980. – 269 с.
2. Малинский В. Д. Испытания аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов : справочник / В.Д. Малинский, В.Х. Бегларян, А.Г. Дубицкий. – М. : Машиностроение, 1993.
3. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств / Юрий Николаевич Кофанов. – М. : Радио и связь, 1991. – 360 с.
4. Математическое моделирование радиоэлектронных устройств / [Ильин В.Н. и др.]. – М. : Знание, 1974. – 64 с. – (Новое в жизни, науке и технике. Радиоэлектроника и связь ; вып. 12).
5. Применение методов теории планирования многофакторных экспериментов в технологии машиностроения / [Ю.М. Зубарев, К.Н. Нечаев, В.И. Катенев, Г.А. Шишов]. – СПб : ПИМаш, 2000. – 130 с.
6. Применение многофакторных экспериментов второго порядка в технологии машиностроения / [Ю.М. Зубарев, К.Н. Нечаев, В.И. Катенев, Н.Н. Ревин]. – СПб : ПИМаш, 2002. – 134 с.
7. Левин А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А.И. Левин. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
8. Сотеков В.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / В.С. Сотеков – М. : Высшая школа, 1970. – 270 с.
9. Петренко А.И. Основы автоматизации проектирования / А.И. Петренко. – К. : Техніка, 1982. – 295 с. – (Б-ка инженера).
10. Волков В.М. Микроэлектроника / В.М. Волков, А.А. Иванько, В.Ю. Лапий ; ред. В.Ю. Лапий – К. : Техніка, 1983. – 263 с. – (Б-ка инженера).
11. Koucky M. Exact reliability formula and bounds for general k-out-of-n systems / M. Koucky // Reliability Engineering and System Safety. – 2003. – № 82. – С. 229–231.
12. Sun X.L. A convexification method for a class of global optimization problems with applications to reliability optimization / Sun X.L., McKinnon K.I.M., Li D. // Journal of Global Optimization. – Volume 21. – Number 2. – С. 185–199.
13. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем : [учебник для вузов] / В.П. Тарасик. – Минск : Дизайн-ПРО, 2004. – 640 с.
14. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств : учеб. для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М. : Высшая школа, 1991. – 400 с.
15. Gainsburg, J. The mathematical modeling of structural engineers / J. Gainsburg, // Mathematical Thinking and Learning. – 2006. – № 8(1). – С. 3–36.
16. Kai Velten. Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers / Kai Velten. – Wiley-VCH, 2009. – 348 p.
17. Адлер Ю.П. Обзор прикладных работ по планированию эксперимента / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский – М. : Изд-во МГУ, 1967. – 96 с.
18. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 207 с.
19. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс ; [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1967. – 406 с.
20. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Адлер Ю.П. – М. : Metallurgiya, 1969. – 330 с.
21. Anderson V.L. Design of Experiments. A Realistic Approach / V.L. Anderson, R.A. McLean – N.Y. : Marcel Dekker Inc., 1974. – 250 p.
22. Peter Goos. Optimal Design of Experiments. A Case Study Approach / Peter Goos, Bradley Jones. – A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2011. – 287 p.
23. Мирселян Б.Г. Математическое планирование эксперимента при разработке и анализе сложных электронных схем / Б.Г. Мирселян и др. // Проблемы планирования эксперимента : сб. ст. – М. : Наука, 1969.

– С. 33–38.

24. Бахвалов Л.А. Применение методов математического планирования эксперимента при анализе радиоэлектронных схем / Л.А. Бахвалов // Методы разработки РЭА : сб. I. – МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1970. – С. 23–26.

25. Сахаров Ю.С. Применение многофакторного планирования эксперимента для выбора параметров радиоэлектронных схем / Ю.С. Сахаров // Методы разработки РЭА : сб. I. – МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1970. – С. 8–13.

26. Дьякова Н.С. Применение методов ранговой корреляции для обработки качественной информации / Н.С. Дьякова, Г.К. Круг // Труды МЭИ. – М. : МЭИ, 1966. – Вып. 67. – С. 66–68.

27. Мешалкин Л.Д. К обоснованию метода случайного баланса / Л.Д. Мешалкин // Зав. лаборатория. – 1970. – № 3.

28. Dieter Rasch. Optimal Experimental Design with R / Dieter Rasch, Jürgen Pilz, Rob Verdooren, Albrecht Gebhardt. – Taylor & Francis Group, 2011. – 317 p.

29. Karl Siebertz. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) / Karl Siebertz, David van Bebber, Thomas Hochkirchen. – London. New York : Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. – 326 p.

30. Голикова Т.И. Свойства D оптимальных планов и методы их построения / Т.И. Голикова, Н.Г. Микешина // Новые идеи в планировании эксперимента. – М. : Наука, 1969. – С. 100–103.

31. Беленький В.З. Планирование эксперимента в радиодеталестроении и микроэлектронной технике / В.З. Беленький и др. // Информационные материалы АН СССР. Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика». – М. : ВИНТИ, 1970. – № 8/45. – С. 43–44.

32. Raymond M. Brach. Design of experiments and parametric sensitivity of planar impact mechanics / Raymond M. Brach. – 2007.

33. Власов Л.Г. Применение методов планирования экстремальных экспериментов в производстве резисторов / Л.Г. Власов и др. // Материалы II Всесоюзной конференции по планированию эксперимента – М., 1968. – С. 82–83.

34. Маркова Е.В. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / Е.В. Маркова, А.В. Лисенков – М. : Наука, 1973. – 221 с.

35. Налимов В.В. Логические основания планирования эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голикова. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Металлургия, 1981. – 152 с.

36. Белман Р. Теория устойчивости решений дифференциальных уравнений / Р. Белман. – М. : Изд. ИЛ, 1954. – 300 с.

37. Ройзман В.П. Некоторые вопросы теории балансировки гибких роторов / В.П. Ройзман, Л.Д. Вайнгортин // Упругие и гидроупругие колебания элементов машин и конструкций. – М. : Наука, 1979. – С. 55–63.

38. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – [2-е изд.]. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 284 с.

39. Райнкше К. Модели надежности и чувствительности систем / К. Райнкше ; [пер. с нем.]. – М. : Мир, 1979. – 452 с.

40. Гусаров А.А. Балансировка роторов машин : в 2 т. т. 1 / А.А. Гусаров – М., 2004. – 267 с.

41. Микунис С.И. Вынужденные колебания и уравновешивание гибких роторов турбогенераторов : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / С.И. Микунис. – М. : МЭИ, 1967. – 18 с.

42. Бахвалов Н.С. Численные методы: Анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М. : Наука, 1973. – 631 с.

43. Банах Л.Я. Упрощение расчетных схем динамических систем / Л.Я. Банах // Колебания и динамическая прочность элементов машин. – М. : Наука, 1976. – С. 13–14.

44. Павлов А.С. О решении плохо обусловленных линейных систем итерационными методами / А.С. Павлов, Л. Ф. Юхно // Матем. моделирование. – 2004. – 16:7. – С. 13–20

45. Xue X.J. A Direct Algorithm for Solving Ill-Conditioned Linear Algebraic Systems / X.J. Xue, K.J. Kozaczek, S.K. Kurtz, D.S. Kurtz // JCPDS-International Centre for Diffraction Data 2000, Advances in X-ray Analysis. – Vol. 42. – P. 629–633.

46. Hoang N.S. Solving ill-conditioned linear algebraic systems by the dynamical systems method (DSM) / N.S. Hoang and A.G. Ramm // Inverse Problems in Science and Engineering, 16. – 2008. – № 5. – P. 617–630.

47. Иванов В.К. Теория линейных некорректных задач и ее приложения / В.К. Иванов, В.В. Васин, В.П. Танана. – М. : Наука, 1978. – 206 с.

48. Стахов В.Н. Обобщение вариационных методов М.М. Лаврентьева и А.Н. Тихонова регуляризации систем линейных алгебраических уравнений с приближенно заданной правой частью, обеспечивающие потребности гравиметрии и магнитометрии / В.Н. Стахов // Геофизический журнал. – 2002. – № 5. Т. 24. – С. 3–8.

49. Phillips D.L. A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind / D.L. Phillips // J. Assoc. Comput. Mach. – 1962. – 9. – № 1. – P. 84–97.

50. Бородачев Н.А. Обоснованные методики расчета допусков и ошибок кинематических цепей : в 2 ч. / Н.А. Бородачев. – М. : Изд-во АН СССР, 1943–1946.

51. Бруевич Н.Г. Надежность, долговечность, точность / Н.Г. Бруевич // О надежности сложных технических систем. – М. : Сов. Радио, 1966. – С. 113–118.

52. Бруевич Н.Г. О надежности и точности автоматического производства / Н.Г. Бруевич // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. – 1959. – № 4.
53. Бруевич Н.Г. Современные направления учения о точности в машиностроении и приборостроении / Н.Г. Бруевич // Теоретические основы конструирования машин. – М. : Машгиз, 1957. – С. 32–35.
54. Бородачев Н.А. Анализ качества и точности производства / Н.А. Бородачев. – М. : Машгиз, 1946. – 252 с.
55. Бородачев Н.А. Основные вопросы теории точности производства / Н.А. Бородачев – М. : Изд-во АН СССР, 1950. – 416 с.
56. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре / А.В. Михайлов – М. : Сов. Радио, 1970. – 215 с.
57. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры / [под ред. В.П. Гусева и А.В. Фомина]. – М. : Сов. Радио, 1963. – 367 с.
58. Плескунин В.И. Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте / В.И. Плескунин, Е.Д. Воронина ; под. ред. А.В. Башарина. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1979. – 232 с.
59. Гусев В.П. Технология аппаратостроения / В.П. Гусев. – М. : Высшая школа, 1972. – 494 с.
60. Точность производства в машиностроении и приборостроении / [под ред. А.Н. Гаврилова]. – М. : Машиностроение, 1973. – 567 с.
61. Гаврилов А.Н. Основы технологии приборостроения / А.Н. Гаврилов. – М. : Высшая школа, 1976. – 328 с.
62. Иьуду К.А. Оптимизация устройств автоматики по критерию надежности / К.А. Иьуду. – М. : Л. Энергия, 1966. – 194 с.
63. Методика расчета надежности изделий с учетом постепенных отказов. – М. : Гос. ком. стандартов Сов. Мин. СССР, 1976. – 33 с.
64. Захарова Т.Н. К вопросу о статистической природе усталостной повреждаемости сталей и сплавов / Т.Н. Захарова // Проблемы прочности. – М., 1974. – № 4.
65. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
66. Справочник по надежности : 2 т. / [под ред. Б.Е. Бердичевского ; пер. с англ.]. – М. : Мир, 1970. – 304 с.
67. Допуски в РЭА / [А.В. Фомин и др.]. – М. : Сов. радио, 1973. – 138 с.
68. Теория чувствительности и ее применение // Вопросы кибернетики / [под общ. ред. Р.М. Юсупова]. – М. : Связь, 1977. – Вып. 23. – 188 с.
69. Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем // Тезисы докладов всесоюзной НТК. – М. : Связь, 1978. – 233 с.
70. Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях / [Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Журавский В.Г., Гольдин В.В.]. – М. : Радио и связь, 2000. – 226 с.
71. Мевис А. Ф. Допуски и посадки деталей радиоэлектронной аппаратуры : справочник / Мевис А. Ф., Несвижский В. Б., Фефер А.И. ; под ред. О. А. Луппова. – М. : Радио и связь, 1984. – 152 с.
72. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей / А.Н. Колмогоров. – М. : Изд-во АН СССР, 1941. – (Изв. АН СССР : Математика : т. 5, № 1).
73. Беккер П. Проектирование надежных электронных схем / П. Беккер, Ф. Йенсен ; [пер. с англ. / под ред. И.А. Ушакова]. – М. : Сов. радио, 1977. – 256 с.
74. Binder K. Monte Carlo Simulation in Statistical Physics, An Introduction / K. Binder and D.W. Heerman – Berlin, Springer-Verlag. 1992. – 129 p.
75. Фомин А.В. Надежность полупроводниковых устройств летательных аппаратов / Фомин А.В. – М. : Машиностроение, 1968. – 267 с.
76. Рамеев Б.И. Об одном методе расчета надежности элементарных схем дискретного действия / Б.И. Рамеев // Пути развития советского математического машиностроения и приборостроения : материалы конференции, 1956. – С. 13–15.
77. Кофанов Ю.Н. Точность и параметрическая чувствительность РЭА: Обзор задач и методов / Ю.Н. Кофанов // Точность РЭА : материалы семинара. – М. : МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1971. – Ч. I. – С. 28–29.
78. Белецкий В.В. Оптимальный выбор допусков РЭА градиентным методом в дискретном пространстве / В.В. Белецкий и др. // Точность РЭА : материалы семинара / МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. – М., 1971. – Ч. 2. – С. 3–6.
79. Кожевников А.М. Методы оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов : дис. ... доктора физ.-мат. наук / Кожевников А.М. – М., 2004. – 274 с.
80. Алексеев О.Г. Выбор оптимальных допусков на элементы аппаратуры / О.Г. Алексеев, С.М. Гаев // Изв. АН СССР : Техническая кибернетика – М., 1968. – № 4. – С. 183–189.
81. Дендобренко Б.Н. О выборе системы электрических допусков радиоаппаратуры / Б.Н. Дендобренко, Б.П. Панушкин // Изв. ВУЗов : Приборостроение. – М., 1968. – № 3. – С. 1–8.
82. Дунаев П.Ф. Методика расчетов рациональных допусков / П.Ф. Дунаев // Станки и инструмент. –

1952. – № 6.

83. Юдин Д.Б. Задачи и методы линейного программирования / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М. : Сов.радио, 1961. – 203 с.

84. Белецкий В.В. Оптимизация выбора допусков на параметры схем, элементов и узлов РЭА с использованием ЭЦВМ / В.В. Белецкий // Методы математического и физического моделирования и оптимизации параметров радиоэлектронной аппаратуры. – М. : МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1972. – Вып. I. – С. 43–47.

85. Ильин В.Н. Машинное проектирование электронных схем / Ильин В.Н. – М. : Энергия, 1972. – 280 с.

86. Туркельтауб Р.М. Методы исследования точности и надежности схем аппаратуры / Р.М. Туркельтауб. – М. : Энергия, 1966. – 160 с. – (Б-ка по автоматике ; вып. 198).

87. Деньдобренко Б.Н. О модификации метода моментов для выбора оптимальных конструктивных параметров гибридно-пленочных микроузлов / Б.Н. Деньдобренко и др. // Конструирование микроэлектронной аппаратуры : материалы краткосрочного семинара ; под ред. В.И. Смирнова. – Л. : ЛДНТП, 1976. – С. 34–38.

Надійшла: 17.10.2012 р.
Рецензент: д.т.н. Параска Г.Б.