

## ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу Шило Галини Миколаївни на тему: «Статистично-орієнтовані методи допускового проектування радіоелектронних пристроїв», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт до спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка»

**Актуальність теми.** Ускладнення функцій, які виконує сучасна радіоелектронна апаратура в усіх сферах людської діяльності, її власне ускладнення та подорожчання вимагають відповідного підвищення вимог до її якості. Функціональні і вартісні характеристики радіоелектронних пристроїв багато в чому визначаються уже на стадії їхнього проектування. Проте через недосконалість технологій виготовлення комплектуючих виникають відхилення їх характеристик від встановлених значень, що може суттєво впливати на функціональні характеристики кінцевих виробів. Це призводить до необхідності в процесі розробки радіоелектронних пристроїв здійснювати проектування, у ході якого визначаються допустимі відхилення від номінальних значень електричних, конструктивних, фізичних параметрів їх складових (елементів, модулів, блоків).

Сучасні технології допускового проектування використовують, в основному, методи гарантованих допусків, що забезпечують працездатність навіть у випадку найгіршого поєднання допустимих відхилень параметрів елементів пристроїв, і методи моментів, які враховують математичні сподівання та дисперсії законів розподілу параметрів елементів. Проте вони не дозволяють повною мірою враховувати різні фізичні закони, за якими функціонують окремі блоки, та необхідність призначення допусків як на електричні, так і на конструктивні параметри, враховувати кореляцію між ними. На цій основі виникає протиріччя між вказаними потребами практики і можливостями сучасних теорій і засобів проектування радіоелектронних пристроїв з урахуванням допусків на характеристики їх елементів. Це обумовлює актуальність теми дисертаційного дослідження, що присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення надійності та точності радіоелектронних пристроїв, що проектуються, за рахунок розробки статистично-орієнтованих методів призначення допусків на електричні та конструктивні параметри їх елементів з урахуванням кореляції між ними і математичних моделей процесів функціонування окремих блоків.

Свідченням актуальності теми дисертаційної роботи є також те, що вона безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень за держбюджетною тематикою Запорізького національного технічного університету у 2007–2018 рр. відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (пріоритетний напрям «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці,



промисловості та агропромислового комплексу): НДР «Методи оптимізації параметрів радіоелектронних пристроїв з використанням геометричних моделей допускових областей» (ДР № 0107U000440), НДР «Об'єктно-орієнтовані методи проектування радіоелектронних апаратів» (ДР № 0110U001141); НДР «Розробка математичного та програмного забезпечення проектування радіоелектронних апаратів» (рішення Науково-технічної ради Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, протокол № 2 від 16.06.15), в яких дисертант брала безпосередню участь як виконавець.

**Структура, логіка та зміст дисертаційного дослідження.** Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 297 найменувань, двох додатків і має загальний обсяг 321 сторінку.

**Вступна частина** дисертації розкриває суть, структуру і сучасний стан розв'язуваної у дисертаційній роботі науково-технічної проблеми. У ній наведена загальна характеристика роботи, яка містить відомості щодо виконаного дисертаційного дослідження згідно з існуючими вимогами: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами; формулювання мети і задач дослідження; перелік використаних методів дослідження; одержані нові наукові результати; практичне значення одержаних результатів; декларацію особистого внеску здобувача; відомості про апробацію результатів та публікації за темою дисертації.

**Оглядова частина** роботи присвячена аналізу сучасного стану проблеми допускового проектування радіоелектронних пристроїв. У ній виконано опис основних етапів та задач проектування радіоелектронної апаратури, взаємозв'язки між якими подано у вигляді мережевої моделі. За результатами аналізу встановлено, що: задача синтезу допусків на параметри елементів є оберненою до задачі аналізу пристроїв та некоректною по своїй суті і потребує регуляризації; існуючі методи призначення допусків враховують закони розподілу параметрів елементів і використовують функції чутливості для номінальних значень параметрів, що на практиці може призводити до значних похибок визначення допусків; засоби сучасних САПР надають можливості допускового аналізу, проте для цього необхідна розробка спеціалізованих програмних модулів та їх інтеграції з існуючими, що вимагає значних додаткових витрат.

Виходячи з цього, автором зроблено висновок щодо доцільності розроблення методів та засобів визначення допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів радіоелектронних пристроїв, які враховують технологічні та експлуатаційні обмеження, забезпечують багатокритеріальну оптимізацію допусків та їх програмну реалізацію з інтеграцією в сучасні системи автоматизованого проектування. Шляхом декомпозиції мети дослідження визначена множина задач, розв'язання яких повинно забезпечити її досягнення.

Виходячи з мети та задач дослідження **теоретична частина** роботи присвячена



розробці нових більш ефективних стратегій, математичних моделей і методів допускового проектування, що дозволять враховувати особливості технологічних процесів виробництва та витратні показники.

Зокрема, у другому розділі роботи для розв'язання задачі синтезу інтервальних допусків на параметри елементів запропоновано метод дотичних, який у процесі своєї реалізації дозволяє використовувати різні стратегії оптимізації. Розроблено його алгоритмічні реалізації для синтезу інтервальних допусків за стратегіями однакових допусків, максимального об'єму допускової області, мінімальної вартості, оптимального співвідношення ціна/якість. Вони враховують нелінійні властивості вихідних функцій та забезпечують високу точність обчислень за рахунок визначення параметрів моделей в точках дотику вершин допускової області та меж області працездатності. Зміни стратегій допускового проектування дозволяють отримувати суттєво різні рішення у просторі показників об'єму області допусків та вартості радіоелементів. Для вибору кращої стратегії запропонована методика з використанням узагальненого нормованого коефіцієнта. Працездатність методу та відповідних алгоритмів продемонстрована порівняльними прикладами розрахунків з використанням різних стратегій синтезу областей.

У третьому розділі запропоновано вдосконалення методів аналізу та синтезу допусків з урахуванням нормального закону розподілу значень параметрів компонентів радіоелектронної апаратури. Для задач у такій постановці дотичні до межі області працездатності та допускової області збігаються, а допускова область формується як описаний біля області розсіяння еліпс. З урахуванням цього можна значно підвищити точність призначення допусків. За результатами експериментів встановлено перевагу удосконаленого методу над методом моментів та незначний програш точному методу. Для удосконалених методів розроблено алгоритми призначення допусків за цінovими характеристиками. Експериментальним шляхом на прикладах розв'язання задач проведено порівняння стратегій. Встановлено, що практичне застосування запропонованих алгоритмів надає можливість зменшення витрат в умовах серійного виробництва до 15-20 %.

Четвертий розділ присвячено розробці математичних моделей для законів розподілу параметрів, що задані статистичними рядами, і методу аналізу та синтезу допусків на їх основі. Для розв'язання задачі на першому етапі запропоновано виконувати апроксимації граничних ділянок статистичних рядів параметрів елементів функціями, які подібні до нормального закону розподілу. Розроблений на цій основі метод згладжених вершин надає можливість проводити аналіз та призначати допустимі відхилення значень параметрів при різних стратегіях оптимізації. Використання апроксимації граничних ділянок статистичних рядів дозволило створювати брусоеліпсоїдні області розсіяння. Встановлено, що запропонований метод забезпечує таку ж точність процедур допускового проектування, як і метод дотичних при призначенні нормальних допусків.



У п'ятому розділі проведено дослідження впливу кореляції параметрів на форму допускових областей. Зокрема, визначено співвідношення між параметрами допускової області та межами області працездатності при нормальному законі розподілу та кореляційними зв'язками між параметрами елементів. На основі цих співвідношень для випадків одно- та двобічних обмежень вихідної функції створено алгоритми для синтезу допусків при різних вимогах до області працездатності. Встановлено, що при кореляційному зв'язку метод дотичних має дещо меншу точність, проте вона суттєво вище точності методу моментів. Показано, що наявність кореляційного зв'язку між параметрами призводить до зміни допустимих відхилень порівняно з взаємонезалежним розподілом параметрів. З використанням розроблених алгоритмів проведено оцінку впливу кореляційних зв'язків та параметрів підкладки на величину допустимих відхилень топології мікросмужкових пристроїв.

Шостий розділ присвячено розробленню інтервальних структур, що надають можливість враховувати компенсацію при одночасній дії зовнішніх факторів та методів синтезу допусків з урахуванням експлуатаційних навантажень. Структури з плаваючими інтервалами, плаваючими межами, зв'язаними інтервалами та гіллясті інтервальні структури надають можливість опису процесів в умовах зовнішніх впливів, що призводять до зміни параметрів елементів і вихідних характеристик радіоелектронних пристроїв. Різноманітність структур дозволяє здійснювати різні види оцінювання властивостей апаратури. Запропоновані правила виконання операцій над інтервальними структурами надають можливість утворювати інтервально-структурні рівняння для оцінювання вихідних характеристик радіоелектронних пристроїв та проводити розкладання таких структур. Це спрощує процедури визначення коефіцієнтів зовнішніх впливів і номінальних відхилень параметрів, надає можливість використовувати при призначенні номінальних та експлуатаційних допусків різні стратегії.

На основі запропонованих у розділах теоретичної частини роботи математичних моделей і методів у **практичній частині (розділ 7)** здійснено розроблення програмного та лінгвістичного забезпечення для допускового проектування радіоелектронних апаратів і технології їх інтеграції з існуючими системами автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв. При цьому було удосконалено модель архітектури програмного забезпечення для інтегрованого середовища системи автоматизованого проектування. Його суть полягає в інтеграції розроблених пакетів прикладних програм для допускового проектування радіоелектронних пристроїв, що реалізують різні стратегії та дозволяють розв'язувати задачі для різних форм допускових областей. Розроблено лінгвістичне та програмне забезпечення надає можливість проводити аналіз та синтез допусків за математичними моделями, які вводяться в систему у символічному вигляді та зберігаються в форматі XML. Передбачена інтеграція розроблених засобів з існуючими системами проектування трьома способами: розробкою інтерфейсного



програмного модуля, що використовує спеціалізовані макроси для обчислення вихідних характеристик радіоелектронного апарату в середовищі САПР; розробкою внутрішнього додатку в САПР, що виконує розрахунки вихідних характеристик радіоелектронних апаратів з допомогою API-функцій; в діалоговому режимі шляхом введення користувачем значень вихідних характеристик, які визначені засобами спеціалізованої САПР.

Практична апробація розробленого математичного та програмного забезпечення продемонструвала їх працездатність на прикладах розв'язання задач визначення допусків на параметри елементів з використанням різних методів і стратегій (підрозділи 2.6, 3.4, 4.4, 5.1, 5.2, 6.2) та їх ефективність, що підтверджується відповідними актами впровадження. Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні телеметричних приладів для супутників та ракетноносіїв ТОВ «Хартрон-Юком» та радіолокаційного обладнання на КП НВК «Іскра», що дозволило підвищити точність та надійність функціонування приладів. Результати роботи використовуються в лекційних, лабораторних заняттях та в атестаційних роботах Запорізького національного технічного університету для магістрантів спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, що відповідають тематиці дисертації.

*Додатки* містять акти про впровадження результатів дисертаційної роботи в проектні організації і навчальний процес вищого навчального закладу, список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів роботи.

Зміст дисертаційної роботи відповідає її темі, меті та задачам дослідження. У викладенні результатів дослідження просліджується певна послідовність, етапи дослідження взаємопов'язані і вирішують локальні задачі, розв'язання яких у сукупності дозволяє досягти поставленої мети дослідження.

За результатами досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, опубліковано 61 наукову працю, серед яких 24 – у періодичних наукових фахових виданнях України (з них 6 статей включено до наукометричної бази Scopus), 35 публікацій у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій і семінарів, 1 патент на корисну модель та 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права. Усі видання відповідають профілю дисертаційної роботи.

Автореферат, загалом, адекватно відображає обсяг, зміст, основні положення та висновки дисертаційної роботи.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі наведено розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми підвищення надійності та точності радіоелектронних пристроїв шляхом розроблення методів призначення допусків на електричні та конструктивні параметри елементів, які враховують технологічні та експлуатаційні обмеження, та їх програмної реалізації, інтегрованої з існуючими системами автоматизованого проектування.



При цьому отримано ряд наукових результатів, що мають переваги над існуючими:

– розроблено метод дотичних для синтезу допустимих відхилень параметрів елементів від номінальних значень, в якому дотичні до межі області працездатності та допускової області збігаються, а допускова область формується як описаний біля області розсіяння брус або еліпсоїд, та надає можливість використовувати стратегії допускового проектування за критеріями рівних допусків на параметри, мінімізації вартості, оптимального співвідношення ціни та якості, максимального об'єму допускової області;

– розроблено метод оцінювання положення допускових областей в області працездатності для нормального закону розподілу відхилень параметрів елементів від їх номінальних значень та кореляційних зв'язків, що створює можливості для підвищення точності призначення допусків та вибору параметрів елементів у процесі виробництва радіоелектронних пристроїв;

– розроблено метод згладжених вершин для допускового проектування радіоелектронних пристроїв, який використовує апроксимацію граничних ділянок законів розподілу відхилень значень параметрів елементів, заданих статистичними рядами, функціями подібними до нормального закону та надає можливість враховувати закони розподілу;

– розроблено метод відображень, що моделює граничні умови дії зовнішніх впливів, враховує їх компенсацію та надає можливість призначати допуски на параметри радіоелектронних пристроїв з урахуванням експлуатаційних навантажень.

– отримав подальший розвиток метод інтервального оцінювання параметрів шляхом моделювання зовнішніх впливів на радіоелектронні пристрої за допомогою інтервальних структур, що у сукупності забезпечують підвищення точності призначення експлуатаційних допусків;

– удосконалено архітектуру програмного забезпечення для інтегрованого середовища автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв шляхом включення до її складу пакетів допускового аналізу і синтезу, що дозволяє розв'язувати задачі з використанням різних стратегій для різних форм допускових областей.

**Наукове та практичне значення результатів дисертаційної роботи.** Одержані в дисертаційній роботі наукові результати розширюють науково-методологічну основу для підвищення ефективності процесів автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв в частині визначення раціональних допусків на параметри їх елементів. Це дозволяє скоротити час допускового проектування пристроїв, підвищувати їх точність і надійність та (за рахунок скорочення дублювання і резервування) зменшувати витрати на їх створення.

Теоретичні результати дисертаційної роботи пройшли експериментальну апробацію та доведені до рівня прикладного програмного забезпечення системи



автоматизації проектування радіоелектронних пристроїв за різними стратегіями та формами допускових областей.

Практична значущість результатів дисертаційної роботи підтверджується їхнім впровадженням при проектуванні телеметричних приладів для супутників та ракетноносіїв ТОВ «Хартрон-Юком» та радіолокаційного обладнання на Казенному підприємстві «Науково-Виробничий Комплекс «Іскра».

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Вихідні положення дисертаційної роботи є коректними. Запропоновані у роботі підходи, математичні моделі, методи і алгоритми розв'язання задач аналізу та синтезу допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів радіоелектронних пристроїв базуються на методології системного підходу, математичного моделювання, інтервальної математики, теорії ймовірності, математичної статистики та оптимізації, експериментальних досліджень та сучасних інформаційних технологій. Коректність методу дотичних для визначення допускових областей при інтервальному завданні параметрів здійснюється шляхом формулювання та доведення теореми 2.1 (дотичного бруса), а при нормальному законі розподілу параметрів – теореми 3.1 (дотичного еліпсоїда).

Одержані результати, висновки і рекомендації є аргументованими, їх достовірність підкріплюється також практичним впровадженням та перевіркою працездатності розроблених моделей, методів та створеного прикладного програмного забезпечення для інтегрованої САПР на прикладах розв'язання практичних задач.

Свідченнями обґрунтованості та достовірності результатів дисертаційної роботи можуть слугувати також їхня публікація у високореєтингових наукових фахових виданнях з технічних наук та апробація у середовищі фахівців на численних міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах з цитуванням 27 робіт в наукометричній базі Scopus.

#### **Зауваження щодо змісту й оформлення дисертації та автореферату**

1. Під час обґрунтування актуальності теми у вступі до дисертаційної роботи зроблено акцент на задачах аналізу та синтезу допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів **радіоелектронних** пристроїв апаратури лише **оборонного та космічного** призначення. Проте подібні дослідження є актуальними, зокрема, також для вирішення проблем допускового проектування та реінжинірингу аналогових і цифрових пристроїв систем керування критичної інфраструктури, енергетики, авіаційного, морського, трубопровідного транспорту тощо.

2. Теоретичну частину роботи доцільно було б почати з подання моделей та методів формування областей працездатності радіоелектронних пристроїв, аналізу їх форм, точності їх визначення тощо. Це, з врахуванням точності вимірювань параметрів елементів, дозволяло б коректніше здійснювати допускове проектування з гарантованим забезпеченням працездатності пристроїв.

3. Вираз (2.10) не є цільовою функцією, як те стверджується по тексту дисертаційної роботи, бо не вказує напрямку бажаної зміни для допусків параметрів елементів, а задає лише бажану умову їх рівності. Для цієї задачі як цільову доцільно було б використати функцію максимуму, яка б передбачала максимізацію мінімального з допусків серед параметрів елементів.

4. У роботі не достатньо уваги приділено задачам планування та проведення експериментів, результати яких більш об'єктивно підтверджували б ефективність запропонованих методів. Виходячи з цього, наведені оцінки розмірів визначених допускових областей для розглянутих задач в розділах 2–6 демонструють лише працездатність методів, але не мають оцінок достовірності та не мають узагальнюючого характеру.

5. Для більш об'єктивної характеристики розроблених методів допускового проектування та можливості їх кількісного порівняння за комплексними показниками ефективності виду «точність-складність» доцільно було б визначити та навести для них оцінки часової складності.

6. Розглянуті постановки задач призначення допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів радіоелектронних пристроїв дозволяють отримувати рішення з суттєво більшими за об'ємом областями, ніж отримані в роботі, наприклад, шляхом повороту фігур чи об'єднанням областей, отриманих поворотом фігур. У постановках задач доцільно було б навести умови, що обмежують практичне використання таких рішень.

7. Загалом, у дисертації отримані нові наукові і практичні результати для задачі синтезу допусків на параметри компонентів, що забезпечують працездатність радіоелектронних пристроїв, що не повністю покриває комплекс задач їх допускового проектування (температурних режимів, несучих конструкцій, електромагнітної сумісності тощо), як це визначається темою, предметом і об'єктом дослідження роботи.

8. Дисертація та автореферат оформлені з дотриманням основних вимог, встановлених в Україні. Разом з тим щодо їх оформлення є деякі зауваження, зокрема:

- у вступній частині роботи лише перераховано використані методи дослідження, проте змістовно не відзначено, для розв'язання якої задачі використовувався кожен з названих методів і чому;

- висновки по роботі, що наведені у авторефераті, є досить лаконічними, і не відображають повною мірою переваги отриманих наукових і практичних результатів, рекомендацій щодо подальшого можливого впровадження і перспектив подальших досліджень у цій галузі;

- по тексту дисертації та автореферату зустрічаються граматичні помилки, русизми та деякі неточності.



Наведені зауваження дещо погіршують враження про розглянуту роботу, проте загалом суттєво не знижують загальний високий рівень одержаних у ній наукових та практичних результатів.

**Загальний висновок.** Незважаючи на зазначені недоліки, дисертаційна робота Шило Галини Миколаївни «Статистично-орієнтовані методи допускового проектування радіоелектронних пристроїв» є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові теоретичні і практичні результати, що у сукупності є суттєвими для розвитку методології допускового проектування радіоелектронних пристроїв. Вони відповідають формулі та напрямкам досліджень за пунктами 3 – «Математичне моделювання та аналіз технічних об'єктів у САПР...», 4 – «Синтез описів технічних об'єктів у САПР, у тому числі: методи параметричної оптимізації, методи синтезу технічних рішень...» та 7 – «Пакети прикладних програм автоматизованого проектування» паспорта спеціальності 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт.

Вважаю, що за обсягом досліджень, актуальністю, науковою новизною і практичним значенням отриманих результатів, їх впровадженням та опублікуванням дисертаційна робота відповідає вимогам чинних нормативних документів, у тому числі пунктам 9, 10, і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Шило Галина Миколаївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт.

Офіційний опонент,  
професор кафедри системотехніки  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
доктор технічних наук,  
професор



Безкоровайний В.В.

«Підпис Безкоровайного В.В. засвідчую».

Проректор з науково-методичної роботи  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
доктор технічних наук, професор



І.В. Рубан