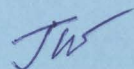


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ШИЛО ГАЛИНА МИКОЛАЇВНА



УДК 621.396.6.004 : 004.896

**СТАТИСТИЧНО-ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ДОПУСКОВОГО
ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ**

05.13.12 – системи автоматизації проєктувальних робіт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Піза Дмитро Макарович,
Запорізький національний технічний університет,
проректор з науково-педагогічної роботи та питань
перспектив розвитку університету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лобур Михайло Васильович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри систем автоматизованого
проектування

доктор технічних наук, професор
Безкоровайний Володимир Валентинович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
професор кафедри системотехніки

доктор технічних наук, професор
Гоменюк Сергій Іванович,
Запорізький національний університет,
декан математичного факультету

Захист відбудеться 06 грудня 2018 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ 05 ” листопада 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.05, д.т.н., проф.



Р. А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Радіоелектронна апаратура оборонного або космічного призначення завжди потребувала найсучасніших підходів до забезпечення точності та надійності її функціонування. Зараз спостерігається тенденція до підсилення вимог щодо терміну експлуатації українських супутників і проектування ракетноносіїв, що повертаються на Землю. Це створює додаткові вимоги до терміну та точності функціонування телеметричної бортової апаратури та потребує оцінювати вплив зміни електричних параметрів компонентів на вихідні характеристики приладів. При проектуванні трактів радіолокаційних станцій та НВЧ-антен для оборонної промисловості виникає необхідність враховувати відхилення конструктивних та фізичних параметрів матеріалів, що впливають на вихідні характеристики виробів. Тобто, величина допустимих відхилень значень параметрів елементів задає точність вихідних функцій та впливає на вартість апаратури. Тому в процесі розробки радіоелектронних пристроїв важливим етапом є допускове проектування. У процесі такого проектування визначаються допустимі відхилення та номінальні значення електричних або конструктивних параметрів елементів, модулів, блоків складних систем з урахуванням недосконалості технологічних процесів, старіння і впливу зовнішніх факторів (зміна температури, вологості, випромінювання, тиску тощо). При великій кількості елементів задачі призначення допусків вирішуються неоднозначно, що надає можливість використовувати різні стратегії оптимізації.

Дослідженням в галузі допускового проектування присвячено роботи Гехера К., Гусева В.П., Фрідлендера И.Г., Кофанова Ю.М., Михайлова А.В., Цветкова А.Ф., Фоміна А.В., Недоступа Л.А., Гапоненка М.П., Крищука В.М., Дивака М.П., Бондарева А.П., Spence R., Kolev L.V., Spagnuolo G., Ермолаєва Ю.П., Воробйова Є.А., Іншакова А.Н., Норенкова І.П. Відомо, що величина допусків, які призначаються, суттєво залежить від закону розподілу параметрів. При класифікації допусків за законом розподілу інтервальні допуски відповідають розподілам, заданим на обмеженому інтервалі зміни параметрів. Такі допуски називають також гарантованими або допусками найгіршого випадку. Ці назви пов'язані з тим, що інтервальні допуски гарантують взаємозамінність елементів та відсутність бракованих за точністю параметрів виробів при їх виготовленні навіть у випадку найгіршого поєднання допустимих відхилень параметрів елементів. Методи інтервальної математики, що зручно використовувати для вирішення таких задач, запропоновано в наукових працях Алефельда Г., Шарого С.П., Шокіна Ю.І., Каухера Е.

Під час серійного виготовлення апаратури широко використовується при призначенні допусків метод моментів, який враховує основні параметри законів розподілу: математичне очікування та дисперсію. Однак обмежений набір моментів, що використовуються, та формування моделей вихідних функцій у точці номінальних значень параметрів не забезпечує достатню точність

процедур допускового проектування навіть для нормального закону розподілу значень параметрів елементів.

Загальним підходом до розв'язування задач синтезу та оптимізації допусків є формування області працездатності пристрою в просторі значень параметрів елементів з урахуванням обмежень на значення вихідних характеристик. Призначення допусків проводиться вибором розмірів допускової області при виконанні обмежень на ступінь неспівпадання цієї області з областю працездатності.

Науково-прикладна проблема підвищення надійності та точності радіоелектронних пристроїв шляхом розроблення методів і засобів призначення допусків на параметри елементів полягає у тому, що для її вирішення необхідно використовувати складні математичні моделі, які описують функціонування модулів, враховувати технологію виготовлення окремих компонентів та експлуатаційні навантаження. Також необхідно призначати допуски як на електричні параметри схеми, так і на параметри конструкції та матеріали. Тому при проектуванні одного радіоелектронного пристрою в загальному випадку використовується декілька систем автоматизованого проектування. Виникає задача розробки універсального підходу та методів для підвищення точності допускового проектування радіоелектронних пристроїв з урахуванням технології їх виготовлення, експлуатаційних навантажень, зменшення собівартості готових виробів та можливості інтеграції з САПР РЕА.

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

Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень, які виконувалися за держбюджетною тематикою, кафедри інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету.

1. НДР «Методи оптимізації параметрів радіоелектронних пристроїв з використанням геометричних моделей допускових областей». (2007-2009, № держреєстрації 0107U000440, пріоритетний напрям відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі»). Автором розроблено метод вибору положення допускових областей в області працездатності з урахуванням нормального закону розподілу параметрів елементів та кореляційних зв'язків.

2. НДР «Об'єктно-орієнтовані методи проектування радіоелектронних апаратів». (2010-2012, № держреєстрації 0110U001141, пріоритетний напрям відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі»). Автором розроблено метод згладжених вершин для допускового проектування радіоелектронних пристроїв.

3. НДР «Розробка математичного та програмного забезпечення проектування радіоелектронних апаратів». (2015-2018, підстава для виконання: рішення Науково-технічної ради Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, протокол № 2 від 16.06.15). Автором розроблено методи статистично-орієнтованого проектування з кореляцією між параметрами.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні надійності та точності функціонування радіоелектронних пристроїв шляхом розроблення та вдосконалення методів та засобів призначення допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів на основі розвитку теорії інтервального аналізу, еліпсоїдного оцінювання та створення брусоеліпсоїдних структур з впровадженням у системах автоматизованого проектування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

1. Аналіз задач, методів та можливостей сучасних систем автоматизованого проектування для вирішення задач призначення допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів радіоелектронних пристроїв.

2. Дослідження впливу зміни параметрів компонентів на вихідні характеристики пристроїв для визначення вимог до процедур допускового проектування.

3. Розроблення стратегій допускового проектування, що нададуть можливість враховувати особливості технологічного процесу або цінні показники.

4. Розроблення математичних моделей законів розподілу відхилень параметрів елементів від номінальних значень для використання у методах допускового проектування.

5. Розроблення методів синтезу допустимих відхилень параметрів елементів від номінальних значень за різними стратегіями проектування з урахуванням нормального та рівномірного законів розподілу параметрів.

6. Розроблення методу оцінювання положення допускових областей в області працездатності з урахуванням нормального закону розподілу відхилень параметрів елементів від їх номінальних значень та кореляційних зв'язків.

7. Розроблення методів допускового проектування радіоелектронних пристроїв з урахуванням закону розподілу відхилень параметрів елементів від номінальних значень, заданих статистичними рядами.

8. Розроблення методу допускового проектування з урахуванням дії зовнішніх впливів на етапі експлуатації та їх компенсації.

9. Розроблення алгоритмів призначення допусків для різних стратегій проектування та допускових областей, які мають різну геометричну форму (брус, еліпсоїд та брусоеліпсоїд).

10. Розроблення програмного та лінгвістичного забезпечення автоматизованої системи для допускового проектування радіоелектронних апаратів.

11. Розроблення технології інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з системами автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв.

Об'єкт дослідження – процес допускового проектування радіоелектронних пристроїв.

Предмет дослідження – методи та засоби для допускового проектування радіоелектронних пристроїв.

Методи дослідження. Для розв'язання задач аналізу та синтезу допусків на електричні та конструктивні параметри компонентів радіоелектронних пристроїв використано методи математичного моделювання, інтервальної математики, теорії ймовірності, математичної статистики та оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблено метод дотичних для синтезу допустимих відхилень параметрів елементів від номінальних значень, у якому дотичні до межі області працездатності та допускової області співпадають, а допускова область формується як описаний біля області розсіяння брус або еліпсоїд, та який надає можливість використовувати стратегії допускового проектування для отримання оптимальних розв'язків за критеріями рівних допусків на параметри, мінімальної вартості, оптимального співвідношення ціна/якість, максимального об'єму допускової області;

- вперше розроблено метод оцінювання положення допускових областей в області працездатності з урахуванням нормального закону розподілу відхилень параметрів елементів від їх номінальних значень та кореляційних зв'язків, що надає можливість підвищити точність призначення допусків та вибору параметрів елементів при серійному виробництві радіоелектронних пристроїв;

- вперше розроблено метод згладжених вершин для допускового проектування радіоелектронних пристроїв, який включає апроксимацію граничних ділянок законів розподілу відхилень значень параметрів елементів функціями подібних до нормального закону та надає можливість враховувати закони розподілу, задані статистичними рядами;

- вперше 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;

- удосконалено метод інтервального оцінювання параметрів із застосуванням моделей зовнішніх впливів у вигляді інтервальних структур, що у сукупності забезпечують підвищення точності призначення експлуатаційних допусків;

- удосконалено модель архітектури програмного забезпечення для інтегрованого середовища системи автоматизованого проектування, яка на відміну від існуючих містить пакети прикладних програм для допускового

проектування радіоелектронних пристроїв за різними стратегіями та формами допускових областей.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Програмне забезпечення для допускового проектування радіоелектронних пристроїв, що надає можливість обчислювати допуски за математичними моделями вихідних характеристик або на основі таблично заданих функцій, отриманих за результатами роботи зовнішніх програм моделювання схем електричних принципів або інших САПР.

2. Алгоритми та методики призначення допусків для різних стратегій проектування з урахуванням законів розподілу параметрів та дії зовнішніх чинників.

3. Технологію інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з САПР радіоелектронних пристроїв.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні телеметричних приладів для супутників та ракетоносіїв ТОВ «Хартрон-Юком» та радіолокаційного обладнання на КП НВК «Іскра», а також використані в навчальному процесі кафедри інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету при викладанні дисциплін для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [8, 35, 39] – метод дотичних для синтезу нормальних допусків; [9, 42] – стратегії допускового проектування; [12, 13, 31, 34] – метод та алгоритми синтезу інтервальних допусків; [11, 14-19, 33, 36, 37, 40, 41, 50-53] – методи та алгоритми допускового проектування з урахуванням дії зовнішніх чинників; [20, 44, 45, 57, 58, 60] – співвідношення для інтервального оцінювання параметрів радіоелементів у задачах допускового проектування; [21-24, 43, 46, 56, 59] – постановка задачі синтезу допусків на параметри мікросмушкових пристроїв та антенної ґратки; [10, 30, 38, 49] – метод вибору положення допускових областей в області працездатності з урахуванням кореляційних зв'язків між параметрами; [32, 54, 55, 61] – архітектура програмного забезпечення для інтегрованого середовища системи автоматизованого допускового проектування.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 29 міжнародних науково-технічних конференціях: “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”, CADSM’2003 – CADSM’2009 (Львів-Славське, 2003, 2005; Львів-Поляна, 2007, 2009); “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, TCSET’2004 - TCSET’2012 (Львів, 2004, 2006, 2008, 2010 та 2012); “IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications”, IDAACS’2003-IDAACS’2017

(Lviv, 2003; Sofia, *Bulgaria*, 2005; Dortmund, *Germany*, 2007; Cosenza, *Italy*, 2009; Prague, *Czech Republic*, 2011; Berlin, *Germany*, 2013; Bucharest, *Romania*, 2017); "Information Systems and Technologies" (Kharkiv, 2005); "Сучасні проблеми досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій" (Запоріжжя, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012); "Совещание по интервальному анализу" ИНТЕРВАЛ-06 (Санкт-Петербург, 2006); «Современные проблеммы радиотехники и телекоммуникаий "РТ-2007"» (Севастополь, 2007); «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ-2007 – СИЭТ2009 (Одесса, 2007-2009); "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь, 2007).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 61 наукову працю, серед яких 23 у наукових фахових виданнях України що відповідають вимогам (з них 6 статей включено в наукометричну базу Scopus), та 35 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій, 1 патент на корисну модель та 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права. Загалом 27 публікацій, що відображають основні результати роботи, включено до наукометричної бази Scopus.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота включає умовні скорочення, вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи складає 321 сторінка, із них 250 сторінки основного тексту, 60 рисунків, 31 таблиця, список використаних джерел із 297 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок проблеми з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету і визначено задачі, наведено використані методи дослідження, подано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, їх апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів та програмного забезпечення систем автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв для вирішення задач аналізу та синтезу електричних та конструктивних допусків на параметри компонентів. Показано, що задача синтезу допусків є некоректною задачею. При синтезі допусків радіоелектронних апаратів порушується умова єдиності розв'язку. В цьому випадку можна використовувати регуляризацію та додати вимоги, що виникають з технологічних, експлуатаційних, економічних та інших обмежень. Також можна використовувати багатокритеріальну оптимізацію з критеріями: мінімізація вартості пристроїв та максимізації якості.

У другому розділі розглянуто задачу синтезу допусків як задачу визначення розмірів допускової області заданої форми та розташування її в просторі вхідних параметрів з урахуванням обмежень області працездатності. Цю задачу можна звести до задачі пошуку умовного екстремуму цільової функції. Для однієї вихідної функції задача синтезу допусків має вигляд:

$$G(W, \varphi(X), K_{wj}) \rightarrow \max_{W \in \mathbf{W}}; \quad (1)$$

$$y(X) \in \mathbf{y}, X \in \Omega_w; \quad (2)$$

$$X = X_r + W; \quad (3)$$

де G – цільова функція (мінімум вартості; максимальний об'єм допускової області); $W = \{w_1, \dots, w_n\}$ – множина відхилень параметрів; $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$; $\mathbf{w}_i = [\underline{w}_i, \dots, \overline{w}_i]$ та $\mathbf{y} = [\underline{y}, \dots, \overline{y}]$ – інтервали відхилення параметрів елементів та вихідної функції; $\underline{w}, \overline{w}$ та $\underline{y}, \overline{y}$ – нижнє та верхнє відхилення параметрів елементів та вихідної функції; $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ та $X_r = \{x_{r1}, \dots, x_{rn}\}$ – множина параметрів елементів та множина їх номінальних значень; $\varphi(X)$ – спільна функція розподілу параметрів елементів; $K_{wj} = \{k_{wij}, \dots, k_{wnj}\}$ – множина взаємних коефіцієнтів відхилень параметрів елементів $k_{wij} = w_i / w_j$; n – кількість елементів; Ω_w – область працездатності. Множина K_{wj} визначається критерієм призначення допусків. Функція розподілу $\varphi(X)$ задає конфігурацію допускової області та впливає на відхилення параметрів.

Розроблено метод дотичних для інтервальних допусків, що визначаються згідно з вимогами гарантованих допусків. У цьому методі допускова область формується як вписаний в область працездатності брус – прямокутний гіперпаралелепіпед з ребрами паралельними осями координат. Розроблено алгоритми, які враховують нелінійні властивості вихідних функцій та забезпечують високу точність обчислень за рахунок визначення параметрів моделей у точках дотику вершин допускової області та меж області працездатності. Запропоновано співвідношення, що надають можливість розраховувати допустимі відхилення параметрів елементів для різних стратегій допускового проектування: рівних допусків (δ -стратегія), максимального об'єму допускової області (V -стратегія), мінімальної вартості (P -стратегія) та оптимального співвідношення ціна/якість (P/V -стратегія).

Формування допускової області з симетричними відхиленнями параметрів при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції показано на рис. 1, з якого видно, що вершини допускової області торкаються меж області працездатності та, таким чином, досягається повне використання області працездатності.

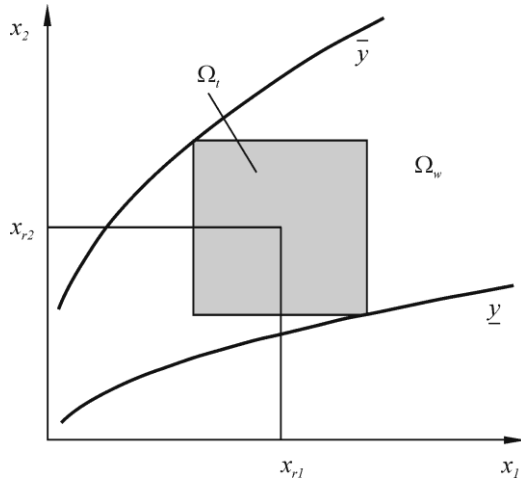


Рис. 1. Формування допустової області при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції

Перелік співвідношень для призначення допустимих відхилень в δ -стратегії наведено в табл. 1. Співвідношення табл. 1 використовуються в ітераційних алгоритмах.

Таблиця 1. Допустимі відхилення параметрів в δ -стратегії

Обмеження	Відхилення	
	відносні	абсолютні
\underline{y}	$\left \underline{b} / \sum_{i=1}^n \underline{a}_i \right x_{ri}$	$\left \underline{b} / \sum_{i=1}^n \underline{a}_i \right $
\bar{y}	$\bar{b} / \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \left x_{ri} \right $	$\bar{b} / \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \left \right $
w_y	$b_w / \sum_{i=1}^n \left \bar{a}_i + \underline{a}_i \right x_{ri}$	$b_w / \sum_{i=1}^n \left \bar{a}_i + \underline{a}_i \right $

Наприклад, алгоритм δ -стратегії при обмеженнях знизу має вид:

Крок 1. Визначаються коефіцієнти моделі вихідної функції в точці номінальних значень параметрів та призначаються початкові значення відхилень параметрів елементів:

$$\underline{\delta}_i^{(0)} = \begin{cases} \frac{\underline{\delta}_y}{n}, & a_{ri} > 0; \\ -\frac{\underline{\delta}_y}{n}, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де $\underline{\delta}_y = (\underline{y} - y_r) / y_r$ – нижнє допустиме відхилення вихідної функції; y_r – номінальне значення вихідної функції; a_{ri} – коефіцієнти моделі вихідної функції в точці номінальних значень параметрів.

Крок 2. Визначаються початкові координати точки дотику вершини допускової області та межі області працездатності:

$$\underline{x}_i^{(0)} = x_{ri} (1 + \underline{\delta}_i^{(0)}).$$

Крок 3. Визначаються коефіцієнти моделі вихідної функції в точці дотику вершини допускової області та меж області працездатності. Призначаються допустимі відхилення з використанням співвідношення.

Крок 4. Визначаються координати точки дотику вершини допускової області та меж області працездатності:

$$\underline{x}_i^{(k)} = x_{ri} (1 + \underline{\delta}_i^{(k)}),$$

де $\underline{\delta}_i^{(k)}$ – допустимі відхилення параметрів на k -й ітерації.

Крок 5. Визначається значення вихідної функції в точці дотику вершини допускової області та меж області працездатності. Перевіряється умова завершення алгоритму:

$$\left| \frac{y^{(k)} - \underline{y}}{\underline{y}} \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – точність обчислень.

При виконанні умови – кінець алгоритму, інакше – перехід на крок 3.

Аналогічний вид мають алгоритми ε -стратегії при інших обмеженнях вихідної функції.

При призначенні допусків з урахуванням цінкових показників використовуються цінкові характеристики. Приклад графічного відображення цінкових характеристик електрорадіоелементів наводиться на рис. 2, де P – ціна електрорадіоелемента; 1 – цінкова характеристика резистора; 2 – цінкова характеристика конденсатора.

Аналітична модель цінкової характеристики, яка використовується в процесі оптимізації, має вигляд ступеневої функції:

$$P = p_0 \left| \delta \right|^{p_1}, \quad (4)$$

де p_0 та p_1 – коефіцієнти цінкової характеристики.

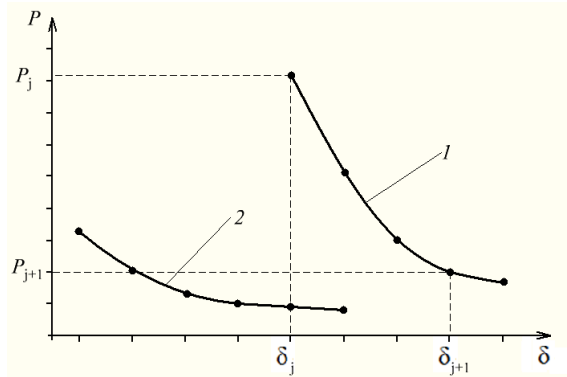


Рис. 2. Цінові характеристики електрорадіоелементів

Для визначення коефіцієнтів моделі цінової характеристики використовуються цінові показники при двох різних відхиленнях параметрів:

$$p_1 = \frac{\lg(P_j / P_{j+1})}{\lg(\delta_j / \delta_{j+1})}; \quad p_0 = P_j \left| \delta_j \right|^{-p_1}, \quad (5)$$

де j – номер точки цінової характеристики.

Якщо використовувати модель (4) цільова функція P -стратегії записується у вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^n p_{0i} \delta_i^{p_{1i}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де P — загальна вартість елементів.

Перелік оптимальних відхилень P -стратегії при різних обмеженнях вихідної функції наведено в табл. 2. Вирази з табл. 2 використовуються в ітераційних алгоритмах, аналогічних алгоритму 1, при призначенні допусків у P -стратегії.

Таблиця 2. Оптимальні відхилення P -стратегії

Обмеження	Оптимальні відхилення	Умова
\underline{y}	$\underline{\delta}_i = \underline{b} \mu_{pi} / (\underline{a}_i x_{ri})$	—
\bar{y}	$\bar{\delta}_i = \bar{b} \mu_{pi} / (\bar{a}_i x_{ri})$	—
w_y	$\bar{\delta}_i = b_w \mu_{pi} / [(\bar{a}_i + \underline{a}_i) x_{ri}]$	$\underline{\delta}_i = -\bar{\delta}_i$

Для порівняльного аналізу стратегій використовується матриця параметрів, які нормуються відносно їх оптимальних значень у відповідній стратегії. Наводиться порівняння стратегій на прикладі параметрів фільтра

нижніх частот. У розглянутому прикладі P -стратегія надає можливість зменшення вартості електрорадіоелементів на 17 % у порівнянні з V -стратегією, що досягається за рахунок зменшення об'єму допускової області майже в 4 рази. Стратегія рівних допусків збільшує вартість елементів на 6 % у порівнянні з P -стратегією при зменшенні об'єму допускової області на 28 % у порівнянні з V -стратегією. В стратегії ціна/якість вартість елементів збільшується на 13 %, а об'єм допускової області зменшується всього на 2 %. Використання іншої елементної бази може забезпечити зниження вартості елементів на 30-50 % при відповідній зміні інших параметрів стратегій. Однозначний вибір стратегії допускового проектування можна проводити за допомогою узагальненого нормованого коефіцієнта стратегій. Практичне застосування стратегій показано на фільтрі нижніх частот. У розглянутому прикладі найбільше значення цього коефіцієнта забезпечується стратегією ціна/якість. На привабливість цієї стратегії вказує найбільше значення нормованого коефіцієнта стратегій. Методика порівняння параметрів стратегій була розглянута на прикладі чотирьох стратегій допускового проектування, але запропоновані підходи можуть бути використані і при інших наборах стратегій.

Третій розділ присвячено вдосконаленню методу дотичних та особливостям його використання у випадку нормального закону розподілу параметрів компонентів. При незалежних нормальних законах розподілу параметрів проекція перетину функції розподілу на вісь координат утворює еліпсоїд:

$$\sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{l_i^2} = 1, \quad (7)$$

де $l_i = \gamma \sigma_i$ – півосі еліпсоїда або відхилення параметрів при нормальному законі розподілу параметрів; γ – коефіцієнт поля розсіювання; σ_i – середнє квадратичне відхилення параметрів.

Еліпсоїд обмежує область нормальних допусків. Його розташування в області працездатності показано на рис. 3, де m_i – математичне сподівання параметрів елементів; \underline{x}_{bi} та \overline{x}_{bi} – координати нижньої та верхньої граничних точок \underline{B} та \overline{B} ; Ω_{tm} та Ω_{tn} – області інтервальних і нормальних допусків; \underline{S}_b та \overline{S}_b – нижня та верхня граничні гіперповерхні області працездатності. При обчисленні нормальних допусків використовується теорема дотичного еліпсоїда.

Для нелінійних вихідних функцій координати точки дотику визначаються з допомогою ітераційного алгоритму:

$$w_{bj}^{(k)} = \pm a_j^{(k-1)} l_j^2 \left(\sum_{i=1}^n \left(a_i^{(k-1)} l_i \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}};$$

$$x_{bj}^{(k)} = m_j + w_{bj}^{(k)}; \quad y_b^{(k)} = y(X_b^{(k)});$$

$$a_j^{(k+1)} = \frac{\partial y(X)}{\partial x_j} \Big|_{X_b^{(k)}}. \quad (8)$$

Алгоритм (8) використовується для кожної з меж вихідної функції. Знак відхилення w_{bj} приймається додатним при розрахунку максимальних значень вихідної функції, від'ємним – при розрахунку мінімального значення.

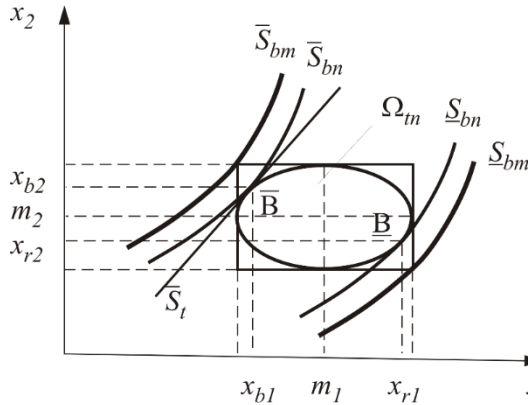


Рис. 3. Геометричні моделі інтервальних та нормальних допусків

Початкові значення координат точки $X_b^{(0)}$ обираються за допомогою алгоритму побудови інтервальних моделей на етапі внутрішньої інтерполяції. Ітераційний алгоритм завершується при досягненні заданої точності визначення граничного значення вихідної функції:

$$\left| \frac{y_b^{(k)} - y_b^{(k-1)}}{y_b^{(k)}} \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – задане значення точності.

Порівняння результатів розрахунку допусків методом дотичних з іншими методами проводилось для тестової функції:

$$y(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_2}.$$

Оцінка похибки запропонованого методу проводилась порівнянням з точними значеннями відхилень вихідної функції та допусками, які отримані методом

моментів. Точне значення допусків при нормальному законі розподілу може бути знайдено визначенням граничних значень вихідної функції при заданій ймовірності попадання у простір області працездатності:

$$P(\underline{y} \leq y \leq \bar{y}) = \int_{\Omega_w} \dots \int f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n, \quad (9)$$

де $f(x_1, \dots, x_n)$ – спільна щільність розподілу вхідних параметрів.

Для порівняння розрахунків задавалось математичне сподівання вхідних параметрів $m_i = 1$. Підтримувалась точність обчислень $\varepsilon = 0,0001$. Імовірність виходу за граничні значення вихідної функції задавалась $P = 0,27\%$ з однаковою ймовірністю виходу за верхній та нижній допуски. Вираз для цієї ймовірності отримується записом виразу (9) для зовнішньої області. Для нижньої межі воно приймає вид:

$$P(y \leq \underline{y}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\underline{y} - x_2^2} f(x_1) f(x_2) dx_1 dx_2, \quad (10)$$

де $f(x_i)$ – щільність розподілу вхідних параметрів при нормальному законі.

Рівняння (10) розв'язувалось в ітераційному режимі зміною граничного значення вихідної функції до досягнення ймовірності $P = 0,135\%$, що відповідає коефіцієнту поля розсіяння $\gamma = 3$ та відхиленням вхідних параметрів $\delta_j = l_j = 3\sigma_j$. Аналогічним чином розраховувалось також точне значення верхньої межі вихідної функції. Результати розрахунків наведено в табл. 3. Як видно з табл. 3, метод моментів дає значну похибку при обчисленні допусків вихідної функції при відхиленнях вхідних параметрів $\delta_j = 5\%$, що рекомендовані як граничні для використання методу моментів. При відхиленнях вхідних параметрів $\delta_j = 20\%$ метод моментів дає похибку вище 28%. У цьому випадку метод дотичних забезпечував точність обчислень допусків не гірше 0,225%. Похибка обчислень обумовлена обмеженнями області працездатності. При збільшенні кількості параметрів похибка метода зменшується. Дослідження також показали, що зі збільшенням нелінійності вихідної функції допуски, що розраховані для нормального закону розподілу, наближуються до інтервальних. Використання запропонованих методів показано на прикладі обчислення допусків на елементи смугового фільтра (рис. 4). Забезпечувалась задана ширина відхилень добротності:

$$Q = \frac{2\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}{C_1 + C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Таблиця 3. Оцінка точності метода дотичних

Відхилення вхідних параметрів	Метод розрахунку допусків					
	Точний		Дотичних		Моментів	
$\delta_1 = \delta_2, \%$	$\underline{\delta}_y, \%$	$\overline{\delta}_y, \%$	$\underline{\delta}_y, \%$	$\overline{\delta}_y, \%$	$\underline{\delta}_y, \%$	$\overline{\delta}_y, \%$
5	10,436	12,031	10,431	12,037	11,180	11,180
10	19,558	26,018	19,540	26,046	22,361	22,361
20	34,718	61,885	34,653	62,024	44,721	44,721

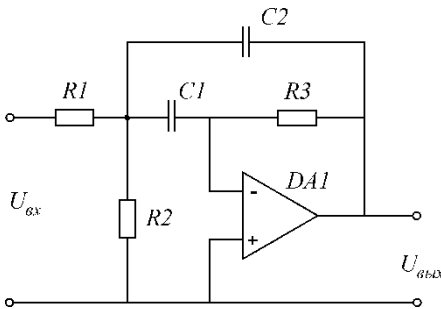


Рис. 4. Схема смугового фільтра

Номінальне значення добротності $Q_r = 10$ при нормованих номінальних значеннях параметрів $R_{r1} = 0,2$, $R_{r2} = 1$, $R_{r3} = 5$, $C_{r1} = 0,2$, $C_{r2} = 1$. Результати призначення допусків на параметри елементів фільтра при загальній ширині відхилень добротності $w_Q = 20\%$ та максимальному об'єму допускової області наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати обчислення допусків

Допуски	Допуски на параметри елементів, %				
	R_1	R_2	R_3	C_1	C_2
інтервальні	2,38	6,00	4,00	6,00	6,00
нормальні	5,35	13,40	8,94	13,40	13,40

Відхилення параметрів елементів, що наведено в табл. 4, призводять до інтервалу допусків на добротність $\delta_Q = [-9,04; 11,04]\%$.

Таким чином, у запропонованому методі обчислення нормальних допусків використовується геометричний зв'язок між допусковими областями при нормальному законі розподілу параметрів та усіченому законах, коли функція розподілу задана на інтервалі. Цей зв'язок встановлюється на основі суміщення дотичних до вихідної функції та еліпсоїдної області нормальних допусків (метод дотичних). Однозначність результатів забезпечується одиничністю дотичного еліпсоїда. На основі цього сформовано співвідношення, які надають можливість проводити аналіз та синтез допусків за різними стратегіями. Встановлено зв'язок між ваговими

коефіцієнтами, що використовується при призначенні інтервальних та нормальних допусків.

Четвертий розділ присвячено розробці методу згладжених вершин, що використовує математичні моделі законів розподілу параметрів, заданих статистичними рядами. Для формування областей розсіяння використовуються математичні моделі у вигляді аналітичних виразів щільності розподілу значень параметрів. При створенні математичних моделей також використано припущення, що закони розподілу значень параметрів елементів є модальними. Із припущення випливає, що значення ймовірності попадання параметрів за межі області розсіяння зменшується при наближенні значень параметрів до меж статистичного ряду. Це значить, що для формування меж області розсіяння необхідно використовувати моделі, що отримано вирівнюванням граничних ділянок статистичного ряду. Тоді при формуванні моделі можуть використовуватись закони розподілу з щільністю, що спадає до меж статистичного ряду. Найкращою є модель розподілу виду:

$$f(x) = F \cdot \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (11)$$

де $f(x)$ – щільність розподілу значень параметра елемента; x – параметр елемента; F – нормувальний множник; m – координати центра симетрії кривої (11); σ – параметр, який характеризує розсіяння випадкової величини відносно центра симетрії. Модель (11) нагадує нормальний закон, але при її створенні не враховується основна умова вирівнювання закону розподілу:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1.$$

Тому модель (11) може бути застосовано лише на окремих ділянках статистичних рядів. Приклад формування моделей щільності розподілу на граничних ділянках статистичного ряду показано на рис. 5, де наводиться гістограма розподілу значень параметрів елементів і криві 1 та 2, що моделюють відповідно нижню та верхню ділянки розподілу.

На рис. 5 номінальне значення параметра елемента визначається як його середнє значення:

$$x_r = \frac{x_l + x_u}{2}, \quad (12)$$

де x_r – номінальне значення параметра; x_l та x_u – нижня та верхня межі значень випадкової величини x .

Для оцінки поля розсіяння статистичного ряду використовуються граничні відхилення:

$$h_l = x_l - x_r; \quad h_u = x_u - x_r, \quad (13)$$

де h_l та h_u – нижнє та верхнє граничні відхилення параметра.

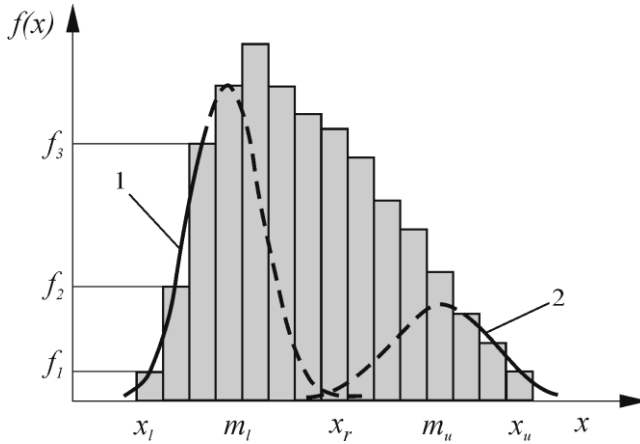


Рис. 5. Формування моделей граничних ділянок розподілу

Із співвідношень (12) та (13) випливає, що нижнє та верхнє граничні відхилення зв'язані співвідношенням:

$$h_l = -h_u. \quad (14)$$

Оцінювання поля розсіяння граничних моделей проводиться за допомогою відхилень:

$$l_l = x_l - m_l; \quad l_u = x_u - m_u, \quad (15)$$

де l_l , l_u та m_l , m_u – ширина поля розсіяння та координати центра симетрії нижньої та верхньої граничної моделі статистичного ряду. Ширина поля розсіяння зв'язана з коефіцієнтом розсіяння співвідношенням:

$$l = \gamma\sigma, \quad (16)$$

де γ – коефіцієнт поля розсіяння моделі.

Значення коефіцієнта поля розсіяння залежить від точності визначення подій області розсіяння. Для нормального закону розподілу звичайно приймають $\gamma = 3$, що відповідає точності 0,027%. В граничних точках статистичного ряду у відповідності до виразів (15) та (16) щільність розподілу значень параметра приймає вид:

$$f(x_b) = F \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right), \quad (17)$$

де x_b – значення параметра в граничній точці.

Оцінювання форми закону розподілу може проводитися з допомогою коефіцієнтів нормалізації. Коефіцієнтом нормалізації розподілу називається співвідношення поля розсіяння граничної моделі та граничного відхилення значення параметра статистичного ряду:

$$\xi = \frac{l}{h}, \quad (18)$$

де ξ – коефіцієнт нормалізації розподілу.

Коефіцієнт (18) приймає нульове значення у випадку інтервального закону розподілу значень параметрів. Нормальному закону розподілу відповідає значення коефіцієнта нормалізації $\xi = 1$. Це дозволяє розглядати коефіцієнт нормалізації як критерій близькості закону розподілу, який задано статистичним рядом, до нормального розподілу з точки зору формування допустимих відхилень значень параметрів.

При незалежних законах розподілу значень параметрів елементів щільність багатовимірною розподілу приймає вигляд:

$$f(X) = \left(\prod_{i=1}^n F_i \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_i)^2}{\sigma_i^2} \right], \quad (19)$$

де $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множина значень параметрів елементів; n – кількість елементів.

Якщо коефіцієнти поля розсіяння однакові для всіх елементів, то у відповідності до виразу (17) на межі області розсіяння щільність розподілу (19) приймає значення:

$$f(X_b) = \left(\prod_{i=1}^n F_i \right) \exp \left(-\frac{\gamma^2}{2} \right), \quad (20)$$

де $X_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – множина координат граничної точки області розсіяння; x_{bi} – координата граничної точки області розсіяння.

Із співвідношень (19) та (20) випливає еліпсоїдне рівняння для меж області розсіяння:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_i)^2}{l_i^2} = 1. \quad (21)$$

Співвідношення (21) використовується для опису ділянок гіперповерхні області розсіяння, які формуються з урахуванням законів розподілу значень параметрів всіх елементів. На ділянках, де межа формується лише одним законом розподілу, область розсіяння обмежується площинами паралельними осям координат. Таким чином, область розсіяння приймає вид брусоеліпсоїдної структури – бруса зі згладженими вершинами, які формуються вершинними еліпсоїдами. Форма брусоеліпсоїдної структури залежить від коефіцієнта нормалізації розподілу та знаку відхилення параметрів елементів, що враховуються при формуванні граничних значень вихідної функції. Приклад конфігурацій області розсіяння для вихідної функції $y = x_1 / x_2^2$ показано на рис. 6.

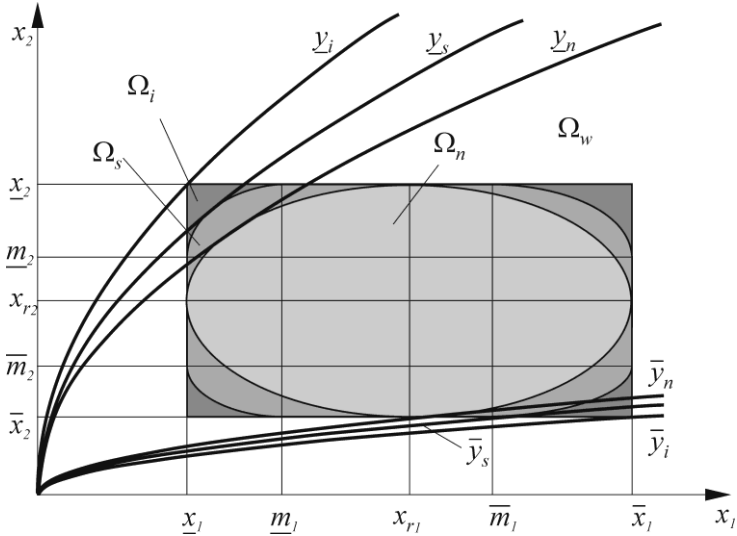


Рис. 6. Формування областей розсіяння

На рис. 6 позначено: Ω_w – область працездатності пристрою; Ω_i , Ω_n та Ω_s – області розсіяння, які формуються при інтервальному та нормальному законі розподілу параметрів та розподілі, що задано статистичним рядом; y_i , y_n , y_s та \bar{y}_i , \bar{y}_n , \bar{y}_s – нижнє та верхнє значення інтервалу зміни вихідної функції при інтервальному та нормальному законах розподілу значень параметрів та розподілі, що задано статистичним рядом; \underline{x} та \bar{x} – граничні значення параметрів елементів, що визначають межі допускової області; \underline{m} та \bar{m} – координати центрів вершинних еліпсоїдів, які сполучаються з площинами \underline{x} та \bar{x} . Граничні значення параметрів елементів визначається за допомогою співвідношень:

$$\underline{x}_i = x_{li}; \quad \bar{x}_i = x_{ui}, \quad (y(X_{li}) < y(X_r)); \quad (22)$$

$$\underline{x}_i = x_{ui}; \quad \bar{x}_i = x_{li}, \quad (y(X_{li}) > y(X_r)), \quad (23)$$

де $X_r = \{x_{r1}, \dots, x_{rm}\}$ – множина номінальних значень параметрів елементів; X_{li} – множина X_r , у якій i -й елемент приймає значення x_{li} .

Співвідношення (22) та (23) визначають межі допускової області та граничні відхилення значень параметрів елементів:

$$\underline{h}_i = \underline{x}_i - x_{ri}; \quad \bar{h}_i = \bar{x}_i - x_{ri}, \quad (24)$$

де \underline{h}_i та \bar{h}_i – відхилення параметрів елементів, які відповідають граничним значенням вихідної функції \underline{y} та \bar{y} .

Співвідношення (14) тоді приймає вид:

$$\underline{h}_i = -\bar{h}_i. \quad (25)$$

При інтервальному розподілі значень параметрів та монотонних вихідних функціях граничні значення вихідних функцій визначаються виразами:

$$\underline{y}_i = y(\underline{X}); \quad \bar{y}_i = y(\bar{X}), \quad (26)$$

де $\underline{X} = \{\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n\}$ та $\bar{X} = \{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n\}$ – множина координат вершин інтервальної допускової області. Множини \underline{X} та \bar{X} визначають межі допускової області також при інших розподілах значень параметрів. Але при нормальному законі розподілу значень параметрів для визначення значень вихідної функції замість прямої підстановки (26) використовується метод дотичних. У випадку розподілів, які задано статистичними рядами, можливо використання подібного підходу, якщо будуть визначені параметри вершинних еліпсоїдів. Для цього необхідно спочатку визначити коефіцієнти нормалізації розподілів при формуванні нижнього та верхнього граничних значень інтервалу зміни вихідної функції:

$$\underline{\xi}_i = \xi_{li}; \quad \bar{\xi}_i = \xi_{ui}, \quad (\underline{h}_i < 0), \quad (27)$$

$$\underline{\xi}_i = \xi_{ui}; \quad \bar{\xi}_i = \xi_{li}, \quad (\underline{h}_i > 0), \quad (28)$$

де $\underline{\xi}_i$ та $\bar{\xi}_i$ – коефіцієнти нормалізації розподілів при формуванні нижнього та верхнього граничних значень інтервалу зміни вихідної функції.

Тоді ширина поля розсіяння розподілів та координати центрів симетрії еліпсоїдів визначаються за допомогою виразів:

$$\underline{l}_i = \underline{\xi}_i \underline{h}_i; \quad \bar{l}_i = \bar{\xi}_i \bar{h}_i; \quad (29)$$

$$\underline{m}_i = \underline{x}_i - \underline{l}_i; \quad \bar{m}_i = \bar{x}_i - \bar{l}_i; \quad (30)$$

де \underline{l}_i , \bar{l}_i та \underline{m}_i , \bar{m}_i – ширина поля розсіяння розподілів та координати центрів симетрії еліпсоїдів.

Використання виразів (27) – (30) у процедурах аналізу та призначення допусків призводить до відхилень, які, як випливає з рис. 6, можуть суттєво відрізнитись від інтервальних та нормальних допусків. Тому для таких допусків вводиться визначення статистично-орієнтованих допусків.

Між інтервальними та нормальними допусками існує однозначний взаємозв'язок, який для стратегії максимального об'єму допускової області записується у виді:

$$\delta_n = \sqrt{n} \delta_i, \quad (31)$$

де δ_n та δ_i – нормальні та інтервальні допуски.

Зв'язок між нормальними та статистично-орієнтованими допусками має більш складний вид, який враховує параметри допускової області зі згладженими вершинами. Дослідження цієї залежності проводилось на прикладі неінвертованого фільтра нижніх частот (рис. 7).

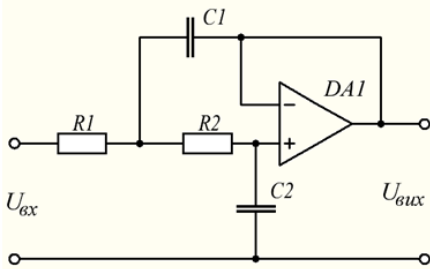


Рис. 7. Схема фільтра нижніх частот

Частота зрізу фільтра 120 Гц забезпечувалась номінальними параметрами елементів $R_1 = 5,76$ кОм; $R_2 = 15,4$ кОм; $C_1 = 0,18$ мкФ; $C_2 = 0,068$ мкФ. Задавалось загасання $a = 1 \pm 1\%$ у смузі частот 0 до 50 Гц. Підтримувалась точність обчислень $\varepsilon = 10^{-5}$.

Розглянуто стратегію максимального об'єму допускової області. Коефіцієнт нормалізації розподілів задавався однаковим для обох меж рядів розподілу та для всіх електрорадіоелементів. Результати призначення допусків для нижньої границі загасання при різних значеннях коефіцієнта нормалізації приведено в табл. 5.

Таблиця 5. Відхилення параметрів елементів

Коефіцієнт нормалізації	Відхилення параметрів елементів, %			
	R_1	R_2	C_1	C_2
0	6,34	-7,06	2,62	-2,74
0,02	6,41	-7,11	2,65	-2,76
0,05	6,50	-7,24	2,69	-2,81
0,1	6,67	-7,43	2,76	-2,88
0,2	7,04	-7,85	2,91	-3,04
0,5	8,45	-8,92	3,49	-3,65
1	12,68	-14,12	5,24	-5,47

Перший рядок таблиці формувався за результатами призначення інтервальних допусків ($\xi = 0$), інші рядки – за допомогою алгоритму призначення статистично-орієнтованих допусків. Зі зростанням коефіцієнта нормалізації допустимі відхилення параметрів елементів теж зростають, досягаючи при $\xi = 1$ значень нормальних допусків. При значеннях

коєфіцієнта нормалізації $\xi < 0,02$ статистично-орієнтовані допуски перевищують інтервальні не більш чим на 1%, що надає можливість у цих випадках використовувати інтервальну оцінку допустимих відхилень.

У **п'ятому розділі** показано вплив кореляції між параметрами на результати обчислення допускових відхилень параметрів та розроблено метод оцінювання розміщень допускових областей в околі області працездатності з урахуванням кореляційних зв'язків.

Нормальному закону розподілу та кореляційному зв'язку між параметрами відповідає функція розподілу:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \frac{x_j - m_j}{\sigma_j}\right]}{(2\pi)^{n/2} D^{1/2} \prod_{i=1}^n \sigma_i}, \quad (32)$$

де x_i , m_i та σ_i – вхідні параметри, їх математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення; D – визначник матриці R кореляційних коєфіцієнтів; D_{ij} – алгебраїчне доповнення елемента R_{ij} цій матриці.

На межі допускової області щільність розподілу незмінна:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{\exp(-\gamma^2/2)}{(2\pi)^{n/2} D^{1/2} \prod_{i=1}^n \sigma_i}, \quad (33)$$

де γ – коєфіцієнт поля розсіяння.

Умови рівності показників степенів у (32) та (33) надають можливість отримати рівняння для гіперповерхні допускової області у вигляді еліпсоїда:

$$\frac{1}{D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{w_i}{l_i} \frac{w_j}{l_j} = 1, \quad (34)$$

де $w_i = x_i - m_i$ – відхилення параметрів елементів; $l_i = \gamma \sigma_i$ – напіввісь еліпса.

Вплив коєфіцієнтів кореляції на конфігурацію допускової області показано на рис. 8, де \underline{y}_R та \overline{y}_R – нижнє та верхнє значення вихідної функції $y(X)$ при коєфіцієнті кореляції $R_{1,2}$; $X=(x_1, \dots, x_n)$ – множина параметрів елементів. Як видно з рис. 8, збільшення коєфіцієнта кореляції призводить до звуження допускової області. При $R_{1,2} = 1$ ця область вироджується у пряму лінію. Одночасно зі зміною коєфіцієнта кореляції змінюється положення граничних гіперповерхонь та допустимі відхилення вихідної функції. Якщо гранична гіперповерхня описується зростаючою функцією, то збільшення коєфіцієнта кореляції призводить до зменшення ширини відхилень вихідної функції.

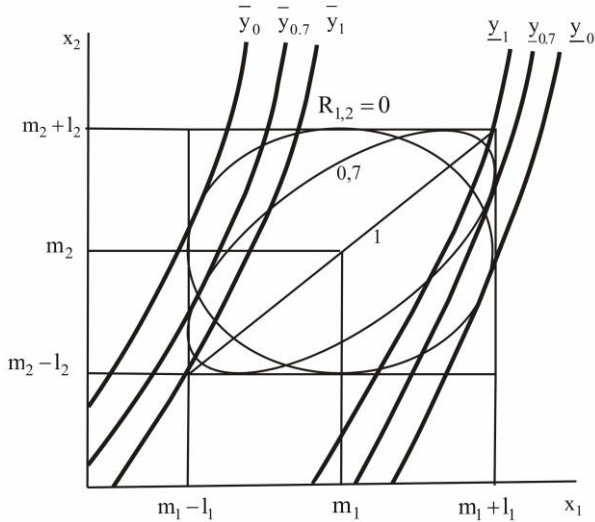


Рис. 8. Конфігурація допускової області

Розроблено алгоритми призначення допусків з урахуванням кореляції між параметрами. Точність алгоритмів оцінювалась порівнянням з результатами розрахунку інтегральним методом. Виявилось, що кореляційний зв'язок може дещо збільшити похибку розрахунку. Але ця похибка була на два порядки менше, чим забезпечує метод моментів. Запропонований метод використовувався для аналізу допусків на коефіцієнт передачі семиланкового мікросмужкового фільтра нижніх частот. Ескіз топології фільтра зображено на рис. 9, де h_i та d_i – довжина та ширина ланок.

Основні параметри фільтра: гранична частота смуги пропускання $f_c = 700$ МГц при максимальному загасанні $a_c = 3$ дБ; загасання $a_3 \geq 30$ дБ на частоті $f_3 = 1150$ МГц; хвильовий опір мікросмужкової лінії передачі $Z_0 = 50$ Ом; Номінальні розміри ланок наведено в табл. 6. При виготовленні фільтра використовувалась підкладка товщиною $c = 1$ мм та відносною діелектричною проникністю $\varepsilon = 9,6$. Враховувалось, що товщина підкладки, її діелектрична проникність, довжина ланок h_2, h_4, h_6 змінювалась взаємозалежно. Коефіцієнт кореляції між рядом розташованими паралельно (смісними) ділянками склав 0,9. Далі він зменшувався на 0,1 від ланки до ланки. Коефіцієнт кореляції параметрів перпендикулярно поряд розташованих ланок склав 0,8 і далі зменшувався на 0,2.

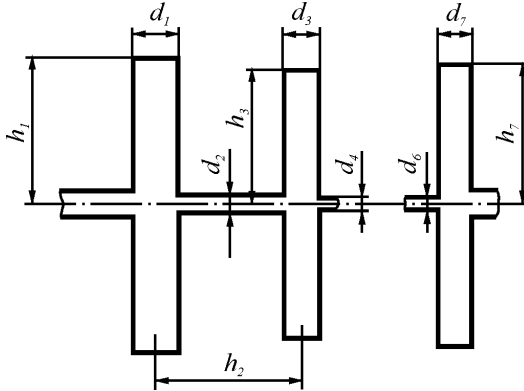


Рис. 9. Мікросмушковий фільтр нижніх частот

Таблиця 6. Номінальні розміри ділянок фільтра

Ділянки	1	2	3	4	5	6	7
d_i , мм	0,840	0,113	0,983	0,057	0,983	0,113	0,840
h_i , мм	4,257	17,771	16,911	26,829	16,911	17,771	4,257

Результати розрахунку наведено в табл. 7, де δ_{xi} – допуски на параметри ланок, $\underline{\delta}_H$ та $\bar{\delta}_H$ – нижні та верхні допуски на коефіцієнт передачі у відсотках. Результати розрахунку інтервальних допусків і нормальних допусків при відсутності кореляційного зв'язку наведено в табл. 8.

Таблиця 7. Розрахунок допусків при кореляційному зв'язку

δ_{xi}	Метод моментів		Метод дотичних	
	$\underline{\delta}_H$	$\bar{\delta}_H$	$\underline{\delta}_H$	$\bar{\delta}_H$
1	5.58	5.58	5.42	5.73
2	11.15	11.15	10.55	11.79
5	27.89	27.89	24.25	31.99

Таблиця 8. Розрахунок допусків при незалежних параметрах

δ_{xi}	Інтервальний метод		Метод дотичних	
	$\underline{\delta}_H$	$\bar{\delta}_H$	$\underline{\delta}_H$	$\bar{\delta}_H$
1	11.97	13.80	4.50	4.71
2	22.26	29.59	8.81	9.64
5	44.40	90.90	20.54	25.79

З таблиць випливає, що кореляційний зв'язок між параметрами елементів обумовлює збільшення об'єму допускової області. З іншого боку, вплив нормального розподілу параметрів проявляється у зменшенні допусків у порівнянні з інтервальними (гарантованими) майже в 2,5 рази. Метод дотичних більш точно визначає допуски, враховує нелінійні властивості функцій.

Шостий розділ присвячено інтервальному оцінюванню параметрів елементів при дії зовнішніх впливів (температурні, електричні та магнітні поля, дія вологості, опромінення і т.п.). Оцінювання цих впливів може проводитись з допомогою інтервальних структур. Такі структури містять інформацію про діапазони змінювання параметрів і можуть застосовуватись в процедурах вибору елементів та компенсації зовнішніх впливів. У разі залежності інтервального параметра елемента від зовнішніх чинників утворюється двовимірна область, у якій відбувається переміщення інтервального параметра (рис. 10). На рис. 10 позначено x_r – номінальне значення (математичне сподівання) параметра елемента; t_r – значення зовнішнього впливу при нормальних умовах навколишнього середовища; \underline{x} , \bar{x} – нижнє і верхнє значення номінального параметра елемента; t_m , t_p – нижнє і верхнє значення зовнішнього впливу. Оцінювання властивостей двовимірної області зміни параметра може проводитись одновимірними інтервальними величинами, які утворюють інтервальні структури.

ВИЗНАЧЕННЯ 1 (Загальне). Інтервальною структурою називається інтервал з інтервальними межами:

$$F_x(\mathbf{x}, *, d \cdot \mathbf{t}) = [\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_p], \quad (35)$$

де F_x – оператор інтервальної структури; $*$ $\in \{+, -, \cdot, /, \}$ – множина арифметичних операцій; $\mathbf{x} = [\underline{x}, \bar{x}]$ та $\mathbf{t} = [t_m, t_p]$ – інтервали параметра елемента і величини зовнішніх впливів; d – коефіцієнт зовнішніх впливів; \mathbf{x}_m і \mathbf{x}_p – нижній і верхній інтервали інтервальної структури.

Спосіб формування інтервальних меж залежить від способу оцінювання двовимірної інтервальної області. В дисертаційній роботі знайшли подальший розвиток існуючі інтервальні структури з плаваючими межами та плаваючими інтервалами та запропоновано нові структури зі зв'язаними інтервалами та гіллясті інтервальні структури. Узагальнено правила арифметичних операцій над цими структурами.

ВИЗНАЧЕННЯ 2. Інтервальною структурою із плаваючими інтервалами називається структура, у якій межі утворюються інтервальними значеннями параметра при нижньому і верхньому значенні зовнішнього впливу:

$$\mathbf{x}_m = \mathbf{x} * d \cdot t_m; \quad \mathbf{x}_p = \mathbf{x} * d \cdot t_p; \quad (F_x = F_i), \quad (36)$$

де F_i – оператор інтервальної структури із плаваючими інтервалами.

Формування інтервальної структури із плаваючими інтервалами показано на рис. 11.

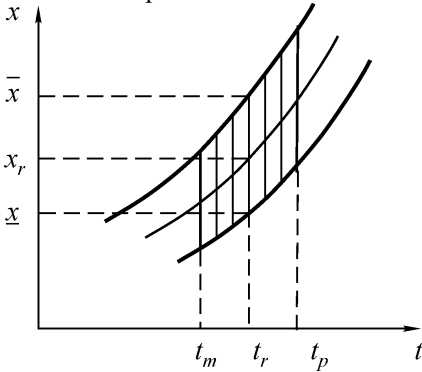


Рис. 10. Формування двовимірної інтервальної області при зовнішніх впливах

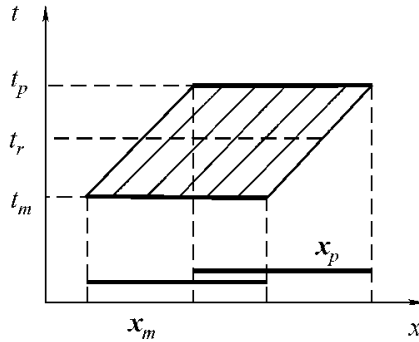


Рис. 11. Формування інтервальної структури із плаваючими інтервалами

Із рис. 11 видно, що інтервальна структура із плаваючими інтервалами є проекцією на вісь абсцис інтервалів параметрів елементів при граничних значеннях зовнішніх впливів.

ВИЗНАЧЕННЯ 3. Інтервальною структурою із плаваючими межами називається структура, у якій межі утворюються нижніми та верхніми межами параметра при інтервальному значенні зовнішнього впливу:

$$\mathbf{x}_m = \underline{x} * d \cdot \mathbf{t}; \quad \mathbf{x}_p = \bar{x} * d \cdot \mathbf{t}; \quad (F_x = F_b), \quad (37)$$

де F_b – оператор інтервальної структури із плаваючими межами.

Формування інтервальної структури із плаваючими межами показано на рис. 12. Із рисунка видно, що інтервальна структура із плаваючими межами є проекцією на вісь абсцис інтервалів, що утворюються внаслідок зміни меж параметрів елементів при зовнішніх впливах.

ВИЗНАЧЕННЯ 4. Інтервальною структурою із зв'язаними інтервалами називається структура, у якій межі утворюються протилежними межами параметра елемента при протилежних межах зовнішнього впливу:

$$\mathbf{x}_m = \mathbf{x} * \text{dual}(d \cdot \mathbf{t}); \quad \mathbf{x}_p = \mathbf{x} * d \cdot \mathbf{t}; \quad (F_x = F_c), \quad (38)$$

де $\text{dual}(d \cdot \mathbf{t}) = [d \cdot t_p; d \cdot t_m]$ – дуальний інтервал величини зовнішніх впливів;

F_c – оператор інтервальної структури із зв'язаними інтервалами.

Формування інтервальної структури із зв'язаними інтервалами показано на рис. 13. Із рисунка видно, що інтервальна структура із зв'язаними інтервалами є проекцією на вісь абсцис діагоналей двовимірної області, яка утворюється внаслідок зміни меж параметрів елементів при зовнішніх

впливах. Вплив зовнішніх чинників на параметри елементів оцінюється за допомогою коефіцієнтів зовнішніх впливів. При виготовленні апаратури ці коефіцієнти також мають відхилення від номінальних значень і утворюють інтервальні величини.

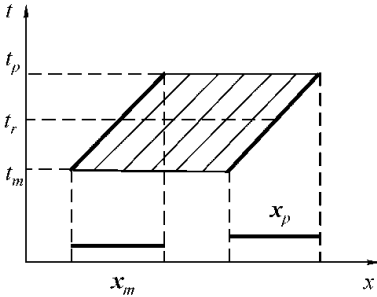


Рис. 12. Формування інтервальної структури із плаваючими межами

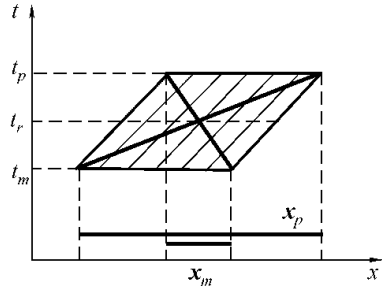


Рис. 13. Формування інтервальної структури із зв'язаними інтервалами

Тоді зовнішні впливи призводять до інтервальних значень параметрів елементів (рис. 14). Інтервальні коефіцієнти разом із інтервальними величинами зовнішніх впливів утворюють інтервальні структури, які взаємодіють із параметрами елементів. Оцінювання зміни параметрів елементів у цьому випадку може проводитись з допомогою гіллястих інтервальних структур.

ВИЗНАЧЕННЯ 5. Гіллястою інтервальною структурою називається інтервал з межами у вигляді інтервальної структури:

$$F_x(\mathbf{x}, *, F_y(\mathbf{d}, \circ, \mathbf{t})) = [F_x(\mathbf{x}, * \mathbf{d}_m), F_x(\mathbf{x}, * \mathbf{d}_p)], \quad (39)$$

де $F_x, F_y \in \{F_i, F_b, F_c\}$ – множина операторів інтервальних структур; $\mathbf{d} = [d_m; d_p]$ – інтервал коефіцієнта зовнішніх впливів; \mathbf{d}_m та \mathbf{d}_p – нижній та верхній інтервали інтервальної структури зовнішніх впливів.

Гіллясті інтервальні структури перетворюються до пар інтервалів. Процес перетворення має вигляд бінарного графа. У кроні графа гіллястої структури n -ї кратності міститься 2^n інтервалів. Подвійній інтервальній структурі (39) відповідає крона із двох пар інтервалів (рис. 15). Формування допускових областей при інтервальному та інтервально-структурному оцінюванні надається на рис. 16, де Ω_b та Ω_s – допускові області з граничним інтервальним оцінюванням та оцінюванням з допомогою інтервальної структури; y_r , y_b та y_s – номінальне значення вихідної функції та її значення при інтервальному та інтервально-структурному оцінюванні. В області Ω_s показано номінальну допускову область Ω_r , і області Ω_m та Ω_s при граничних значеннях зовнішніх впливів.

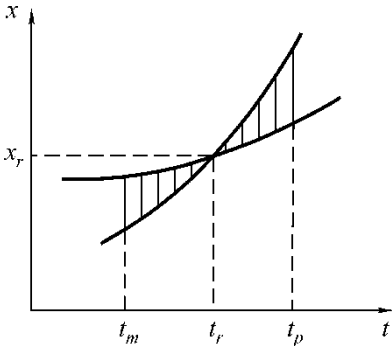


Рис. 14. Зміна параметрів елементів при інтервальних коефіцієнтах зовнішніх впливів

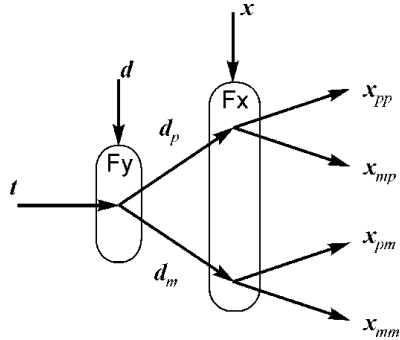


Рис. 15. Граф гіллястої інтервальної структур

Із рис. 16 видно, що використання інтервальних структур дозволяє значно зменшити експлуатаційні відхилення вихідних функцій радіоелектронних пристроїв без погіршення достовірності результату оцінювання.

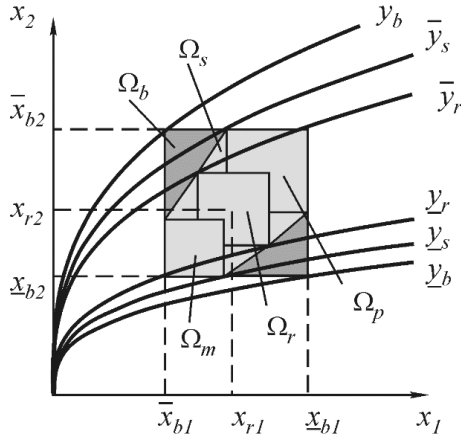


Рис. 16. Формування допусків областей при зовнішніх впливах

Розроблено метод відображень, що надає можливість вирішити задачу синтезу допусків з урахуванням експлуатаційних навантажень. Для геометричної інтерпретації метода на рис. 17 показано формування номінальних допусків областей з урахуванням зовнішніх впливів, де позначено: $\Omega_d^{(0)}$ – початкова допусків область при зовнішніх впливах; $\Omega_r^{(1)}$ – перше наближення номінальної допусків області; $\underline{B}_d^{(0)}, \underline{B}_r^{(0)}, \underline{B}_d^{(1)}$ та $\underline{B}_r^{(1)}$ – точки дотику області працездатності та допусків області в початковому та першому наближеннях при зовнішніх впливах та нормальних

умовах експлуатації; $y_d^{(1)}$ – гранична гіперповерхня області працездатності при зовнішніх впливах у першому наближенні.

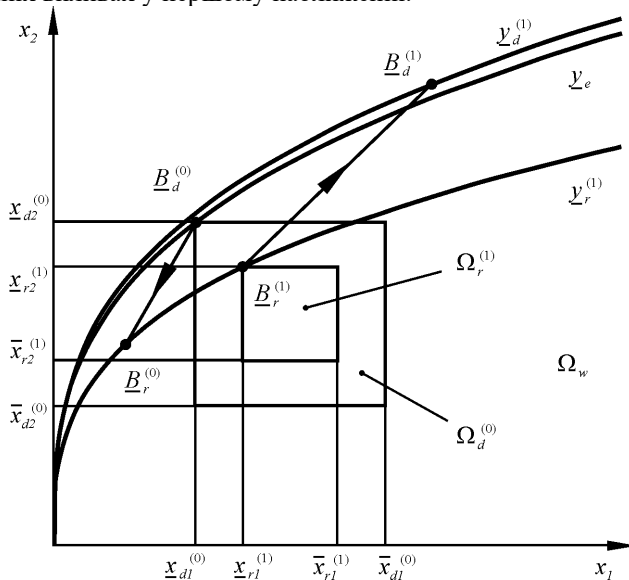


Рис. 17. Формування номінальних допусків областей з урахуванням зовнішніх впливів

На рис. 17 стрілками показано напрямок відображення граничних точок. Граничне значення вихідної функції y_d , що отримано після відображення граничної точки B_r до точки B_d , відрізняється від заданого експлуатаційного значення на величину:

$$\Delta \underline{y}_d = \underline{y}_d - y_e \quad (40)$$

Прирошення (40) відповідає похибці визначення номінального граничного значення вихідної функції:

$$\Delta \underline{y}_r = \Delta \underline{y}_d / \underline{d}_y, \quad (41)$$

де $\Delta \underline{y}_r$ – похибка визначення нижнього граничного значення вихідної функції при нормальних умовах експлуатації; $\underline{d}_y = \underline{y}_d / \underline{y}_r$ – відносна зміна нижнього граничного значення вихідної функції у процесі експлуатації.

На основі методу відображень розроблено алгоритми обчислення допустимих відхилень параметрів для різних стратегій. Показано їх використання для вибору схем фільтрів нижніх частот, які можна реалізувати за неінвертуючою та інвертуючою схемами.

У **сьомому розділі** удосконалено модель архітектури програмного забезпечення для призначення допусків на параметри компонентів

радіоелектронних приладів, яка містить пакети прикладних програм для аналізу, синтезу допусків та вибору елементів з урахуванням законів розподілу параметрів, особливостей технологічних процесів та експлуатаційних навантажень. Розроблено лінгвістичне забезпечення та технології для інтеграції програмного забезпечення у системи автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв. Показано застосування програмного забезпечення як окремої автоматизованої системи для призначення допусків на електричні або конструктивні параметри пристроїв, якщо вихідні характеристики пристрою задані у вигляді математичних моделей, а також як інтегрованого середовища для призначення допусків на основі таблиць значень вихідних характеристик та спеціалізованих макросів для обчислення вихідних характеристик радіоелектронного апарату в САПР. Наведено приклад інтеграції з зовнішньою САПР для аналізу допусків на конструктивні параметри коаксіального фільтра нижніх частот. Встановлення початкових даних для аналізу допусків на параметри фільтру в інтегрованому середовищі наведено на рис. 18.

The screenshot shows a software interface for filter design. The window title is 'Form1'. It has two tabs: 'General parameters' and 'Parameter of filter design'. The 'Parameter of filter design' tab is active, showing a 'Number of links' field set to 19. Below this is a schematic diagram of a filter with 19 links, labeled S1 through S10 and hs1 through hs10. Below the diagram is a table of input parameters with numerical values and spinners.

Parameter	Value	Parameter	Value
S1	4.40	hs1	2.90
S2	8.70	hs2	4.00
S3	9.30	hs3	4.50
S4	9.30	hs4	4.50
S5	9.30	hs5	4.50

At the bottom right of the window is a button labeled 'Model Generation'.

Рис. 18. Вікно вводу початкових даних

Тривимірну модель конструкції фільтра зображено на рис. 19. На рис. 20 наведено приклад впливу незначної зміни конструктивних параметрів ступінчастого переходу коаксіального фільтра на АЧХ.

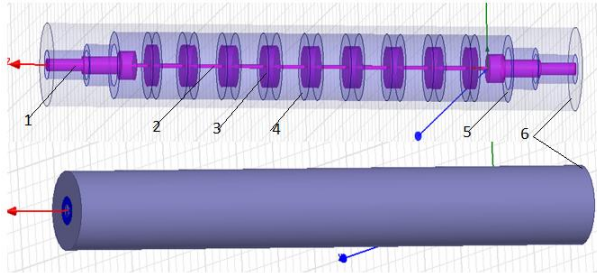


Рис. 19. Тривимірна модель конструкції коаксіального фільтра

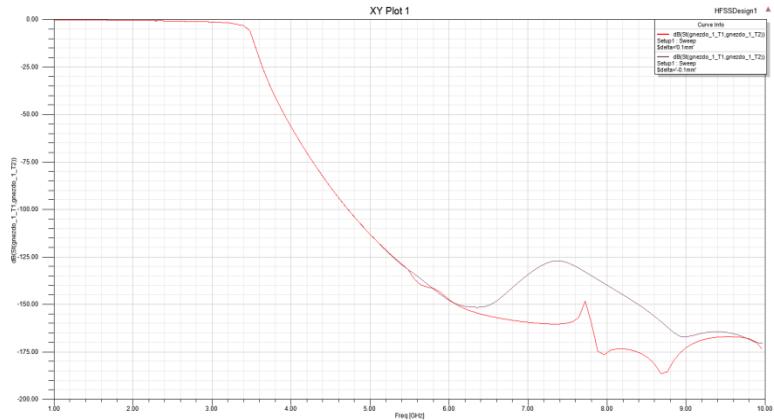


Рис. 20. Вплив зміни конструктивних параметрів на АЧХ фільтра

ВИСНОВКИ

Отримані у дисертації наукові результати у сукупності вирішують науково-прикладну проблему розроблення методів та засобів для допускового проектування радіоелектронних пристроїв з урахуванням технології їх виготовлення, експлуатаційних навантажень, зменшення собівартості готових виробів та можливості інтеграції з САПР РЕА.

При цьому отримано такі основні теоретичні та практичні результати.

1. Обґрунтовано стратегії допускового проектування, що надають можливість у задачах синтезу допусків враховувати особливості технологічного процесу або цінові показники. Розроблено методику порівняння показників стратегій для задач проектування радіоелектронної апаратури.

2. Розроблено метод дотичних для синтезу інтервальних та нормальних допусків, у якому дотичні до межі області працездатності та допускової області співпадають, а допускова область формується як описаний біля області розсіяння брус або еліпс, та який дає можливість значно підвищити точність призначення допусків при нормальному та рівномірному законах розподілу.

3. Розроблено метод для оцінювання розміщень допускових областей в околі працездатності з урахуванням закону розподілу параметрів елементів та кореляційних зв'язків, що надає можливість значно підвищити точність призначення допусків та вибору параметрів елементів.

4. Розроблено метод згладжених вершин для допускового проектування, який містить апроксимацію граничних ділянок законів розподілу функціями подібних до нормального закону та надає можливість підвищити точність призначення допусків у випадку законів розподілу параметрів елементів, заданих статистичними рядами.

5. Удосконалено метод інтервального оцінювання параметрів при дії зовнішніх чинників у вигляді інтервальних структур, що містять інформацію про діапазони змінювання параметрів і коефіцієнти зовнішніх впливів та надають можливість у процедурах призначення допусків та вибору елементів враховувати компенсацію зовнішніх впливів.

6. Розроблено метод відображень для обчислення найнесприятливіших умов дії зовнішніх впливів, який враховує їх можливу компенсацію та надає можливість призначати допуски з урахуванням експлуатаційних навантажень.

7. Запропоновано архітектуру програмного забезпечення для допускового проектування радіоелектронних пристроїв, яка уможливило обчислення допусків за математичними моделями вихідних характеристик або на основі таблично заданих функцій, отриманих за результатами роботи зовнішніх програм моделювання схем електричних принципових або інших САПР.

8. Розроблено алгоритми призначення допусків з урахуванням законів розподілу параметрів, дії зовнішніх чинників та для різних стратегій проектування.

9. Запропоновано технологію інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з різними САПР радіоелектронних пристроїв. Технологія містить три способи інтеграції: розробка інтерфейсного програмного модуля, який використовує спеціалізовані макроси для обчислення вихідних характеристик радіоелектронного апарату в середовищі САПР; розробка внутрішнього застосування в САПР, що реалізує розрахунок вихідних характеристик радіоелектронних апаратів з допомогою API функцій; в діалоговому режимі, коли користувач вводить значення вихідної характеристики, яке обчислено за допомогою спеціалізованої САПР.

Ефективність запропонованих алгоритмів підтверджено результатами обчислювальних експериментів та впровадженням на підприємствах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шило Г.Н. Стратегии назначения интервальных допусков // Кибернетика и системный анализ. 2015. Т. 51, № 4. С. 176-184. (Shilo G. Strategies for assigning interval tolerances // Cybernetics and Systems Analysis. Vol. 51, Is. 4, July 2015. P. 657-666).
2. Шило Г.Н. Назначение допусков методом сглаженных вершин // Проблемы управления и информатики. 2013. №5. С. 84-95. (Shilo G. Assigning tolerances by method of smoothed vertices // Journal of Automation and Information Sciences. BEGELL HOUSE, INC, 2013. Vol. 45, Is.10. P. 36-48).
3. Шило Г.Н. Назначение интервальных допусков методом отображений // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. №5. С. 24-33. (Shilo G. Specification of interval tolerances by the mapping method // Radioelectronics and Communications Systems. 2009. Vol. 52, Is. P. 240-247).
4. Шило Г.Н. Назначения нормальных допусков с учетом ценовых характеристик электрорадиоэлементов // Радиоэлектроника (Известия вузов). 2012. Т. 55, № 3. С. 48-56. (Shilo G. Normal tolerance assigning by given price characteristics of radio components // Radioelectronics and Communications Systems. 2012. V. 55, Is. 3. P. 140-148).
5. Шило Г.Н. Геометрические методы назначения допусков // Проблемы управления и информатики. 2007. № 2. С. 118-126. (Shilo G. Geometric methods of tolerances setting // Journal of Automation and information sciences. 2007. Vol. 39, № 3. P. 51-60).
6. Шило Г.Н. Назначение нормальных допусков методом касательных при корреляционной связи // Прикладная радиоэлектроника. 2007. Том 6, № 4. С. 573-577.
7. Шило Г.М. Інтервальні структури та їх застосування // Комп'ютинг. 2007. Том 6, Вип. 1. С. 80-87.
8. Шило Г.Н., Воропай А.Ю., Гапоненко Н.П. Расчет и назначение допусков методом касательных // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2006. Том 49, № 2. С. 43-53. (Shilo G., Voropai A., Gaponenko N. Calculation and allocation of tolerances by the method of tangents // Radioelectronics and Communications Systems. 2006. V. 49, Is. 2. P. 29-36).
9. Шило Г.М., Веснін І.М., Гапоненко М.П. Вибір стратегії призначення інтервальних допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2012. № 2. С. 52-57.
10. Шило Г.М., Гапоненко М.П., Коваленко Д.А. Расчет допусков методом касательных при корреляционной связи // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2006. № 1. С. 29-32.
11. Шило Г.М., Воропай О.Ю., Гапоненко М.П. Інтервальні методи призначення експлуатаційних допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2003. № 2 (10). С. 78-82.

12. Shilo G., Gaponenko N. Interval methods of assigning the nominal tolerances and choosing elements // *Computing*. 2003V.2(2). 2003. P. 110-113.

13. Шило Г.Н., Воропай А.Ю., Гапоненко Н.П. Назначение интервальных допусков с учетом особенностей элементной базы // *Электроника и связь*. 2006. № 1. С. 21-28.

14. Шило Г.М., Коваленко Д.А. Особливості компенсації зовнішніх впливів при призначенні нормальних допусків // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2007. № 1. С. 44-47.

15. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Призначення нормальних допусків методом відображень // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*". 2008. № 1. С. 37-41

16. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Расчет нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2009. № 1. С. 15-18.

17. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Выбор параметров элементов с учетом внешних воздействий при нормальном законе распределения // *Прикладная радиоэлектроника*. 2010. Т. 9, № 2. С. 254-259.

18. Кришук В.М., Намлинський А.О., Шило Г.М., Гапоненко М.П. Вибір елементів при компенсації зовнішніх впливів // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2004. № 2 (12). С. 36-41.

19. Шило Г.Н., Намлинский А.А., Гапоненко Н.П. Компенсация и оптимизация при назначении номинальных допусков // *Радиоэлектроника и информатика*. 2004. № 2. С. 39-44.

20. Кришук В.М., Шило Г.М., Артюшенко Б.А. Генетичний алгоритм призначення допусків на радіоелементи з інтервальним оцінюванням // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2006. № 2. С. 26-31.

21. Кришук В.Н., Карпуков Л.М., Шило Г.Н., Фарафонов А.Ю, Артюшенко Б.А. Применение генетического алгоритма в задачах допускового синтеза микрополосковых устройств // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2007. № 5. С. 29-32.

22. Кришук В.М., Шило Г.М., Артюшенко Б.А. Вплив параметрів генетичного алгоритму на оптимізацію характеристик антенної решітки при відмовах її активних елементів // *Вісник Національного університету "Львівська Політехніка": Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика*. 2007. № 591. С. 76-81.

23. Shilo G., Artyushenko B., Krischuk V. CHC algorithm for antenna array with failed elements optimization // *Computing*. 2008. V. 7, № 3. P. 79-85.

24. Кришук В.М., Шило Г.М., Артюшенко Б.А. Розпаралелення генетичного алгоритму параметричного синтезу антенної ґратки на комп'ютерній мережі // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2008. № 1. С. 20-23.

25. Shilo G. Geometric methods of assigning tolerances // *Proceedings of the Third IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing*

Systems: Technology and Applications (IDAACS'2005). Sofia (Bulgaria), 2005. P. 513-515.

26. Shilo G. Assigning normal tolerances for correlated parameters // Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2007). Dortmund (Germany), 2007. P. 281-285.

27. Shilo G. Cost optimization in electronics for the problem of interval tolerances assignment // Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009). Rende (Cosenza), Italy, 2009. P. 339-342.

28. Shilo G. Assigning tolerances by normalization method // The 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: proceedings. Berlin (Germany), 2013. P. 149-152.

29. Shilo G. Cost/quality optimization for the problem of normal tolerance assignment // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Prague (Czech Republic), 2011. P. 356-360.

30. Shilo G., Furmanova N. Statistically oriented tolerance design with correlation between parameters of components // Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Bucharest (Romania), 2017. P. 1082-1087.

31. Shilo G., Gaponenko N. Interval methods of assigning the nominal tolerances and choosing elements // Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2003). Lviv, 2003. P. 355-357.

32. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Software for tolerance design // Proceedings of the XIIth International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2012). Lviv-Slavsko (Ukraine), 2012. P. 95.

33. Shilo G., Voropay O., Gaponenko M. Calculating tolerances by tangent method // Proceedings of VIII-th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM'2005). Lviv-Slavsko, 2005. P. 116-118.

34. Krischuk V., Voropay O., Shilo G., Gaponenko M. Interval-statistical analysis of tolerances // Proceedings of the International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2004). Lviv-Slavsko, 2004. P. 575-577.

35. Shilo G., Voropay O., Gaponenko M. Tolerance assignment considering features of radioelements // Proceedings of the International Conference "Information Systems and Technologies". Kharkov, 2005. P. 229-231.

36. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Peculiarities of the external influences compensation in specification of the normal tolerances // Proceedings of the IX th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM 2007). Lviv-Polyana, 2007. P. 311-314.

37. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Tolerance assignment by mapping method // Proceedings of the International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET 2008). Lviv-Slavsko, 2008. P. 509-512.

38. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Calculating tolerances by correlation tangent method // Proceedings of the International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TSCET'2006). Lviv-Slavsko, 2006. P. 588-590.

39. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Selection of accuracy elements parameters under normal distribution law // Proceedings of the Xth International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM'2009). Lviv-Polyana, 2009. P. 155-157.

40. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Tolerance design and electronics elements' selection under external influences // Proceedings of the X th International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2010), dedicated to the 165th Anniversary of Lviv Polytechnic National University. Lviv-Slavsko, 2010. P. 367.

41. Krischuk V., Shilo G., Namlensky A., Gaponenko M. Elements selection with compensation of external influences // Proceedings of VIII-th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM'2005). Lviv-Slavsko, 2005. P. 93-98.

42. Krischuk V., Namlensky A., Shilo G., Gaponenko M. Strategies of element selection when assigning the nominal tolerances // Proceedings of the International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2004). Lviv-Slavsko, 2004. P. 557-559.

43. Krischuk V., Shilo G., Gaponenko N., Farafonov O. Optimization of microstrip filters tolerances // Proceedings of VII-th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM'2003). Lviv-Slavsko, 2003. P. 251-252.

44. Shilo G., Artyushenko B. Engineering constraints calculation during collaborate design // Proceedings of VIII-th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM'2005). Lviv-Slavsko, 2005. P. 86-88.

45. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Tolerable area creation with genetic algorithm // Proceedings of the International Conference "Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TSCET'2006). Lviv-Slavsko, 2006. P. 121-124.

46. Krischuk V., Shilo G., Artushenko B. Tolerable linear antenna array design with genetic algorithm // Proceedings of the IX th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics" (CADSM 2007). Lviv-Polyana, 2007. P. 167-169.

47. Шило Г.Н. Интервальные структуры и их применение // Материалы всероссийского (с международным участием) совещания по интервальному анализу ИНТЕРВАЛ-06. Санкт-Петербург, 2006. С. 150-153.

48. Шило Г.Н. Допусковое проектирование радиоэлектронных устройств методом сглаженных вершин // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя, 2012. С. 274-276.

49. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Расчет и назначение допусков методом касательных при корреляционной связи // Тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф. "Сучасні проблеми досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій". Запоріжжя, 2006. С. 196-197.

50. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Расчет нормальных допусков и выбор элементов при внешних воздействиях // Труды междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2007). Одесса, 2007. С. 278.

51. Шило Г.Н., Гапоненко Н.П., Коваленко Д.А. Назначение нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий // Труды девятой междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2008). Одесса, 2008. С. 96.

52. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Обчислення нормальних допусків з урахуванням відхилень коефіцієнтів зовнішніх впливів // Тези доп. IV міжнар. наук.-практ. конф. "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіоелектроніки, телекомунікацій та інформаційних технологій". Запоріжжя, 2008. С. 184-186.

53. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Выбор элементов при нормальном законе распределения и внешних воздействиях // Труды десятой междунар. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ – 2009). Одесса, 2009. Т. 2. С. 67.

54. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Автоматизація процедур призначення допусків і вибору елементів з урахуванням зовнішніх впливів та вартості // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. / під заг. ред. Д.М.Пізи. Запоріжжя, 2010. С. 200-202.

55. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Програмний комплекс допускового проектування INTOL // Сучасні проблеми і досягнення в галузі

радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя, 2012. С. 270-272.

56. Шило Г.Н., Артюшенко Б.А. Предельное оценивание характеристик направленности антенной решетки // Материалы 3-й междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ-2007"». Севастополь: Издательство СевНТУ, 2007. С. 112.

57. Крищук В.Н., Шило Г.Н., Артюшенко Б.А. Генетический алгоритм назначения нормальных допусков // Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». Запоріжжя, 2006. С. 150-151.

58. Крищук В.Н., Шило Г.Н., Артюшенко Б.А. Назначение гарантированных допусков с учетом производственных ограничений при помощи генетического алгоритма // Труды междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2007). Одесса, 2007. С. 210.

59. Шило Г.Н., Артюшенко Б.А., Крищук В.Н., Романенко С.Н. Допусковый анализ фракталоподобной антенны с применением метода моментов // Сборник трудов 17-й междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 2007. Київ, 2007. С. 402-403.

60. Крищук В.М., Шило Г.М., Артюшенко Б.А. Спосіб призначення допусків на електричні параметри радіоелектронних пристроїв // Пат. 31070 України, МПК8 G06F 17/50, заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет – № u200712981; заявл. 23.11.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6. 3 с.

61. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Комп'ютерна програма «Автоматизована система призначення допусків і вибору елементів» // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 46205 України/ заявник Запорізькій національний технічний університет. Опубл. 05.09.2010. 7 с.

АНОТАЦІЇ

Шило Г.М. Статистично-орієнтовані методи допускового проектування радіоелектронних пристроїв. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – «Системи автоматизації проектувальних робіт». Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему підвищення надійності та точності радіоелектронних пристроїв шляхом розроблення та застосування методів та засобів призначення допусків на електричні та конструктивні параметри елементів, які враховують технологічні та експлуатаційні обмеження, забезпечують багатокритеріальну оптимізацію допусків, а їх програмна реалізація інтегрована з системами

автоматизованого проектування. Обґрунтовано використання стратегій проектування для розв'язку оберненої задачі призначення допусків з урахування особливостей технологічного процесу або цінкових характеристик. Розроблено методи та алгоритми призначення допусків для різних стратегій проектування з урахуванням законів розподілу параметрів та дії зовнішніх чинників. Запропоновані методи та алгоритми використано для розробки програмного забезпечення для допускового проектування радіоелектронних пристроїв. Програмне забезпечення надає можливість обчислювати допуски за математичними моделями вихідних характеристик або на основі заданих таблицею функцій, отриманих за результатами роботи зовнішніх програм моделювання схем електричних принципових або інших систем автоматизованого проектування. Запропоновано технології інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з різними системами автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв.

Ключові слова: допускова область, область працездатності, синтез допусків, радіоелектронні компоненти, закон розподілу, експлуатаційне навантаження, мінімізація собівартості.

Шило Г.Н. Статистически-ориентированные методы допускового проектирования радиоэлектронных устройств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектировочных работ». Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

В диссертационной работе решена научно-прикладная проблема повышения надежности и точности радиоэлектронных устройств за счет разработки и использования методов и средств назначения допусков на электрические и конструктивные параметры элементов, которые учитывают технологические и эксплуатационные ограничения, обеспечивают многокритериальную оптимизацию допусков, а их программная реализация интегрирована с системами автоматизированного проектирования. Предложено использование стратегий проектирования для решения обратной задачи назначения допусков с учетом особенностей технологического процесса или ценовых характеристик. Разработано методы и алгоритмы назначения допусков для разных стратегий проектирования с учетом законов распределения параметров и действия внешних факторов. Предложенные методы и алгоритмы использованы для разработки программного обеспечения для допускового проектирования радиоэлектронных устройств. Программное обеспечение предоставляет возможность рассчитать допуски по математическим моделям выходных характеристик или на основе таблично заданных функций, которые получены в результате работы внешних программ моделирования схем электрических принципиальных или других систем автоматизированного проектирования электронной техники.

Предложено технологии интеграции разработанного программного обеспечения с системами автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств.

Ключевые слова: допусковая область, область работоспособности, синтез допусков, радиоэлектронные компоненты, закон распределения, эксплуатационная нагрузка, минимизация себестоимости.

Shilo G.M. Statistically-oriented methods of the tolerance design of electronic devices. – On the rights of manuscript.

Dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Science in specialty 05.13.12 – Computer-aided systems for design works. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the pressing scientific and applied problem of automation of the tolerance design of electronic devices to increase their accuracy and reliability as well as to reduce the cost.

In the first section the mathematical support and software used for the assignment of tolerances in the computer-aided design systems of electronic devices are analysed.

The second section focuses on the identification of the strategies for tolerance design and the development of methods for the synthesis of tolerance by the criterion of maximum tolerance, equal tolerances, minimum cost and optimal price / quality ratio with the use of interval mathematics.

In the third section the improvement of the methods of analysis and synthesis of tolerances taking into account the normal law of the distribution of parameters of the electronic equipment components is suggested.

The fourth section considers the creation of mathematical models of the laws of distribution of parameters given by statistical series and the development of methods for analysis and synthesis of tolerances with the use of these models.

In the fifth section the study of the influence of the parameters correlation on the tolerance domain form is conducted. Correlation for determining the allowable variations of parameters in these cases is obtained.

The sixth section is devoted to the development of interval structures, which provide the opportunity to consider the compensation with the simultaneous action of external factors and methods for the synthesis of tolerances regarding operational loads.

In the dissertation the tasks for solving the scientific and applied problem of automation of the tolerance design of electronic devices are carried out. It will increase their accuracy and reliability and reduce the cost price. The usage of the designing strategies for the solution of the inverse problem of assigning tolerances taking into account the features of technological or price characteristics is proposed. The mathematical support for choosing the position of the tolerance domains in the operational areas is developed observing the normal law of the

distribution of element parameters and correlation coupling. It makes possible the significant enhancement of the accuracy of the assignment of tolerances and the choice of elements parameters.

The method of tangents assigning of interval and normal tolerances is proposed. In this method the tangents to the boundary of the operability domain and the tolerance domain coincide, and the tolerance domain is formed as described near the dispersion domain of a beam or an ellipse. It enables to significantly improve the accuracy of the assignment of tolerances under normal and uniform laws.

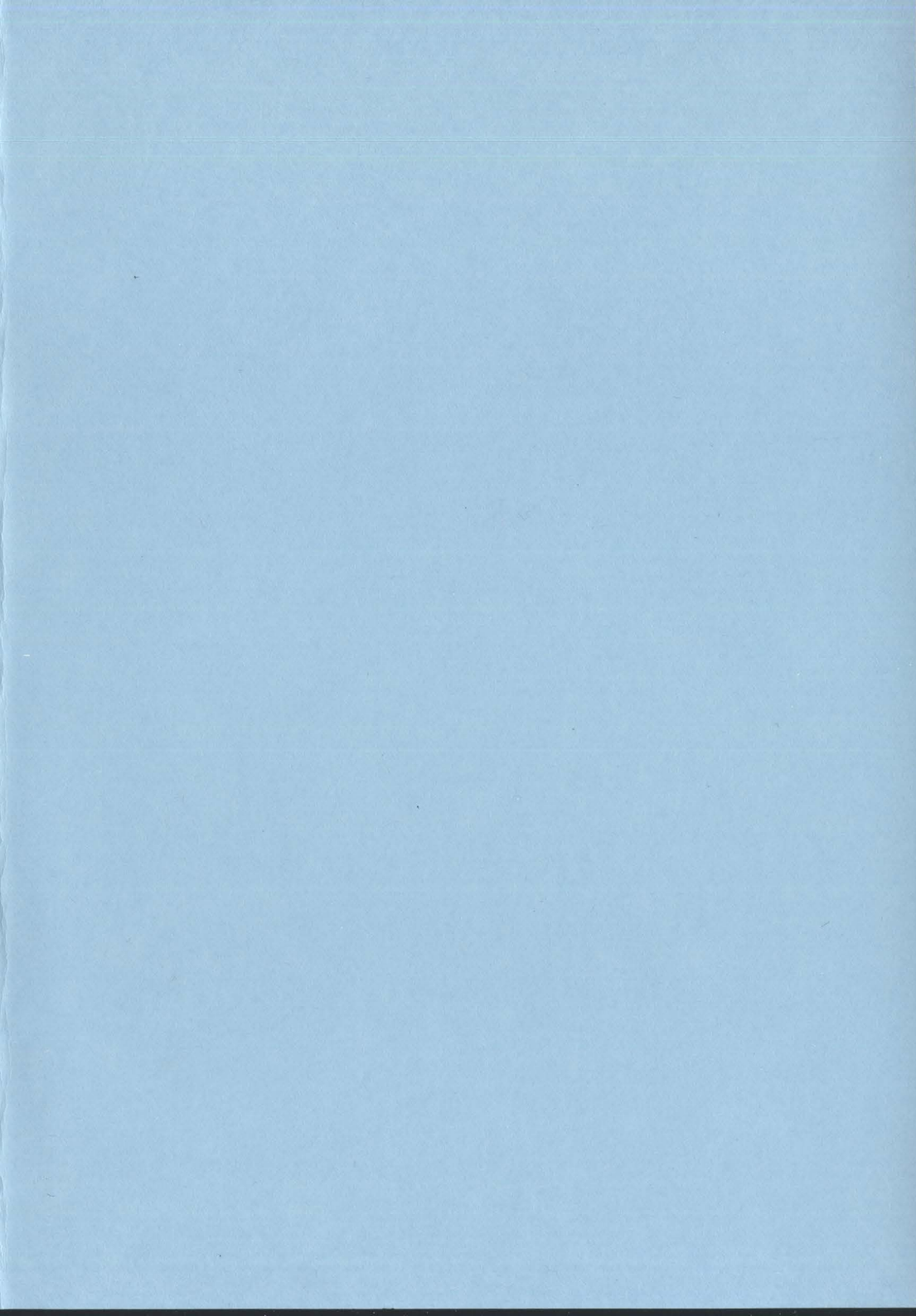
The method of smoothed vertices for tolerance design is developed. It contains the approximation of boundary sections of distribution laws by functions similar to the normal law and gives a possibility to increase the accuracy of assignment of tolerances in the case of the distribution laws of elements parameters given by statistical series.

The method of interval estimation of parameters under the influence of external influences in the form of interval structures is proposed. These structures contain information on the ranges of parameters change and the possibility of considering the compensation of external influences in the procedures of assigning tolerances and choosing elements.

The reflection method is developed to calculate the most rugged conditions for external influences considering their possible compensation and enables to assign tolerances taking into account operational loads.

The algorithms and methods of assigning tolerances for different designing strategies are developed considering the various laws of parameters distribution and the influence of external factors. The proposed methods and algorithms are used to develop software for the tolerance design of radio electronic devices. The software provides the possibility to calculate tolerances by mathematical models of output characteristics or using tabulated functions derived from the results of external software of electronic circuit simulation or other CAD systems. The technology of integrating the software of tolerance design with various CAD systems of electronic devices is proposed.

Keywords: tolerance area, operational area, tolerance synthesis, electronic components, distribution, operational loads, cost minimization.



Підписано до друку 03.11.2018р.
Формат 60x90/16. Папір офсетний. Друк - цифровий.
Умовн.друк.арк. 1,56. Тираж 150 прим. Зам. N 3501 2018р.

АТ "МОТОР СІЧ"

пр. Моторобудівників, 15, м. Запоріжжя, 69068

Тел.: 061-720-42-49

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК N 4213 від 22.11.2011 р.