

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шило Галина Миколаївна

УДК 621.396.6.004 : 004.896

ДИСЕРТАЦІЯ

**Статистично-орієнтовані методи допускового проектування
радіоелектронних пристроїв**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант
Піза Дмитро Макарович,
доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ :

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

/Р.А. Бунь/

Запоріжжя – 2018

АНОТАЦІЯ

Шило Г.М. Статистично-орієнтовані методи допускового проектування радіоелектронних пристроїв. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 «системи автоматизації проектувальних робіт» – Запорізькій національний технічний університет МОН України, Запоріжжя, 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. У першому розділі проаналізовано математичне та програмне забезпечення, що використовується для задач призначення допусків в системах автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв. Другий розділ присвячено визначенню стратегій допускового проектування та розробленню методу синтезу гарантованих допусків за критерієм максимального об'єму допускової області, рівних допусків, мінімальної вартості та оптимального співвідношення ціна/якість з використанням інтервальної математики. У третьому розділі запропоновано вдосконалення методів аналізу та синтезу допусків з урахуванням нормального закону розподілу значень параметрів компонентів радіоелектронної апаратури. Четвертий розділ присвячено створенню математичних моделей законів розподілу параметрів, заданих статистичними рядами та розробленню методів аналізу та синтезу допусків з використанням цих моделей. У п'ятому розділі проведено дослідження впливу кореляції параметрів на форму допускових областей, отримано співвідношення для визначення допустимих відхилень параметрів в цих випадках. Шостий

розділ присвячено розробленню інтервальних структур, що надають можливість враховувати компенсацію при одночасній дії зовнішніх факторів та методів синтезу допусків з урахуванням експлуатаційних навантажень. У цьому розділі наводиться опис моделі архітектури інтегрованого середовища для автоматизації допускового проектування, що містить засоби для створення інтерфейсу з зовнішніми САПР.

У дисертаційній роботі обґрунтовано використання стратегій допускового проектування для розв'язку оберненої задачі синтезу допусків з урахуванням особливостей технологічного процесу або цінкових характеристик. Для кожної запропонованої стратегії було сформовано критерії оптимальності та вирішено задачу пошуку умовного екстремуму за допомогою метода множників Лагранжа. Визначено співвідношення для синтезу допусків з використанням стратегій: рівних допусків (δ -стратегія), максимального об'єму допускової області (V -стратегія), мінімальної вартості (P -стратегія) та оптимального співвідношення ціна/якість (P/V -стратегія). Запропоновано критерії для порівняння показників стратегій.

Розроблено математичне забезпечення для вибору положення допускових областей в області працездатності з урахуванням нормального закону розподілу параметрів елементів та кореляційних зв'язків, що надає можливість значно підвищити точність призначення допусків та вибору параметрів елементів. Показано, що наявність кореляційного зв'язку між параметрами призводить до зміни допустимих відхилень порівняно із взаємонезалежним розподілом параметрів. Змінна відхилень може проходити як в сторону їх зменшення до інтервальних допусків, так і в сторону збільшення.

Розроблено метод дотичних для призначення інтервальних та нормальних допусків, в якому дотичні до межі області працездатності та допускової області співпадають, а допускова область формується як описаний біля області розсіяння брус або еліпс, та надає можливість значно підвищити точність призначення допусків при нормальному та рівномірному законів. Показано, що між інтервальними та нормальними допусками існує однозначний

взаємозв'язок. Для стратегії максимального об'єму нормальні допуски більше інтервальних в \sqrt{n} , де n – кількість параметрів. Проведено порівняння методу дотичних з точним визначенням граничних значень вихідної функції при заданій ймовірності попадання у простір області працездатності та методом моментів. При відхиленнях вхідних параметрів $\delta_j = 20\%$ метод моментів дає похибку вище 28%, а метод дотичних забезпечував точність обчислень допусків не гірше 0,225%. Похибка обчислень в методі дотичних обумовлена обмеженнями області працездатності. При збільшенні кількості параметрів похибка метода зменшується.

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. В цьому методі допускова область формується у вигляді бруса зі згладженими вершинами. Оцінювання форми закону розподілу проводиться з допомогою коефіцієнтів нормалізації, який показує співвідношення поля розсіяння граничної моделі та граничного відхилення значення параметра статистичного ряду. Коефіцієнт приймає нульове значення у випадку інтервального закону розподілу значень параметрів. При нормальному законі розподілу значення коефіцієнта нормалізації дорівнює 1. Це надає можливість розглядати коефіцієнт нормалізації як критерій близькості закону розподілу, який задано статистичним рядом, до нормального розподілу з точки зору формування допустимих відхилень значень параметрів.

Запропоновано метод інтервального оцінювання параметрів при дії зовнішніх впливів у вигляді інтервальних структур, що містять інформацію про діапазони змінювання параметрів та надають можливість в процедурах призначення допусків та вибору елементів враховувати компенсацію зовнішніх впливів. 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. Це спрощує процедури призначення коефіцієнтів зовнішніх впливів і номінальних відхилень параметрів, забезпечує можливість використовувати при призначенні номінальних та експлуатаційних допусків різні стратегії.

Розроблено метод відображень, що обчислює найнесприятливіші умови дії зовнішніх впливів, враховує їх можливу компенсацію та надає можливість призначати допуски з урахуванням експлуатаційних навантажень. Це гарантує, що значення вихідних функцій при зовнішніх впливах не будуть виходити за задані обмеження. Метод надає можливість враховувати реальні значення коефіцієнтів зовнішніх впливів з їх відхиленнями та різну інтенсивність зовнішнього впливу на кожний елемент. Дослідження дії коефіцієнтів зовнішніх впливів на вихідні характеристики смугового фільтра показало, що основним фактором, який обмежує точність пристроїв, є старіння елементів. Показано використання методу для вибору схем фільтрів нижніх частот, які можна реалізувати за неінвертуючою та інвертуючою схемами.

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. 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 принципів або інших систем автоматизованого проектування. Запропоновано технології інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з різними системами автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв. Ефективність розроблених методів, алгоритмів та програмного забезпечення підтверджено результатами обчислювальних експериментів та впровадженням на підприємствах радіоприладобудівної галузі.

Ключові слова: допускowa область, область працездатності, синтез допусків, радіoeлектронні компоненти, закони розподілу, експлуатаційні навантаження, мінімізація собівартості.

Список публікацій здобувача:

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. Интервальні 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 M. 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. Интервальные методы 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. 2003. Vol. 2. Is. 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. Крищук 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. Крищук 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. Крищук 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. Крищук 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. Крищук 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–Slavske (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'20004). 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 Запорізький національний технічний університет. Опубл. 05.09.2010. 7 с.

SUMMARY

Shilo G.M. Statistical-oriented methods of the tolerance design of electronic devices. – Qualifying scientific thesis (manuscript).

A 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. - Zaporizhzhia National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhzhia, 2018.

The dissertation is devoted to the pressing scientific and applied problem of automation of increasing the reliability and accuracy of electronic devices by developing the mathematical methods and software for assigning deviations on electrical and structural parameters of elements. This software takes into account manufacturing and operability restrictions, provides multi-criterial optimization of deviations and is integrated in CAD systems. In Chapter One the mathematical support and software used for the assignment of tolerances in the computer-aided design systems for electronic devices is analysed. Chapter Two is devoted to the identification of strategies for tolerance design and the development of methods for the tolerance synthesis by the criterion of maximum tolerance, equal tolerances, minimum cost and optimal price/ quality correlation. In Chapter Three improved methods for analysis and synthesis of tolerances considering the normal law of distribution of the electronic components parameters is suggested. In Chapter Four mathematical models for the laws of parameters distribution given by statistical series are designed and methods for tolerance analysis and synthesis with these models are developed. In Chapter Five the influence of the parameters correlation on the tolerance domain form was studied. The relation for defining the allowable variations of parameters was obtained in these cases. Chapter Six is devoted to the development of interval structures, which enable to take into account the compensation with the simultaneous action of external factors and methods for the synthesis of tolerances regarding operational loads. In Chapter Seven the description of the model of

integrated environment architecture for automation of for tolerance design, which contains tools for creating an interface with external CAD systems, is presented.

In the dissertation the usage of tolerance design strategies for the solution of the inverse problem of tolerances synthesis regarding the features of technological process or price characteristics is suggested. For each strategy, the optimality criteria were formulated and the problem of the search for conditional extremum was solved by means of the Lagrange multiplier method. The ratio for the tolerance synthesis using the following strategies was identified equal tolerances (δ -strategy), maximum tolerance volume (V -strategy), minimum price (P -strategy) and optimal price/quality (P/V -strategy) ratio are defined. Criteria for comparing the strategies are proposed.

The mathematical support for choosing the position of tolerance domains in operational domains is developed observing the normal law of the distribution of parameters and correlation. It significantly improves the accuracy of the tolerance assignment and the selection of component parameters. It is shown that the correlation between parameters leads to a perturbation in permissible deviations compared to an interindependent distribution of parameters. The perturbation of deviations can take place both in the direction of their reduction to interval tolerances, and in the direction of increase.

The tangent method for assignment of interval and normal tolerances is developed. In this method tangents to the boundary of the operability domain and the tolerance domain coincide, and the tolerance domain is formed like a beam or an ellipse circumscribed near the dispersion domain. It allows to significantly enhance the accuracy of the assignment of tolerances under normal and uniform laws. It is shown that there is a univocal relationship between intervals and normal tolerances. For a maximal volume strategy, the normal tolerances are greater than interval ones by \sqrt{n} times, where n is the number of parameters. The comparison of results of the tangent method and method with precise definitions of the boundary values of the original function with a given probability of getting inside the operability domain and the method of moments is performed. If deviations of the input parameters are equal

to $\delta_j = 20\%$, the method of moments gives an error higher than 28%. The tangent method provides the accuracy of the calculations of tolerances is not higher than 0.225%. The error in the calculations in the tangent method depends on limitations of the operability domain. If the number of parameters increases, the error of the method decreases.

The method of smoothed vertices for tolerance design is developed. It contains the approximation of boundary sections of distribution laws by functions that are similar to the normal law and gives an opportunity to increase the accuracy of assignment of tolerances in case of the distribution laws of elements parameters given by statistical series. In this method the tolerance domain is formed like a beam with smoothed vertices. The estimation of the form of the distribution law is carried out using the normalization coefficients, which shows the relation between the scattering domain of the boundary model and the deviation of parameter value of the statistical series. The coefficient assumes zero value in case of an interval law of the distribution of parameter values. Under the normal distribution law, the value of the normalization coefficient is equal to 1. This allows to consider the normalization coefficient as the proximity criterion of the distribution law given by the statistical series to the normal distribution in terms of the formation of the permissible tolerance deviations of parameter values.

The method of interval estimation of parameters under the influence of external factors in the form of interval structures is proposed. These structures contain information on the ranges of parameters change and give the possibility to consider the compensation of external influence in the procedures of assigning tolerances and choosing elements. In the dissertation the existing interval structures with floating boundaries and floating intervals were further developed, and new structures with bound intervals and branched interval structures are introduced.

The reflection method is developed to calculate the most unfavourable conditions of external influences regarding their possible compensation and allows to assign tolerances taking into account operational loads. The method makes it possible to take into account the values of the coefficients of external influences with their

deviations and the different intensity of external influence on each element. The use of the method for selecting low frequency filter circuits that can be implemented through non-inverting and inverting circuits is shown.

The algorithms of assigning tolerances for strategies of equal tolerances, maximum volume of tolerances, minimum price and optimal price/quality ratio are developed, considering the various laws of parameters distribution and the influence of external factors. The proposed methods and algorithms have been used to develop software for the tolerance design of radio electronic devices. The software provides the ability to calculate tolerances by mathematical models of output characteristics or using tabulated functions derived from the results of external program of circuit simulation or other CAD systems. The software architecture model for the integrated environment of the CAD system is improved, which, unlike the existing ones, contains application software packages for the tolerance design of electronic devices. The technology of integrating the software for tolerance design with different CAD systems of radio electronic devices is proposed. The effectiveness of the developed methods, algorithms and software is confirmed by the results of computational experiments and implementation at the enterprises of the radio engineering industry.

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

The list of author's publications:

1. Shilo G. Strategies for Assigning Interval Tolerances // Cybernetics and Systems Analysis. 2015. Vol. 51 Is. 4. P. 657-666.
2. Shilo G. Assigning Tolerances by Method of Smoothed Vertices // Journal of Automation and Information Sciences. 2013. Vol. 45 Is. 10. P. 36-48.
3. Shilo G. Specification of interval tolerances by the mapping method // Radioelectronics and Communications Systems. 2009. Vol. 52. Is. 5. P. 240-247.
4. Shilo G. Normal tolerance assigning by given price characteristics of radio components // Radioelectronics and Communications Systems. 2012. Vol. 55. Is. 3. P. 140-148.
5. Shilo G. Geometric Methods of Tolerances Setting // Journal of

Automation and information sciences. 2007. Vol. 39. Is. 3. P. 51-60.

6. Shilo G. The assignment of normal tolerances by the tangential method with correlation coupling // Applied radioelectronics. 2007. Vol. 6. Is. 4. P. 573-577 (in Russian).

7. Shilo G. Interval structures and their applications // Computing. 2007. Vol. 6, Is. 1. P. 80-87 (in Ukrainian).

8. Shilo G. Calculation and allocation of tolerances by the method of tangents // Radioelectronics and Communications Systems. 2006. Vol. 49. Is. 2. P. 29-36.

9. Shilo G., Vesnin I., Gaponenko M. Selecting a strategy for assigning interval tolerances // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2012. Is. 2 P. 52-57 (in Ukrainian).

10. Shilo G., Gaponenko M., Kovalenko D. Tolerances calculation by tangential method with correlation coupling // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2006. Is. 1. P. 29-32 (in Russian).

11. Shilo G., Voropay O., Gaponenko M. Interval Methods of Assigning the Operating Tolerances // Radio Electronics, Computer Science, Control. Vol. 10 Is. 2, 2003. P. 78-82 (in Ukrainian).

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

13. Shilo G., Voropay A., Gaponenko N. Assigning of interval tolerances with considering features of the element base // Electronics and Communications. 2006. Is. 1. P. 21-28 (in Russian).

14. Shilo G., Kovalenko D. Compensation features of external influences in the assigning normal tolerances // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2007. Is. 1. P. 44-47 (in Ukrainian).

15. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Assignment of normal tolerances by the method of reflections // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2008. Is. 1, P. 37-41 (in Ukrainian).

16. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko N. Normal tolerances calculation with

considering deviations of external influences coefficients // Technology and design in electronic equipment. 2009. Is. 1. P. 15-18 (in Russian).

17. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Selection of the elements parameters with considering external influences under the normal distribution law // Applied radioelectronics. 2010. Vol. 9. Is. 2. P. 254-259 (in Russian).

18. Krischuk V., Namlensky A., Shilo G., Gaponenko M. Element choosing for compensation of external influences // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2004. Vol. 12. Is. 2. P. 36-41 (in Ukrainian).

19. Shilo G., Namlensky A., Gaponenko M. Compensation and optimization in the assigning of nominal tolerances // Radioelectronics & Informatics. 2004. Is. 2. P. 39-44 (in Russian).

20. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Genetic algorithm for assigning tolerances to radioelements with interval evaluation // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2006. Is. 2. P. 26-31 (in Ukrainian).

21. Krischuk V., Karpukov L., Shilo G., Farafonov A., Artyushenko B. The application of the genetic algorithm in the problems of tolerance synthesis of microstrip devices // Technology and design in electronic equipment. 2007. Is. 5, P. 29-32 (in Russian).

22. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Influence of the genetic algorithm parameters on optimization of the antenna array characteristics at failures of its active elements // Bulletin of Lviv Polytechnic National University. 2007. Vol. 591, P. 76-81 (in Ukrainian).

23. Shilo G., Artyushenko B., Krischuk V. CHC Algorithm for Antenna Array with Failed Elements Optimization // Computing. 2008. Vol. 7 Is. 3. P. 79-85.

24. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Parallelization of the genetic algorithm of parametric synthesis of antenna array with a computer network // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2008. Is.1, P.20-23 (in Ukrainian).

25. Shilo G. Geometric Methods of Assigning Tolerances // Proc. 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–Slavske (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'20004). 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. Shilo G. Interval structures and their using // Materials of the all-Russian (with international participation) meeting on interval analysis INTERVAL-06. St. Petersburg. 2006. P. 150-153 (in Russian).

48. Shilo G. Tolerance design of radio electronic devices using the method of smoothed vertices // The proceedings of the VI International Scientific-practical conference "Modern Problems and Achievements of Radio Engineering,

Telecommunications and Information Technologies”, Zaporizhzhia, 2012. P. 274-276 (in Russian).

49. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Calculation and assignment of tolerances by the tangential method in the case of correlation coupling // The proceedings of the III International Scientific-practical conference “Modern Problems and Achievements of Radio Engineering, Telecommunications and Information Technologies”, Zaporizhzhia, 2006. P. 196-197 (in Russian).

50. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko N. Calculation of normal tolerances and selection of elements under external influences // Materials of the International scientific-practical conference «Modern Information and Electronic Technologies», Odessa, 2007. P. 278 (in Russian).

51. Shilo G., Gaponenko M., Kovalenko D. Assignment of normal tolerances taking into account deviations in the coefficients of external influences // Materials of the International scientific-practical conference «Modern Information and Electronic Technologies». Odessa. 2008. P. 96 (in Russian).

52. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Calculation of normal tolerances, with considering deviations of the external influences coefficients // The proceedings of the IV International Scientific-practical conference “Modern Problems and Achievements of Radio Engineering, Telecommunications and Information Technologies”. Zaporizhzhia. 2008. P. 184-186 (in Ukrainian).

53. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Elements choosing under normal distribution law and external influences // Materials of the International scientific-practical conference «Modern Information and Electronic Technologies». Odessa. 2009. P. 67 (in Russian).

54. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Automation of procedures for assigning tolerances and choosing elements with considering external influences and costs // The proceedings of the V International Scientific-practical conference “Modern Problems and Achievements of Radio Engineering, Telecommunications and Information Technologies”. Zaporizhzhia. 2010. P. 200-202 (in Ukrainian).

55. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Program complex for tolerance

design INTOL // The proceedings of the VI International Scientific-practical conference “Modern Problems and Achievements of Radio Engineering, Telecommunications and Information Technologies”. Zaporizhzhia. 2012. P. 270-272 (in Ukrainian).

56. Shilo G., Artyushenko B. Limiting estimation of the directional characteristics of antenna array // Proceedings of the 3rd International youth scientific and technical conference “Modern problems of radio engineering and telecommunications” "RT-2007". Sevastopol. 2007. P. 112 (in Russian).

57. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Genetic algorithm for the normal tolerances assigning // Proceedings of the International Scientific-practical conference “Modern Problems and Achievements of Radio Engineering, Telecommunications and Information Technologies”. Zaporizhzhia. 2006. P. 150-151 (in Russian).

58. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Assignment of the guaranteed tolerances with considering production constraints using genetic algorithm // Materials of the International scientific-practical conference «Modern Information and Electronic Technologies». Odessa. 2007. P. 210 (in Russian).

59. Shilo G., Artyushenko B., Krischuk V., Romanenko S. Tolerance analysis of a fractal-like antenna using the method of moments // Proceeding of the 17th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”. Sevastopol. 2007. P. 402-403 (in Russian).

60. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Method of assigning tolerances to electrical parameters of electronic devices // Patent 31070 of Ukraine, MIIK8 G06F 17/50, Applicant and patent holder Zaporizhzhia National Technical University – № u200712981; stated. 11/23/2007; has published March 25, 2008. Bul. No. 6. 3 p. (in Ukrainian).

61. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Computer program "Automated system of tolerances assignment and elements choosing" // Certificate of registration of copyright for the product 46205 of Ukraine / Applicant Zaporizhzhya National Technical University, has published 09/05/2010 7 p. (in Ukrainian).

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- CAD – (computer-aided design) автоматизоване проектування.
- ECAD – (electronic CAD) автоматизоване проектування електронних систем.
- MCAD – (mechanical CAD) автоматизоване проектування механічних систем.
- EDA – (electronic design automation) проектування електронних пристроїв.
- CAM – (computer-aided manufacturing) автоматизоване виробництво.
- CAE – (computer-aided engineering) автоматизоване конструювання.
- РЕА – радіоелектронна апаратура.
- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика.
- САПР – система автоматизованого проектування.

ЗМІСТ

ВСТУП	29
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНЕ МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДОПУСКОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ.	37
1.1 Аналіз структури та етапів проектування радіоелектронної апаратури	37
1.2 Мережева математична модель задач допускового проектування радіоелектронних пристроїв.	45
1.3 Аналіз методів допускового проектування радіоелектронних пристроїв.....	53
1.4 Автоматизація процедур допускового проектування в ECAD та CAE системах	67
1.5 Постановка мети та задач дослідження.....	80
1.6 Висновки до розділу 1	83
РОЗДІЛ 2. МЕТОД СИНТЕЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ	85
2.1 Метод дотичних для синтезу інтервальних допусків.....	85
2.2 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією однакових допусків.....	90
2.3 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією максимального об'єму допускової області.	96
2.4 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією мінімальної вартості.....	98
2.5 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією ціна/якість...	102
2.6 Методика вибору стратегії інтервального допускового проектування	106
2.7 Висновки до розділу 2.....	110

РОЗДІЛ 3. ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИ НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНІ РОЗПОДІЛУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ	112
3.1 Метод дотичних для синтезу допусків при нормальному законі розподілу параметрів	112
3.2 Алгоритм синтезу нормальних допусків за стратегією максимального об'єму при нормальному законі розподілу параметрів.	118
3.3 Алгоритм синтезу нормальних допусків за цінovими стратегіями призначення нормальних допусків.....	123
3.4 Дослідження параметрів стратегій допускового проектування при нормальному законі розподілу	131
3.5 Висновки до розділу 3	136
РОЗДІЛ 4. СТАТИСТИЧНО-ОРІЄНТОВАНЕ ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ.....	138
4.1 Математичні моделі законів розподілу параметрів, заданих статистичними рядами.	138
4.2 Метод згладжених вершин для аналізу та синтезу допусків на параметри елементів, закон розподілу яких задано статистичними рядами.	143
4.3 Алгоритм призначення статистично-орієнтованих допусків.	148
4.4 Дослідження параметрів допускового проектування при законах розподілу заданих статистичними рядами.....	155
4.5 Висновки.	157
РОЗДІЛ 5. ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКАХ МІЖ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕМЕНТІВ.	159
5.1 Метод для аналізу допусків з урахування кореляційних зв'язків між параметрами елементів.	159
5.2 Метод призначення нормальних допусків при кореляційних зв'язках між параметрами елементів.....	166

5.3	Метод призначення статистично-орієнтованих допусків з урахуванням кореляційних зв'язків між параметрами елементів.	173
5.4	Висновки до розділу 5	184
РОЗДІЛ 6. ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ НА РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ.....		
6.1	Інтервальне оцінювання параметрів елементів при зовнішніх впливах	187
6.2	Метод відображень для призначення інтервальних допусків на параметри елементів з урахуванням експлуатаційних навантажень на радіоелектронну апаратуру.	200
6.3	Вибір елементів з урахуванням дії зовнішніх чинників	222
6.4	Висновки до розділу 6.....	232
РОЗДІЛ 7. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОПУСКОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ.....		
7.1	Архітектура програмного забезпечення допускового проектування радіоелектронних пристроїв.	235
7.2	Лінгвістичне забезпечення для допускового проектування	243
7.3	Методика застосування системи допускового проектування	249
7.4	Методика інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з сучасними САПР радіоелектронних пристроїв.	259
7.5	Висновки до розділу 7.....	273
ВИСНОВКИ		275
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		276
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....		306
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів.....		310

ВСТУП

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 І.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., Бондарєва А.П., Spence R., Kolev L.V., Spagnuolo G., Єрмолаєва 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:

– 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.

– 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.

– 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 цінові 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 врахуванням 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. Технологія інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з САПР радіоелектронних пристроїв.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні телеметричних приладів для супутників та ракетноносіїв 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 мікросмужкових 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 проблемы радиотехники и телекоммуникаций "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 сторінку, із них 250 сторінок основного тексту, 60 рисунків, 31 таблиця, список використаних джерел із 297 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНЕ МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДОПУСКОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

1.1 Аналіз структури та етапів проектування радіоелектронної апаратури

Проблема точності та надійності радіоелектронної апаратури є комплексною та охоплює всі стадії життєвого циклу. Особливе місце для вирішення цієї проблеми належить стадії проектування, бо саме тут відбувається вибір схемних та конструктивних рішень, розробляються технологічні операції, формуються вимоги та правила експлуатації радіоелектронних пристроїв [1-3]. Для радіоелектронної апаратури оборонного призначення задача підвищення точності та надійності стає особливо актуальною [4, 5].

Радіоелектронна апаратура (РЕА) є складовою частиною систем передачі інформації, в яких вона виконує функції прийому, обробки, відображення, зберігання та передачі інформації [6]. Загальна структура радіоелектронного апарата показана на рис. 1.1 і містить: 1 – пристрій живлення; 2 – пристрій керування та відображення інформації; 3 – пристрій обробки і зберігання інформації; 4 – пристрій прийому та передачі інформації; 5 – лінії зв'язку; 6 – несучі конструкції.

Пристрої живлення можуть бути автономними енергетичними пристроями або використовувати енергетичні ресурси із енергетичних мереж. Ці пристрої складаються із сукупності джерел постійного і (при необхідності) змінного струму з параметрами необхідними для живлення усіх пристроїв радіоелектронного апарата.

Пристрої керування і відображення інформації у складних радіоелектронних апаратах мають вигляд пульта керування, який має необхідний інтерфейс для роботи оператора. Використовуються режими регулювання, автоматизованого та ручного керування. Пристрої керування мають оптичний та звуковий інтерфейси у вигляді індикаторних пристроїв та пристроїв генерування звукових сигналів.

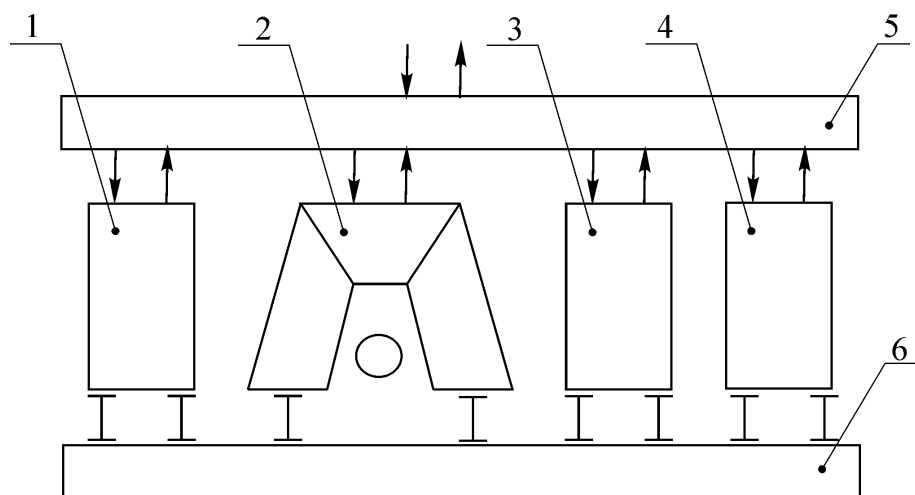


Рисунок 1.1 – Загальна структура радіоелектронного апарата

Пристрої обробки і зберігання інформації відповідальні за перетворення сигналів, які передаються до пристроїв керування або приймача-передавача. В режимі роботи приймача відбувається перетворення сигналів до вигляду, необхідному для відображення і запису інформації та формування сигналів керування апаратурою. В режимі передавача відбувається формування сигналів, що передаються через лінії зв'язку у навколишнє середовище.

Пристрої прийому та передачі інформації виділяють необхідні інформаційні сигнали із навколишнього середовища або формують відповідні сигнали для випромінювання в навколишнє середовище. В режимі прийому відбувається фільтрація та підсилення сигналів. Інформаційні сигнали, що формуються радіоелектронним апаратом, в режимі передачі інформації

підсилюються і перетворюються в сигнали випромінювання відповідного частотного діапазону.

Лінії зв'язку формують енергетичну мережу для живлення усіх пристроїв та забезпечують обмін інформацією між пристроями радіоелектронного апарату. Лінії зв'язку можуть мати антенні пристрої для випромінювання сигналів радіочастотного діапазону, периферійні пристрої оптичних систем передачі інформації та адаптери ліній телефонного зв'язку. В загальному випадку лінії зв'язку мають ще й енергетичний інтерфейс для сполучення з мережами енергопостачання.

Усі пристрої радіоелектронного апарату розташовуються на несучій конструкції, яка виконує функції захисту РЕА від зовнішніх впливів. У зв'язку з цим несуча конструкція формується найчастіше як замкнене середовище, всередині якого розташовуються пристрої радіоелектронного апарату. Таким чином, несуча конструкція є основою (корпусом) радіоелектронного апарату, який захищає пристрої від експлуатаційних впливів: зміни температур та тиску, механічних та електромагнітних навантажень, вологості, агресивних газів і т. ін. Разом з цим несуча конструкція повинна мати зручні інтерфейси – конструктивні елементи, через які відбувається вплив персоналу на радіоелектронний апарат. Можна виділити інтерфейси несучої конструкції: монтажний, ремонтний, операторний, транспортний та технологічний.

Монтажні інтерфейси несучих конструкцій повинні забезпечувати необхідну міцність закріплення пристроїв та однозначне їх з'єднання з лініями зв'язку. Тому в несучих конструкціях і лініях зв'язку не допускається використання однакових з'єднувачів. Ремонтні і транспортні інтерфейси передбачають наявність в несучій конструкції елементів, які забезпечують доступність контролю і ремонту пристроїв та зручність транспортування апарату. Інтерфейс обслуговування (операторний) повинен передбачати зручність організації роботи РЕА. Задачею технологічного інтерфейсу є введення в несучу конструкцію додаткових конструктивних елементів, які

полегшують процес виготовлення радіоелектронного апарату або знімають деякі технологічні обмеження.

Подібну структуру мають усі, без винятку, радіоелектронні апарати, від мобільного телефону, радіоприймача і телевізора до радіолокаційних станцій та навігаційних систем. Тільки у великих системах виконання різних функцій покладається на окремі пристрої, а у малогабаритних радіоелектронних апаратах більшість функцій інтегрована в одному пристрої. При виготовленні складних радіоелектронних апаратів кожен із його пристроїв розглядається як окремий радіоелектронний апарат, що призвело до ієрархічної структури побудови РЕА (рис. 1.2).

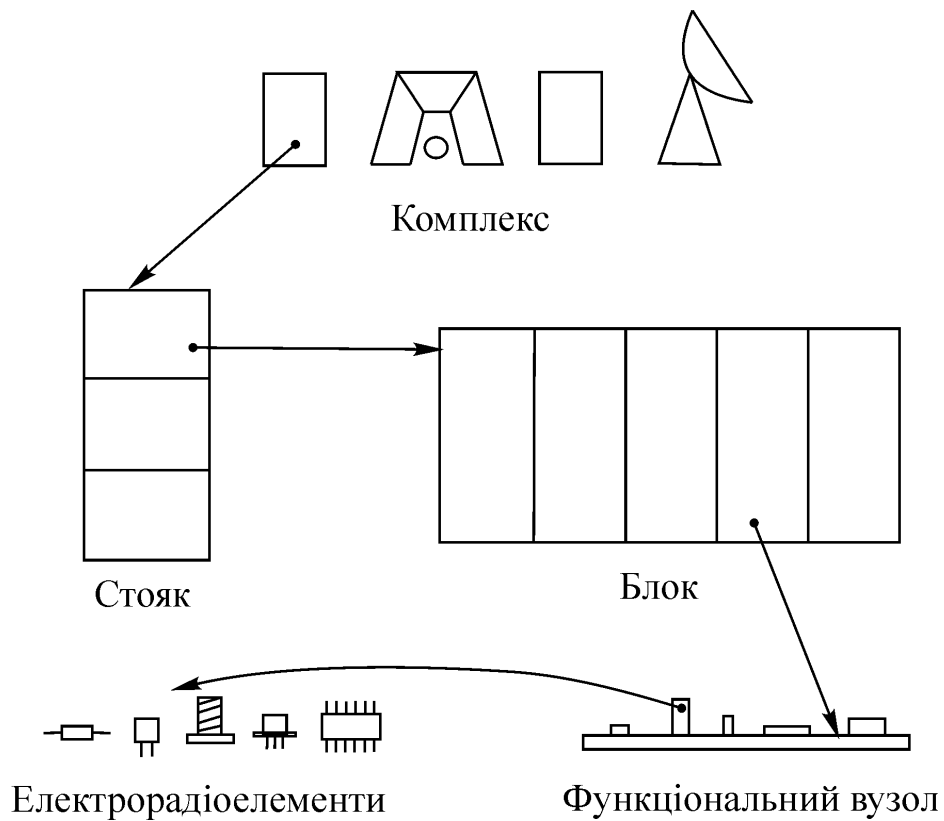


Рисунок 1.2 – Ієрархічна структура побудови радіоелектронних апаратів

Верхній рівень ієрархії належить комплексам. За такою структурою утворюються потужні радіостанції, радіолокаційні та навігаційні системи. Нижчий рівень ієрархії належить стоякам, які виконують одну із функцій

комплексу або використовуються як самостійний радіоелектронний апарат, як правило, меншої потужності.

Стояк, в свою чергу, складається із блоків, які виконують одну із радіоелектронних функцій стояка. Блоки можуть виконувати і загальні функції радіоелектронного апарата. Як блок можуть розглядатися телевізори або радіоприймачі з розширеними функціональними можливостями.

Блоки складаються з функціональних вузлів, які можуть виконувати одну із функцій блока або функцію радіоелектронного апарата в цілому. Мобільні телефони та малогабаритні радіоприймачі можуть виготовлятися у вигляді одного функціонального вузла.

Найнижчий рівень ієрархії належить електрорадіоелементам, які не можуть самостійно виконувати радіоелектронні функції. Для їх виконання електрорадіоелементи (резистори, конденсатори, транзистори, інтегральні схеми і т. ін.) з'єднують між собою лініями зв'язку у відповідності зі схемою електричною принциповою і підключають до джерел живлення та ліній зв'язку з іншими пристроями і приладами.

Проектування радіоелектронних апаратів відбувається у відповідності із їх загальною та ієрархічною структурами. Задачі проектування формалізуються у вигляді тришарової моделі (рис. 1.3), яка містить загальні моделі ліній зв'язку 1, радіоелектронних функцій 2 та несучих конструкцій 3. Загальна модель ліній зв'язку відображає параметри трактів інтерфейсів радіочастотних, інформаційних та керуючих сигналів. Моделі радіоелектронних функцій охоплюють усі енергетичні, частотні та часові параметри і функції апарату. Задаються вимоги до точності і надійності апарату. Модель несучої конструкції містить усі її зовнішні інтерфейси. Враховується група експлуатації та кліматичне виконання апаратури.

Тришарова модель радіоелектронного апарата оцінюється експертною системою, яка враховує досвід проектування подібних апаратів та має базу знань сучасних засобів реалізації подібних апаратів. На цьому етапі визначається якому рівню ієрархії належить радіоелектронний апарат:

комплексу (системі), стояку чи блоку. У відповідності з цим вибирається етап проектування радіоелектронного апарата: системотехнічний чи структурний. Метою цих етапів є утворення структури радіоелектронного апарата у відповідності з рис. 1.2. Різниця у назвах етапів пов'язана із рівнем ієрархії. Вважається, що системотехнічний етап проектування застосовується до радіоелектронних комплексів (систем), а структурний – до стояків та блоків.

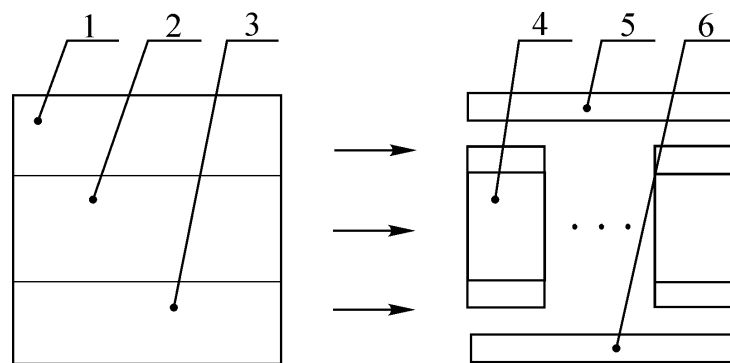


Рисунок 1.3 – Декомпозиція моделі радіоелектронного апарату

На етапі системотехнічного (структурного) проектування відбувається декомпозиція тришарової моделі – розділення складної моделі на простіші складові частини. В процесі декомпозиції формуються тришарові моделі кожного пристрою структурної схеми 4 (рис. 1.3) та відокремлені моделі ліній зв'язку 5 і несучої конструкції 6 відповідного рівня ієрархії радіоелектронної апаратури. Відокремлені моделі ліній зв'язку і несучих конструкцій відрізняються від загальних моделей цих елементів тим, що, крім зовнішніх інтерфейсів, вони мають ще внутрішні інтерфейси, які узгоджуються із зовнішніми інтерфейсами відповідних моделей нижчого рівня ієрархії.

Утворені тришарові моделі пристроїв, із яких складається РЕА, підлягають оцінюванню експертною системою, що визначає рівень ієрархії моделі: стояк, блок чи функціональний вузол. Якщо пристрій реалізується у вигляді функціонального вузла, то для нього наступним етапом є схемотехнічне проектування. До моделей інших пристроїв знову застосовується процедура

декомпозиції, яка завершується тільки тоді, коли моделі усіх пристроїв будуть відповідати функціональним вузлам.

На етапі схемотехнічного проектування формуються схеми електричні принципів функціональних вузлів, вибираються електрорадіоелементи та відбувається оптимізація параметрів елементів (параметричний синтез) та вирішуються задачі допускового проектування на електричні параметри елементів схеми [6]. При формуванні схем використовується база знань відповідних рішень, висновки експертів та різноманітні методи синтезу електричних схем за їх вихідними характеристиками. Вибір електрорадіоелементів відбувається безпосередньо при синтезі схем з урахуванням необхідної заданої точності вихідних функцій і загальних умов використання елементів:

- електрорадіоелементи необхідно використовувати в режимах, які гарантуються технічними умовами на експлуатацію;
- номінальні відхилення значень параметрів електрорадіоелементів визначаються при нормальних умовах навколишнього середовища;
- діапазон зміни параметрів елементів впродовж їх експлуатації повинен забезпечувати безвідмовну роботу апаратури;
- вплив навколишнього середовища на параметри елементів оцінюється з урахуванням місця їх розташування у функціональному вузлі;
- вимоги до вихідних характеристик функціонального вузла, що вказані в технічному завданні, повинні забезпечуватись при установці будь-якого електрорадіоелемента заданого типономіналу і допуску;
- для електрорадіоелементів підвищених класів точності окрім номінального відхилення параметра необхідно враховувати також забезпечення стабільності електричних характеристик;
- для підвищення надійності елементів рекомендується використовувати їх при менш жорстких навантаженнях порівняно із заданими в технічних умовах.

Під час параметричного синтезу визначаються номінальні значення параметрів електрорадіоелементів для усіх функціональних вузлів.

Допускове проектування [7] надає можливість визначити номінальні допустимі відхилення, температурні коефіцієнти і допустимі відхилення, обумовлені старінням елементів, дією вологості та інших зовнішніх чинників. Якщо при виборі електрорадіоелементів неможливо виконати усі вимоги до елементної бази, приймається рішення про необхідність розробки окремих електрорадіоелементів чи захист функціональних вузлів від зовнішніх впливів.

Після завершення схемотехнічного проектування настає етап конструювання радіоелектронного апарату. Завданням цього етапу є розробка конструкцій окремих електрорадіоелементів, функціональних вузлів та радіоелектронного апарату в цілому з урахуванням зовнішніх впливів. Далі вибирається несуча конструкція для електрорадіоелементів – друкована плата або несуча конструкція функціонального блока (шасі) чи стояка. Розміри друкованих плат для конкретних видів апаратури, як правило, стандартизовані. Тому при розміщенні електрорадіоелементів можливе нераціональне використання поверхні друкованої плати чи, навпаки, не вдається розташувати усі елементи на платі. В цих випадках переглядаються результати компоновки функціональних вузлів.

Завершення процедур компоновки функціональних вузлів і розміщення електрорадіоелементів на друкованих платах дозволяє перейти до реалізації ліній зв'язку між електрорадіоелементами. На друкованих платах ці лінії реалізуються у вигляді мідних фольгових доріжок. Розміщення елементів на платі і конфігурація ліній зв'язку враховують усі вимоги до зовнішнього інтерфейсу несучої конструкції функціонального вузла. В свою чергу несуча конструкція забезпечує відповідний захист електрорадіоелементів від зовнішніх впливів.

Алгоритм проектування блоків чи стояків з точки зору конструювання мало чим відрізняється від подібного алгоритму конструювання

функціональних вузлів. Вибирається несуча конструкція, вирішуються задачі розміщення функціональних вузлів і реалізації ліній зв'язку.

Таким чином, задачі допускового проектування вирішуються як на етапі схемотехнічного проектування так і на етапі конструювання радіоелектронного апарата з урахуванням усіх вимог до виготовлення та експлуатації електронного обладнання.

1.2 Мережева математична модель задач допускового проектування радіоелектронних пристроїв

Допускове проектування забезпечує необхідну точність та параметричну надійність радіоелектронних апаратів. Основною задачею допускового проектування є призначення допустимих відхилень параметрів електрорадіоелементів або елементів конструкції з урахуванням технології виготовлення, дії зовнішніх впливів і старіння.

При допусковому проектуванні вирішуються задачі [6, 7]:

- визначення відхилення вихідних функцій при заданих відхиленнях на параметри елементів (задача аналізу);
- призначення відхилень на параметри елементів при заданих межових відхиленнях вихідних функцій (задача синтезу).

Задачі аналізу, синтезу допусків та вибору елементів вирішуються на етапах схемотехнічного, конструкторського та технологічного проектування.

Вихідні дані для задач призначення допусків визначаються технічним завданням на проектування апаратури, в якому задаються вимоги до точності та надійності, вхідні і вихідні електричні параметри, конструктивні обмеження, кліматичне виконання, група експлуатації та інші чинники, які впливають на конструкцію і вихідні характеристики радіоелектронних пристроїв.

На етапі схемотехнічного проектування проводиться структурний і параметричний синтез. Завданням *параметричного синтезу* є формування схем електричних принципових функціональних вузлів, вибір елементної бази та оптимізація параметрів. При синтезі електричних схем з використанням бази даних технічних рішень та висновків експертів. При цьому відбувається вибір елементної бази. Враховуються технічні характеристики і параметри електрорадіоелементів та загальні умови їх використання.

Гарантовані допуски визначаються з урахуванням зовнішніх впливів і принципу взаємозамінності елементів. Після параметричного синтезу, коли стають відомі номінальні параметри елементів, вибираються допуски на номінальні значення при нормальних умовах навколишнього середовища та задаються коефіцієнти зовнішніх впливів з урахуванням умов експлуатації.

Результати, що отримані на етапі схемотехнічного проектування є вихідними даними для розробки конструкції елементів, функціональних вузлів, блоків та технологічної підготовки виробництва. Під час призначення технологічних допусків є можливість їх значного розширення при урахуванні статистичного закону розподілу параметрів під час виробництва. Тоді на етапі контролю технологічних операцій частина продукції буде відбракована.

Кожний із етапів проектування радіоелектронної апаратури ставить свої вимоги до процедури синтезу. В першу чергу це пов'язано з необхідністю враховувати складні математичні моделі для різних етапів проектування.

Задачі аналізу допусків при проектуванні радіоелектронної апаратури виникають в основному при уточненні результатів синтезу. Основне їх призначення – забезпечити необхідними даними для проведення операції контролю технологічного процесу при виготовленні електронних елементів, вузлів та блоків.

При реалізації системного підходу в задачах допускового проектування однією з основних проблем є формалізоване представлення процесу розв'язку сукупності взаємопов'язаних завдань проектування. Таку формалізацію зручно представляти у вигляді логічної схеми послідовності задач допускового

проектування [8, 9]. Така технологія розв'язання задачі базується на ідеях агрегативно-декомпозиційного підходу, системного аналізу і системного проектування складних систем [8-17].

На основі формалізації цілей і їх декомпозиції на комплекси взаємопов'язаних завдань пропонується мережева математична модель завдань допускового проектування [9]. Множина можливих шляхів на мережі побудованої таким чином моделі представляє множину підмоделей, які можна сформулювати з її елементарних складових. Ступінь агрегації моделей в процесі проектування визначається ефективністю використовуваних методів оптимізації і потужністю застосовуваних засобів обчислювальної техніки. На основі отриманої мережевої моделі може бути побудована логічна схема допускового проектування, що визначає черговість вирішення завдань проектування. Для завдання схеми допускового проектування *TolDes* (від Tolerance Design) необхідно визначити п'ятірку множин [9]

$$CirDes = (Tasks, InDat, Res, DesDec, ProcDec), \quad (1.1)$$

де $Tasks = \{Task_i^l\}$ - (від Tasks of designing) упорядкована множина задач проектування;

$Task_i^l$ - і-я задача l-го рівня;

InDat (від Initial data) – множина початкових даних;

Res (від Restrictions) – множина обмежень;

DesDec (від Design decisions) – множина рішень;

ProcDec (від Procedures of the decision) – відображення, означає вирішальну процедуру і ставить кожній парі $(InDat_i^l, Res_i^l)$ у відповідність непусту підмножину *DesDec*, що позначається через *ProcDec* $(InDat_i^l, Res_i^l)$.

Вся множина завдань проектування *Tasks* є повністю розв'язаною, якщо для всіх завдань *Task* існують проектні процедури *ProcDec* і кожне проектне рішення є єдиним $|ProcDec(InDat, Res)| = 1$.

Основними завданнями, пов'язаними з вирішенням питань допускового проектування є: $Task_1^2$ – параметричний синтез; $Task_2^2$ – синтез експлуатаційних допусків; $Task_3^2$ – визначення коефіцієнтів зовнішніх впливів; $Task_4^2$ – синтез номінальних допусків; $Task_5^2$ – аналіз допусків; $Task_6^2$ – оцінка ефективності стратегій допускового проектування і вибір рішень.

У процесі аналізу взаємозв'язків кожен з моделей зручно представляти у вигляді

$$ModTask_i^2 : \{InDat_{iE}^2, InDat_{iI}^2, Res_i^2\} \rightarrow DesDec_i^2, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (1.2)$$

де $ModTask_i^2$ (від *Model of a task*) – модель i -ї задачі 2-го рівня;

$InDat_{iE}^2$ – множина формалізованих зовнішніх (по відношенню до комплексу завдань) вихідних даних;

$InDat_{iI}^2$ – множина формалізованих внутрішніх (по відношенню до комплексу завдань) вихідних даних;

Res_i^2 – множина формалізованих обмежень;

$DesDec_i^2$ – проектне рішення.

В результаті аналізу комплексу завдань встановлено, що зовнішні (по відношенню до комплексу завдань) вихідні дані моделей всіх завдань є однаковими.

$$InDat_{iE}^2 = \{S, M, P, Cor, Y_b, Y_r, U, K\}, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (1.3)$$

де S – структура електричної схеми або конструкція пристрою;

M – математична модель вихідної характеристики;

P – закон розподілу параметрів елементів;

Cor – матриця кореляційних зв'язків між параметрами елементів, якщо параметри не є взаємозалежними;

Y_b – множина граничних значень вихідної характеристики;

Y_r – множина номінальних значень вихідної характеристики;

U – кліматичні умови експлуатації радіоелектронного пристрою;

K – множина критеріїв для оцінки і вибору варіантів.

Системи обмеження в моделях задач $Task_1^2 - Task_6^2$ співпадають та мають вид

$$Res_i^2 = \{T, C^*, \Pi, S'\}, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (1.4)$$

де T – конструктивні та технологічні обмеження;

C^* – обмеження на ресурси (вартість) системи;

Π – множина допустимих принципів побудови радіоелектронного пристрою;

$S' = \{s\}$ – область працездатності пристрою, яка визначається множиною можливих значень вихідних характеристик.

В моделі задачі параметричного синтезу радіоелектронних пристроїв внутрішні початкові дані не використовуються тобто $InDat_{i1}^2 = \emptyset$ $InDat_{21}^2 = \emptyset$.

Вихідні дані моделі цієї задачі мають вигляд

$$DesDec_1^2 = \{X_r\}, \quad (1.5)$$

де X_r – множина номінальних значень вхідних параметрів.

Множини формалізованих вхідних та вихідних даних задачі синтезу експлуатаційних допусків $Task_2^2$ мають вид

$$InDat_{21}^2 = \{X_r\}, \quad DesDec_2^2 = \{\Delta X_E\}, \quad (1.6)$$

де ΔX_E – множина експлуатаційних допусків на параметри елементів.

Множини формалізованих вхідних (внутрішніх) і вихідних даних завдання визначення коефіцієнтів зовнішніх впливів $Task_3^2$ містять у себе

$$InDat_{3I}^2 = \{X_r, \Delta X_E\}, \quad DesDec_3^2 = \{K_E\}, \quad (1.7)$$

де K_E – множина коефіцієнтів зовнішніх впливів.

Множина формалізованих вхідних (внутрішніх) і вихідних даних завдання синтезу номінальних допусків $Task_4^2$ можуть бути представлені у вигляді

$$InDat_{4I}^2 = \{X_r, \Delta X_E, K_E\}, \quad DesDec_4^2 = \{\Delta X_r\}, \quad (1.8)$$

де ΔX_r – множина номінальних допусків на параметри.

Множини формалізованих вхідних (внутрішніх) і вихідних даних завдання визначення параметрів елементів і зв'язків $Task_5^2$ можуть бути представлені у вигляді

$$InDat_{5I}^2 = \{X_r, \Delta X_E, \Delta X_r\}, \quad DesDec_5^2 = \{\Delta Y\}, \quad (1.9)$$

де ΔY – множина допусків на вихідні характеристики радіоелектронного пристрою.

Множина формалізованих обмежень, вхідних (внутрішніх) і вихідних даних завдання оцінки ефективності стратегій допускового проектування і вибору рішень $Task_6^2$ можуть бути представлені у вигляді

$$InDat_{6I}^2 = \{\Delta X_E, \Delta X_r, \Delta Y\}, \quad DesDec_6^2 = \{s^o, K(s^o)\}, \quad (1.10)$$

де s^o , $K(s^o)$ – стратегія допускового проектування, що вибрана і її оцінка.

Процеси проектування будуються за паралельною, послідовною або комбінованою схемами.

У паралельній схемі проектування всі множини завдань $Task_i^?$, $i = \overline{1, 6}$ мають повністю визначене завдання множин вхідних даних $InDat_i^?$, обмежень $Res_i^?$ та процедур $ProcDec_i^?$ на початковому етапі проектування. При цьому повністю паралельна схема допускає будь-яку впорядкованість завдань [8].

Проведений аналіз вхідних і вихідних даних моделей комплексу завдань системного проектування показав, що всі вони найтіснішим чином пов'язані між собою по внутрішнім вхідним і вихідним даним. Встановлена схема їх взаємозв'язку дозволяє зробити висновок про непридатність паралельної схеми системного проектування. Вирішення цього завдання доцільно будувати на основі послідовної ітераційної схеми [9]. При цьому з отриманого проектного рішення $DesDec_i^l$ наступної задачі $Task_i^l$ формуються початкові дані $InDat_{i+1}^l$ або обмеження Res_{i+1}^l в процедурі $ProcDec_{i+1}^l$ для наступної задачі $Task_{i+1}^l$. Таким чином здійснюється "замикання" завдань послідовної схеми

$$\exists DesDec_i^l \in DesDec \ Tr(InDat_{i+1}^l \vee Res_{i+1}^l \in DesDec_i^l), \quad (1.11)$$

де $DesDec$ – множина проектних рішень;

Tr (від *True*) – істинність висловлювання $(InDat_{i+1}^l \vee Res_{i+1}^l \in DesDec_i^l)$.

При визначенні черговості вирішення завдань допускового проектування $Task_i^?$, $i = \overline{1, 6}$ в рамках послідовної схеми слід забезпечувати мінімізацію ступеня їх нерозв'язності за вихідними даними і мінімізації складності створюваної процедури.

Таким чином, задача параметричного синтезу $Task_i^?$, що визначає множину номінальних значень параметрів елементів, повинна вирішуватися перш за інші.

Задача оцінки ефективності стратегій допускового проектування і вибору оптимальних допусків $Task_6^2$ використовує вихідні дані (проектні рішення) всіх інших завдань комплексу і тому повинна вирішуватися в останню чергу.

Визначення коефіцієнтів зовнішніх впливів та призначення номінальних допусків (задача $Task_3^2$ та $Task_4^2$) неможливо без синтезу граничних значень допусків на параметри елементів, яка визначається в результаті рішення задачі $Task_2^2$. Тому розв'язок задачі $Task_2^2$ повинен бути першим порівняно з $Task_3^2$ та $Task_4^2$.

Рішення задачі аналізу допусків ($Task_5^2$) може бути проведено, як після виконання задачі синтезу експлуатаційних допусків так і номінальних допусків. Однак в останньому випадку існує можливість перевірити усі розраховані варіанти допустимих відхилень вхідних параметрів та отримати дані процедур контролю технологічних операцій. Тому пропонується вирішувати завдання аналізу допусків $Task_5^2$ після виконання завдання синтезу номінальних допусків $Task_4^2$.

Як елементарна комірка, на базі якої упорядковуються задачі допускового проектування, використовується середовище проектування. Середовище проектування описує розв'язку за допомогою певної процедури $ProcDec_i^1$ задачу $Task_i^1$ за її початковими даними $InDat_i^1$ та обмеженнями Res_i^1 . При цьому проектні розв'язки задачі $DesDec_i^1$ представляються в категоріях моделі $ModTask_i^1$ і допускають порівняння за множиною критеріїв K . Комірка може розглядатися в якості схеми проектної процедури у вигляді

$$Task_i^1: ProcDec_i^1 \{InDat_i^1, Res_i^1\} \rightarrow DesDec_i^1 / ModTask_i^1. \quad (1.12)$$

На підставі результатів проведеного аналізу мережевої моделі задач допускового проектування (1.2–1.10) з обмеженнями, вхідними і вихідними

даними пропонується наступний ланцюжок в схемі рішення задачі проектування

$$Task_1^2 \rightarrow Task_2^2 \rightarrow Task_3^2 \rightarrow Task_4^2 \rightarrow Task_5^2 \rightarrow Task_6^2. \quad (1.13)$$

На підставі отриманої послідовності завдань (1.13) може бути побудована послідовна схема допускового проектування. Для її реалізації потрібно визначення вихідних даних задач $Task_2^2$, $Task_3^2$ та $Task_4^2$.

Запропонований варіант логічної схеми допускового проектування надає можливість скоротити терміни вирішення завдань проектування, підвищити якість рішень і на цій основі покращувати функціональні характеристики радіоелектронних пристроїв.

1.3 Аналіз методів допускового проектування радіоелектронних пристроїв

Допускове проектування надає можливість визначити відхилення параметрів електрорадіоелементів і елементів конструкції, що обумовлені:

- недосконалістю технологічних процесів виготовлення радіоелектронних пристроїв;
- залежністю параметрів елементів від зовнішніх чинників;
- старінням електрорадіоелементів і елементів конструкції.

Недосконалість технологічних процесів виникає в більшості випадків через неможливість контролю складу і структури матеріалів в процесі виготовлення елементів. До цього додаються похибки вимірювальних приладів і систем керування технологічними процесами та помилки операторів.

Параметри кожного із виготовлених елементів внаслідок цього відрізняються. Їх значення носять випадковий характер і утворюють поле розсіяння.

Якщо множина вхідних параметрів виходить за межі області працездатності радіоелектронного пристрою, то пристрої з такими сполученнями параметрів відбраковують. Такий підхід використовується, коли параметри елементів формуються одночасно в груповому технологічному процесі.

Якщо елементи виготовляються в різні моменти часу, пристрої комплектуються елементами за їх номінальними значеннями основних параметрів і відхилень. Номінальні значення основних параметрів електрорадіоелементів стандартизовані і вибираються за рядами чисел. У добре відлагодженому технологічному процесі найбільша густина сполучень параметрів утворюється поблизу їх номінальних значень.

Існує номінальне відхилення параметра (допуск) – це граничне допустиме відхилення параметра від його номінального значення, при якому елемент вважається працездатним.

Параметри виготовлених елементів можуть відрізнитись від номінального значення як в меншу так і в більшу сторону. Тому використовується нижнє і верхнє номінальне відхилення:

$$\underline{\omega}_r = \underline{x} - x_r; \quad \overline{\omega}_r = \overline{x} - x_r, \quad (1.14)$$

де $\underline{\omega}_r$ і $\overline{\omega}_r$ – нижнє і верхнє номінальні відхилення параметра;

\underline{x} і \overline{x} – нижнє і верхнє межове значення параметра, при якому елемент вважається працездатним;

x_r – номінальне значення параметра.

Придатність елемента для використання оцінюється вимірюванням параметра при нормальних умовах навколишнього середовища безпосередньо

після виготовлення елемента. У відповідності з виразами (1.14) параметри виготовлених елементів належать інтервалам:

$$\mathbf{x} = [\underline{x}; \bar{x}]. \quad (1.15)$$

Множина інтервалів значень параметрів (1.15) утворює допускову область. Інтервальні допуски використовуються переважно при дрібносерійному виробництві апаратури, коли недостатньо інформації про закони розподілу параметрів.

Врахування розподілу параметрів надає можливість зменшити вартість апаратури за рахунок збільшення допусків і відповідної відбраковки частини виготовлених пристроїв.

При виробництві радіоелектронних апаратів зустрічаються закони розподілу параметрів: рівномірний, Сімпсона, трапецоїдний, нормальний, Релея, Вейбула та інші. Такий підхід до призначення допусків називається ймовірнісним, а допуски називають за назвою закону розподілу.

Старіння елементів і дія зовнішніх впливів (зміна температури, випромінення, дія вологості тощо) призводить до зміни параметрів елементів та конфігурації допускових областей.

Зміна параметрів елементів під дією зовнішніх чинників підвищує вимоги до параметрів електрорадіоелементів і вартість радіоелектронних апаратів. Фактично виникає задача вибору не тільки номінальних значень, але і коефіцієнтів зовнішніх впливів з урахуванням вартості елементів.

Таким чином, при вирішенні задач допускового проектування необхідно враховувати, що:

- під дією зовнішніх впливів відбувається трансформація і переміщення допускових областей в області працездатності, що підвищує вимоги до точності електрорадіоелементів і що необхідно враховувати при призначенні допусків;
- значення допусків впливає на вартість радіоелектронних пристроїв, що

необхідно враховувати при виборі елементів.

Знання в області допускового проектування накопичувалось впродовж багатьох років. За цей час визначено, що:

- конфігурація допускової області, яка визначає діапазони допустимих відхилень параметрів, залежить від закону розподілу параметрів;
- для підвищення точності призначення допусків необхідно використовувати двобічну (інтервальну) модель вихідних характеристик радіоелектронних пристроїв.

Дослідниками для призначення допусків використовуються переважно найпростіші закони розподілу параметрів – рівномірний (інтервальний) та нормальний. Інтервальний закон розподілу параметрів використовується при відсутності докладних знань про розподіл значень параметрів елементів. При призначенні допусків інтервальними методами утворюється допускова область у вигляді бруса. Брус – ортогональний гіперпаралелепіпед з ребрами паралельними осям координат [18]. Цей закон розподілу призводить до призначення дуже жорстких допусків, які отримали назву інтервальних, гарантованих допусків або допусків найгіршого випадку [6, 7, 19].

Розширення поля допустимих відхилень параметрів можливо у випадках, коли закон розподілу значень параметрів елементів наближений до нормального. У цьому випадку створюється допускова область у вигляді еліпсоїду і можливе суттєве розширення допусків за рахунок урахування ймовірності виготовлення радіоелектронних пристроїв з параметрами, значення яких виходять за межі допустимих. Нормальні допуски в \sqrt{n} раз більше інтервальних, що призводить до значного збільшення допустимих відхилень параметрів елементів радіоелектронних пристроїв при великій кількості елементів.

Інтервальні моделі вихідних характеристик з'явилися з використанням інтервальних підходів до призначення гарантованих допусків [20].

Нормальний та інтервальний закони розподілу значень параметрів є ідеалізованими. Реальні закони розподілу значень параметрів елементів

переважно задаються статистичними рядами, для яких не розроблено процедури утворення допускових областей, що не дає можливості застосовувати запропоновані методи підвищення точності допускового проектування.

Методи аналізу та синтезу допусків на параметри радіоелектронних пристроїв можна розділити на два класа: методи найгіршого випадку (за принципом максимуму-мінімуму) та ймовірнісні.

Для розв'язку задачі аналізу за принципом максимуму-мінімуму використовуються методи обчислення відхилень параметрів елементів, що базуються на функціях чутливості [6, 7, 21-37] або інтервальних методах [18, 38-44]. Інтервальні методи завдяки правилам виконання інтервальних операцій, які значно зменшують кількість перебору параметрів, є ефективним методом обчислення гарантованих допусків. Задачі аналізу допусків на параметри компонентів в радіоелектроніці та телекомунікаціях з допомогою інтервального аналізу вирішувались в роботах Меншикова Г.Г. [45], Колєва Л.В.[46-48] Spagnuolo G. [49-52] та інших [53-59].

При розв'язанні задачі аналізу допусків за *статистичним принципом* значення параметрів елементів вважаються випадковими величинами і обчислюються з використанням теорії ймовірності. В цих методах враховується обмежена кількість параметрів випадкових величин – математичне сподівання і дисперсія. Використання статистичних методів надає можливість розширити поля допусків [6, 19], однак не вдається уникнути труднощів, що пов'язані з обчисленням математичних моделей вихідних характеристик з великою кількістю вхідних параметрів. Для статистичного обчислення допусків найчастіше використовуються методи: статистичних випробувань Монте-Карло та метод моментів.

Метод статистичних випробувань використовує обчислення вихідної характеристики при випадкових значеннях вхідних параметрів радіоелементів. Комбінації значень вхідних параметрів генеруються з допомогою генераторів випадкових чисел у відповідності з заданим законом розподілу параметрів

елементів. Далі відбувається статистична обробка отриманих результатів та розрахунок основних параметрів: математичного сподівання та дисперсії. Метод статистичних випробувань надає можливість визначити параметри при статистичному обчисленні допусків з високою точністю. Однак великий обсяг обчислень є недоліком цього методу. [6, 60-69]. Запропоновано декілька модифікацій цього методу у вигляді матричних випробувань [28], точкових діаграм [19], які упорядковують процедуру обчислень, але не усувають недоліку методу – великої кількості обчислень.

Метод моментів для статистичних параметрів вихідної характеристики радіоелектронних пристроїв використовує теорему про обчислення числових характеристик (моментів) сум випадкових чисел [66-68]. Похибки обчислення допусків за методом моментів пов'язані з похибками розкладання вихідної характеристики в ряд Тейлора, що надає можливість використовувати цей метод тільки при малих відхиленнях значень параметрів елементів. Підвищення точності методу моментів урахуванням функцій чутливості вищих порядків або застосуванням ітераційних алгоритмів з уточненням точки розкладання вихідної функції в ряд Тейлора [19, 26, 28] не розв'язують цієї проблеми.

Задача синтезу допусків – це обернена задача, тобто є некоректно поставлена задача [69-79]. При синтезі допусків радіоелектронних апаратів порушується умова єдиності розв'язку. В цьому випадку можна використовувати регуляризацію та додати додаткові вимоги, що виникають з технологічних, експлуатаційних, економічних та інших обмежень. Також задачу синтезу можна поставити як задачу багатокритеріальної оптимізації з використанням критеріїв: мінімізація вартості пристроїв, максимізація якості.

Наприклад, задачу синтезу допусків часто формулюють як задачу вписування в область працездатності Ω_y (рис. 1.5) гіперпаралелепіеду Ω_t максимального об'єму [80].

В цьому випадку задача синтезу допусків є задачею лінійного програмування:

$$\begin{aligned} \max \gamma_q(U^*) \\ U^* \in \Omega_t \end{aligned} \quad (1.16)$$

при обмеженнях:

$$\gamma_p(U^*) - \gamma_q(U^*) \geq 0; \quad u_i^* \geq 0; \quad \|U_\vartheta - U^*\| \leq \gamma_q,$$

де γ_q – половина ребра гіперкуба Ω_t ;

U^* – положення центра гіперкуба;

U_ϑ – номінальна точка при розкладанні вихідного параметру в ряд Тейлора;

u_i^* – нормована координата.

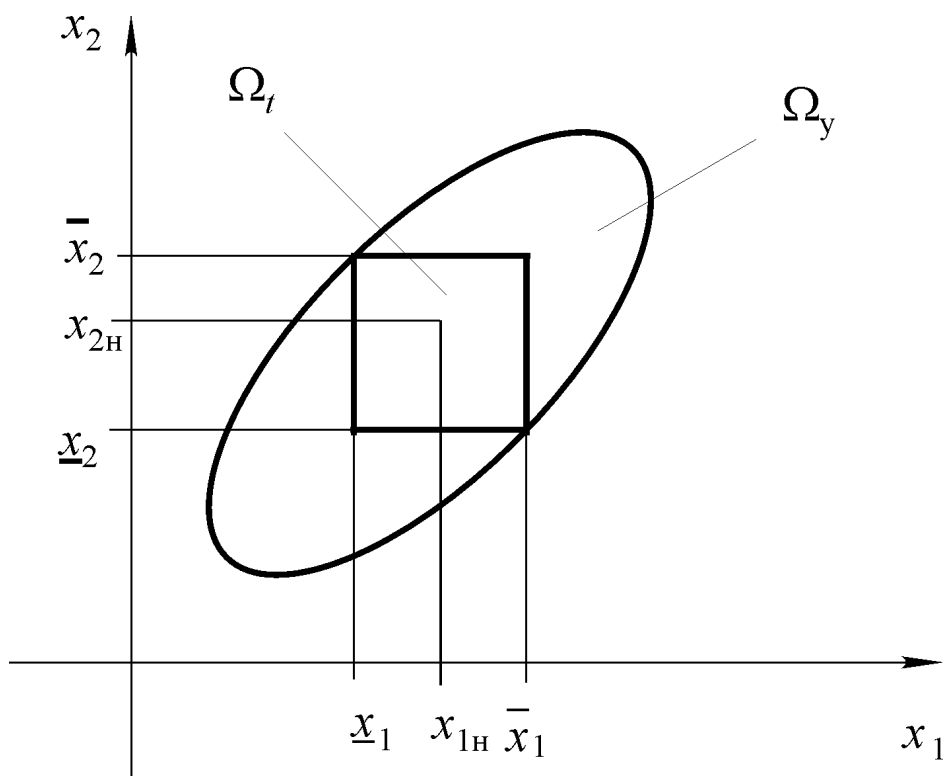


Рисунок 1.4 – Розташування області працездатності та допускової області

Для визначення оптимального розв'язку проводиться зміна положення центра U^* гіперкуба. Процес оптимізації завершується при досягненні умови (1.16). Похибки обчислення допустимих відхилень методом вписування гіперкуба обумовлені використанням лінійної моделі вихідної функції. Нормування змінних і модель гіперкуба не надають можливості врахувати розширення допускової області.

Значний внесок в розробку методів синтезу допусків при проектуванні радіоелектронних пристроїв зроблено А.В.Фомінін [81], К.Гехером [22], А.В.Михайловим [19, 82], Е.Хочем [83], Є.А.Воробйовим [84], Spence R. [7], Grimbey J.V. [21], Недоступом Л.А. [85-88], Бондарєвим А.П. [89-90]. В цих працях запропоновано методи призначення допусків з використанням функції чутливості та імовірнісного розподілу значень параметрів елементів. Універсальність розроблених методів забезпечило їх широке використання не зважаючи на суттєві похибки в призначенні допусків у зв'язку з фактичною відсутністю засобів формування області працездатності для нелінійних вихідних функцій.

Підвищення точності процедур призначення допусків і застосування оптимізаційних підходів пов'язано з появою інтервального аналізу та методів інтервальної математики. Цьому сприяли роботи С.П. Шарого [18, 91, 92], Е. Каухера [93, 94], Калмикова та Шокіна [40-41], А.П. Вошиніна [95], М.П. Дивака [96-99]. Систематичне використання інтервальних засобів оцінювання для призначення допусків на параметри елементів електричних схем провів Л.В.Колєв [46-48].

В інтервальному аналізі лінійна задача про допуски ставиться як пошук внутрішньої допускової множини розв'язків інтервальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Ця множина розв'язків формується у вигляді бруса [18]. Існує декілька підходів до побудови бруса. «Центровий підхід» використовує відому точку множини розв'язків як центр бруса. Такий підхід розвивався Н.А.Хлебалінін, А.Ноймайером [100, 101], В.В.Шайдуровим та С.П.Шарим [18]. Визначення розмірів бруса зводиться до задачі оптимізації. В

запропонованих методах результат призначення допусків значно залежить від вибору точки центру, а задача визначення розмірів бруса вирішувалась методами перебору вершин або методом гілок та границь. Час виконання алгоритму за методом гілок та границь збільшується за експонентою від розмірності задачі. В працях А.Ф.Бочкова та Т.В.Євтушенко [102] запропоновано співвідношення, для яких виконуються умови приналежності вершин бруса до допускової множини розв'язків, що обмежено одним ортантом, далі вирішується задача максимізації бруса. Використання цієї методики обмежено задачами невеликої розмірності. Н.А.Хлебалін, О.Бьємо та Б.Філіпе [103] запропонували методику розв'язку цієї задачі на базі лінійного програмування.

Інтервальний аналіз впроваджується також в статистичні методи. В монографії Кузнецова вперше розглядається теорія статистичних моделей з інтервальнозначними ймовірностями [104].

Якщо відомо, що значення параметрів радіоелектронних пристроїв розподілені за нормальним законом, то використовуються методи з еліпсоїдною оцінкою допускових областей [105-111]. Також науковці розглядають методи або їх комбінацію, що надає можливість підвищити точність допускового проектування для окремих випадків проектування радіоелектронних пристроїв, або технологічних процесів [112-143], але не надають можливість узагальнити їх на процедури проектування різних класів пристроїв. У зв'язку зі складністю вирішення задач синтезу допусків використовуються також методи, що базуються на еволюційних алгоритмах [144-153], які надають можливість отримати розв'язок, але не гарантують його оптимальність.

Але в цих роботах не створювалися статистично-орієнтовані моделі областей працездатності радіоелектронних пристроїв і допускових областей, що не надало можливості для розробки процедур оптимізації допускових відхилень.

Використання статистично-орієнтованих моделей для призначення інтервальних допусків започатковано в дисертаційній роботі Г.М.Шило [154].

Визначено основні властивості допускових розв'язків інтервальних рівнянь. Це надало можливість значно розширити відхилення параметрів при призначенні допусків. Розроблено інтервальну арифметику для обчислення допусків з урахуванням зовнішніх впливів. Використовуються чотири рівня врахування відхилень параметрів елементів за допомогою інтервальних величин. Вплив навколишнього середовища враховується за допомогою запропонованих інтервальних структур з плаваючими межами і плаваючими інтервалами. Використання інтервальних структур дозволяє простими засобами обчислювати експлуатаційні допуски і проводити сукупне оцінювання вихідних параметрів. Запропоновано метод формування спрощених інтервальних моделей для обчислення допусків складних нелінійних вихідних функцій електронних апаратів. При формуванні таких моделей запропоновано використовувати дворівневу інтерполяцію. Це надало можливість значно підвищити точність інтервальних моделей, утворювати інтервальні моделі з плаваючими межами і плаваючими інтервалами та проводити сукупне оцінювання вихідного параметра в межових точках і за межами точок інтерполяції. Розроблено матричний субітераційний метод розв'язання інтервальних систем лінійних алгебраїчних рівнянь з відображенням інтервальних матриць в матриці дійсних коефіцієнтів і контролем утворення допускових розв'язків під час ітерацій. Порівняно різні випадки формування початкових наближень і показано, що найбільшу збіжність забезпечує метод середніх коефіцієнтів. Розроблено інтервальний метод оптимізації допусків з використанням розв'язків інтервальних систем лінійних алгебраїчних рівнянь, областей максимальних часткових об'ємів допусків та запропонованої низки критеріїв максимальних об'ємів допусків. Визначенні експлуатаційні відхилення параметрів дозволяють впровадити процедуру вибору матеріалів та елементів електронних апаратів визначити номінальні та технологічні допуски з використанням інтервально-статистичного методу, який поєднує спрощені інтервальні моделі вихідних параметрів і статистичні методи обчислення допусків. Однак з допомогою цих методів не можливо було урахувати

кореляцію між параметрами елементів, або оптимізувати допуски за цінovими критеріями.

Застосування цих методів для призначення допусків НВЧ пристроїв проведено О.Ю.Фарафоновим та М.В.Міщенко [155, 156]. Вдосконалено алгоритми аналізу і синтезу гарантованих допусків на параметри конструкції фільтра. В алгоритмах запропоновано визначати допуски на вихідні параметри фільтра залежно від його конструкції і можливостей технології виготовлення або задавати вимоги до точності операцій технологічного процесу залежно від необхідних характеристик фільтра та його конструкції. Завдяки поетапному розгляду технологічного процесу з'явилась можливість збільшення гарантованих допусків, однак ці алгоритми не враховували кореляції між параметрами елементів.

Розширення статистично-орієнтованих методів призначення допусків на нормальний закон розподілу параметрів проведено в роботах О.Ю.Воропая [157]. Розроблено метод призначення симетричних допусків на параметри електричної схеми фільтрів. Метод надає можливість оптимізувати абсолютні і відносні відхилення як для заданих граничних відхилень вихідної функції так і для заданої загальної її ширини відхилення. Можлива як максимізація об'єму допускової області так і призначення допусків, співвідношення між якими задані коефіцієнтами пропорційності. Розроблено метод призначення допусків, обмежених набором дискретних значень, який базується на ранжуванні і дискретизації неперервних допусків. Метод дозволяє призначати дискретні допуски, наближені до оптимальних, його особливістю є незначна кількість обчислень у порівнянні з існуючими методами дискретної оптимізації. Можливо призначення як гарантованих так і нормально розподілених допусків. Виведено залежності між відхиленнями вхідних і вихідних параметрів для еліпсоїдної області допусків. Розроблено методи аналізу і синтезу допусків для нормального закону розподілення параметрів при заданій імовірності виходу придатних. Вони враховують нелінійність вихідної функції. Особливістю запропонованих методів є висока точність при

невеликій кількості обчислень. Розроблено метод аналізу допусків для немонотонних вихідних функцій шляхом пошуку її екстремумів у межах області допусків. Метод дозволяє аналізувати як для області допусків у вигляді бруса, що відповідає гарантованим допускам, так і у вигляді еліпсоїда, що відповідає нормально розподіленим допускам. Розглянуто особливості взаємного розташування областей працездатності і допусків у випадку немонотонної вихідної функції. Показано, що при призначенні допусків така вихідна функція може бути апроксимована набором дотичних гіперплощин у точках дотику цих областей – спрощеною полігональною моделлю. Розроблено форму і метод побудови спрощеної полігональної моделі. Розроблено метод призначення допусків для немонотонних вихідних функцій, який використовує спрощену полігональну модель. Метод застосовано для синтезу як гарантованих допусків, обмежених брусом, так і імовірнісних допусків при нормальному законі розподілу, обмежених еліпсоїдом. Оскільки прямокутні і еліпсоїдні області допусків мають свої особливості, для синтезу гарантованих і імовірнісних допусків розроблено окремі ітеративні алгоритми пошуку оптимального рішення і уточнення спрощеної полігональної моделі.

В роботах Б.А.Артюшенка [158] запропоновано використання інтервальних моделей в генетичних алгоритмах призначення допусків. Вдосконалено генетичний алгоритм призначення допусків на параметри елементів радіоелектронних пристроїв з обмеженнями у вигляді немонотонних та багатопараметричних вихідних функцій, який базується на використанні функцій чутливості. У зв'язку з високою обчислювальною складністю запропонованого підходу було розроблено модель розпаралелення генетичного алгоритму призначення допусків для локальної комп'ютерної мережі.

Проводилось також удосконалення і застосування статистично-орієнтованого підходу до вибору параметрів елементів з урахуванням зміни значень параметрів елементів під дією зовнішніх чинників в роботах Д.А. Коваленко [159]. Проведено аналіз та розроблено методи формування еліпсоїдних допускових областей, які враховують дію зовнішніх впливів.

Виявлено, що дія зовнішніх чинників призводить до зміни положення допускових областей і розширення значень вихідної характеристики. Моделі враховують найбільш несприятливе сполучення зовнішніх чинників при інтервальних значеннях коефіцієнтів зовнішніх чинників та при нормальному законі розподілу допустимих відхилень і коефіцієнтів зовнішніх впливів. Удосконалено методи аналізу та синтезу допусків для урахування дії сукупності зовнішніх впливів. Окремо розроблено алгоритми для дійсних значень та заданих відхилень коефіцієнтів зовнішніх чинників. Враховується закон розподілу коефіцієнтів зовнішніх впливів. Розроблені методи дозволяють призначати допустимі відхилення параметрів при односторонніх обмеженнях та при заданій ширині відхилення вихідної функції. Проведено аналіз цінкових характеристик елементів радіоелектронної апаратури в залежності від допустимих відхилень параметрів та температурних коефіцієнтів. Було запропоновано оцінювання цінкових залежностей за експлуатаційними відхиленнями, які відповідають межовим відхиленням елемента при дії зовнішніх впливів та старіння. Тому для кожного елемента формується сім'я цінкових характеристик, утворених для різних діапазонів і коефіцієнтів зовнішніх впливів. Отримано співвідношення, що дозволяють визначити відхилення параметра при забезпеченні мінімальної вартості радіоелектронної апаратури. Ці співвідношення використовують параметри моделі цінкової характеристики, для апроксимації якої використовується степенева функція. З використанням отриманих співвідношень розроблено метод вибору параметрів елементів при заданих односторонніх обмеженнях або ширині відхилення вихідної характеристики. Для врахування нелінійності вихідних характеристик застосовуються ітераційні алгоритми. Розроблено та удосконалено алгоритми призначення параметрів елементів при забезпеченні максимального об'єму допускової області або рівних відносних допустимих відхилень параметрів, що мінімізують вартість завдяки вибору відповідних коефіцієнтів зовнішніх впливів. Удосконалено алгоритми вибору елементів, в яких враховуються обмеження значення відхилення параметрів, встановлених виробниками. Для

призначення стандартизованих відхилень, удосконалено методи вибору елементів з ранжуванням отриманих значень параметрів за вартістю.

Ефективність методів проектування радіоелектронних пристроїв із застосуванням статистично-орієнтованих підходів до створення області працездатності надає можливість розширити ці методи на інші процедури проектування, наприклад, проектування тепловідвідних і несучих конструкцій. Такий підхід використано в дисертаційній роботі Є.В.Огренича [160] для тепловідвідних пристроїв. Вдосконалено моделі оптимізації параметрів тепловідвідних елементів на основі розроблених цільових функцій за критеріями мінімізації масогабаритних параметрів та використання обмежень у формі функції еліпсоїда, що дає змогу забезпечити збіжність алгоритмів оптимізації. Отримав подальший розвиток метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів, що ґрунтується на використанні методу множників Лагранжа і дає змогу отримати співвідношення для обчислення конструктивних параметрів тепловідводів.

Таким чином, задача синтезу допусків є обернена тобто некоректна задача. 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 максимізація якості. Точність допускового проектування може бути підвищена шляхом розробки статистично-орієнтованих методів, що базуються на формуванні допускових областей у вигляді геометричних об'єктів, які враховують реальні закони розподілу параметрів, кореляційні зв'язки між параметрами та зовнішні впливи на параметри елементи пристроїв. Також необхідно розробити методи визначення розмірів допускових областей із урахуванням заданих відхилень вихідних функцій та стратегій оптимізації.

1.4 Автоматизація процедур допускового проектування в ECAD та САЕ системах

На сучасному етапі розвитку автоматизації процедур допускового проектування радіоелектронних апаратів часто використовуються методи, які не забезпечують достатньої точності проектування. Потужність комп'ютерної техніки неперервно росте та розширюються можливості програмного забезпечення. Сучасні системи автоматизованого проектування радіоелектронних апаратів надають можливість проводити аналіз електричних схем, проектувати друковані плати, створювати та досліджувати тривимірні моделі конструкцій, розробляти конструкторську документацію та програми для станків з числовим програмним керуванням [161-176]. Однак, навіть найпотужніші САПР верхнього рівня, на жаль, не можуть забезпечити наскрізного проектування радіоелектронних апаратів від утворення схем електричних принципів до проектування несучих конструкцій. Тому при проектуванні радіоелектронних апаратів використовується декілька систем автоматизованого проектування. Структура програмного забезпечення САПР радіоелектронних пристроїв надається на рис. 1.5, який відображає сучасний стан автоматизації проектування радіоелектронних апаратів, в якому автоматизовані проектні процедури з'являються на етапі розробки схем електричних принципів функціональних вузлів.

Етап синтезу схем можна вважати автоматизованим тільки для цифрових схем. Для аналогових схем лише проводиться моделювання електричних характеристик функціональних вузлів. Недостатньо автоматизована задача призначення допусків на електричні параметри схеми та вибору елементів. Розроблена схема електрична принципова використовується при проектуванні несучої конструкції для електрорадіоелементів – друкованої плати. На етапі розробки функціональних вузлів використовуються переважно EDA системи

виробництва фірм Synopsys, Cadence, Mentor Graphics, Zulcen Inc, Magma Design Automation, Altium [163].

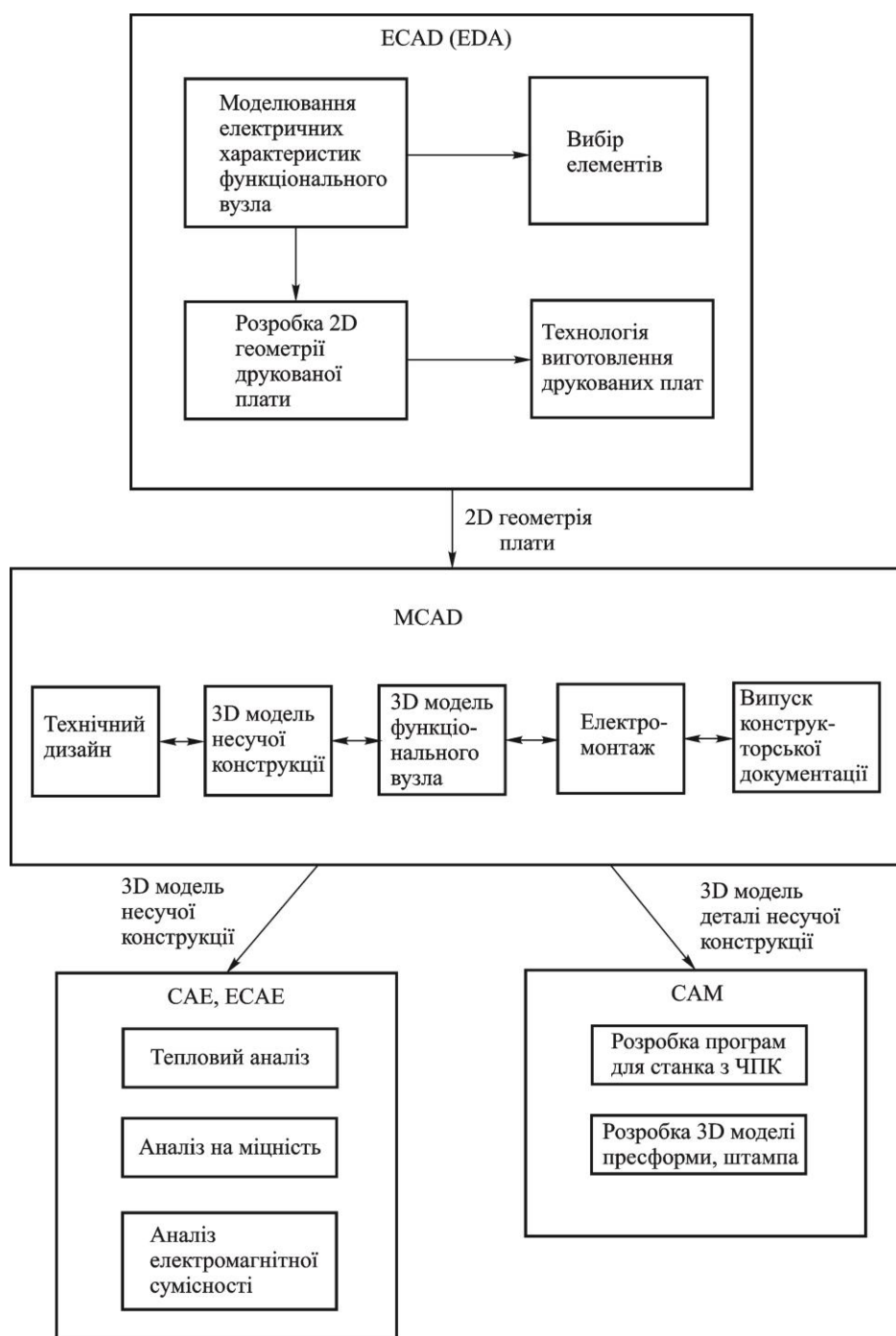


Рисунок 1.5 – Структура програмного забезпечення для автоматизації проектування несучих конструкцій та вузлів радіоелектронних пристроїв.

Розвиток EDA (Electronic Design Automation) або ECAD (Electronic CAD) систем пов'язаний з вирішенням вузькоспеціалізованих задач проектування електронних пристроїв:

- розробка мікросхем різної складності та ступеню інтеграції;
- розробка та виробництво функціональних вузлів, які розташовуються на друкованих платах;
- проектування пристроїв надвисоких частот та електромагнітного моделювання.

Провідні виробники програмних продуктів для проектування функціональних вузлів на друкованих платах є компанія Altium Designer та компанія Cadence Design Systems (програмні продукти Cadence Allegro) [177, 178], для проектування пристроїв надвисоких частот та електромагнітного моделювання є компанія AWR (Applied Wave Research). Основним програмним продуктом цієї компанії є програмна система Microwave Office [179-182]. Автоматизація задачі призначення допусків на параметри конструкції пристроїв надвисоких частот з урахуванням технології виготовлення є актуальною задачею цього етапу.

При проектуванні блоків, стояків радіоелектронних апаратів вирішуються переважно задачі проектування несучих конструкцій, ліній зв'язку та технологічної підтримки виробництва. Розробляється дизайн та проводиться випуск технічної документації. Для виконання цих процедур використовуються MCAD (CAD), CAM та CAE системи. З допомогою CAD-систем утворюються 3D-моделі несучих конструкцій та функціональних вузлів, розробляється дизайн та забезпечується випуск технічної документації.

Розроблені 3D-моделі використовуються в CAE системах для аналізу теплових режимів і здатності радіоелектронного апарата витримувати тривалі навантаження. Проводиться також аналіз електромагнітної сумісності. Для підготовки виробництва використовують CAM системи, основною задачею яких є розробка 3D-моделей прес-форм і штампів. Утворюються також

програми для керування станками з числовим програмним керуванням та роботами.

Таким чином, при проектуванні радіоелектронних пристроїв використовуються різноманітні системи, які однак не дозволяють повністю автоматизувати увесь процес проектування. Стрімкий розвиток потужності комп'ютерної техніки дає можливість значно покращувати якість програмних систем. Весь час відбувається оновлення автоматизованих систем, з'являються нові розробники програмного забезпечення. Застосування методів призначення допусків в системах автоматизованого проектування ускладнюється тим, що проектування радіоелектронних пристроїв є наукоємною галуззю і тому потребує вивчення та дослідження процесів різної фізичної природи, які відбуваються усередині пристрою. Тому в методах формування математичних моделей радіоелектронну систему представляють у вигляді сукупності фізично однорідних підсистем.

Такий підхід привів до розвитку великої кількості вузькоспеціалізованих систем автоматизованого проектування для різних видів радіоелектронної апаратури. Наприклад, для задач проектування топології НВЧ-пристроїв можна використовувати Microwave Office, CST MicrowaveStudio або HFSS [179-190], для моделювання схем електричних принципів – Multisim (Electronics Workbench), Micro-Cap, OrCAD або Pspice [191-199], для діаграм спрямованості антен – PolarPlot, GAL-ANA [200, 201]. Виникає необхідність аналізу можливостей розв'язку задач допускового проектування в різних класах систем автоматизованого проектування.

Серед найважливіших задач, що вирішуються в процесі схемотехнічного проектування радіоапаратури з допомогою EDA-систем, є допускове проектування. Сучасні системи для автоматизації задач схемотехнічного проектування радіоелектронних пристроїв надають можливість: провести моделювання електричної схеми, побудувати графіки вихідних характеристик; провести моделювання роботи схеми з урахуванням зовнішніх впливів;

порівняти роботу ідеального пристрою та роботу з урахуванням паразитних параметрів.

Розглянемо можливості допускового проектування в найбільш відомих системах автоматизованого проектування: Micro-Cap, ElectronicsWorkbench, OrCAD, AltiumDesigner.

У системі Micro-Cap можна проводити дослідження аналогових та цифрових радіоелектронних пристроїв, розв'язувати задачі аналізу і статистичних досліджень у режимі постійного струму та в частотній області, проводити статистичний аналіз схеми методом Монте-Карло. У системі реалізовано графічний ввід електричних схем пристроїв, моделювання їх функціонування та динамічне відображення графіків вихідних характеристик [197].

Electronics Workbench надає можливість моделювати аналогові, цифрові і аналогово-цифрові схеми радіоелектронних пристроїв. Програмна система має інструменти для імітації короткого замикання, відмови компонентів у вигляді розриву, або наявності перехідного опору. В системі реалізовано декілька видів аналізу: моделювання роботи з постійним струмом; отримання амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик; аналіз перехідних процесів; аналіз, що враховує діапазон зміни параметрів елементів схеми і температури; обчислення відносної чутливості вихідних характеристик електричної схеми до зміни значень параметрів заданого компонента; обчислення значень вихідних характеристик в найгіршому випадку; багатоваріантний аналіз; статистичний аналіз за методом Монте-Карло [194-196].

OrCAD – програмна система для наскрізного проектування аналогових, цифрових та аналого-цифрових пристроїв. Система надає можливість визначати чутливість вихідних характеристик пристроїв до зміни значень параметрів компонентів, розраховувати передавальні функції, частотні, фазові і шумові характеристики; проводити статистичні випробування методом Монте-Карло, багатоваріантний аналіз та параметричну оптимізацію [198, 199].

Altium Designer [177-178] надає можливість виконувати цифро-аналогове моделювання. Моделювання відбувається на базі SPICE/XSpice та містить засоби, що забезпечують варіацію параметрів; статистичний аналіз методом Монте-Карло, моделювання найгіршого випадку, дослідження ланцюгів з врахуванням технологічного розкиду значень параметрів радіоелементів, або температурних залежностей. Програма PSPICE надає можливість вказувати діапазон зміни параметрів компонентів. При аналізі методом Монте-Карло схема моделюється до двадцяти тисяч раз. Кожен раз генерується новий набір значень параметрів за принципом випадкової вибірки. Програмне забезпечення PSPICE може проводити оцінку результатів за критеріями, які задані під час налаштування опцій аналізу [191-193].

Порівняльний аналіз можливостей використання методів допускового проектування в розглянутих системах наведено в таблиці 1.1.

З таблиці видно, що одним з широко застосовуваних методів статистичного аналізу в САПР є метод Монте-Карло. Початковими даними для аналізу є внутрішні параметри схеми, а результатом – визначення вихідних характеристик. Аналіз Монте-Карло моделює реакцію електричної схеми на зміну значень параметрів моделей радіоелементів, випадково змінюючи усі параметри моделі, для яких задано допустимі відхилення. Це забезпечує отримання статистичних даних відносного впливу на пристрій зміни значень параметрів елементів.

При аналізі Монте-Карло виконуються багатократні статистичні розрахунки. Перевагами методу є можливість врахування будь-яких статистичних законів розподілу параметрів, різних функціональних зв'язків та додаткових обмежень на параметри компонентів радіоелектронних пристроїв та його вихідні характеристики. Метод статистичних випробувань успішно застосовується, наприклад, при статистичному аналізі мікросхем. В цьому випадку можна врахувати нелінійні і кореляційні зв'язки між параметрами [6].

Також в системах схемотехнічного проектування використовується метод найгіршого випадку. В цьому методі передбачається, що кожен з заданих

параметрів відхиляється на максимально допустиме значення від номінального значення. При цьому відхилення вихідних параметрів обчислюється як сума модулів відхилень по кожному з параметрів. Перевагою даного методу є забезпечення гарантованого випуску придатних виробів. Однак метод висуває дуже жорсткі вимоги до точності виготовлення елементів.

Таблиця 1.1 – Можливості допускового проектування сучасних САПР

Найменування системи	Методи аналізу допусків	Методи синтезу допусків	Можливості врахування експлуатаційних та інших допусків
Micro-Cap	Монте-Карло, найгіршого випадку	—	Температурний аналіз
OrCAD	Монте-Карло	—	Температурний аналіз
AltiumDesigner	Монте-Карло, найгіршого випадку	—	Технологічний розкид параметрів, температурні залежності.
ElectronicsWork bench	Монте-Карло,	—	Аналіз варіації температур

Було проведено аналіз допусків на параметри фільтра, схема якого зображена на рис.1.6.

Номінальні параметри фільтра: Частота зрізу фільтра $f_c=120$ Гц; $R_1 = 5,76$ кОм; $R_2 = 15,4$ кОм; $C_1 = 0,18$ мкФ; $C_2 = 0,068$ мкФ. Результати аналізу допусків методом Монте-Карло та методом найгіршого випадку

наведено на рис. 1.7. Результати свідчать, що незначна зміна параметрів елементів призводить до суттєвих змін вихідної характеристики.

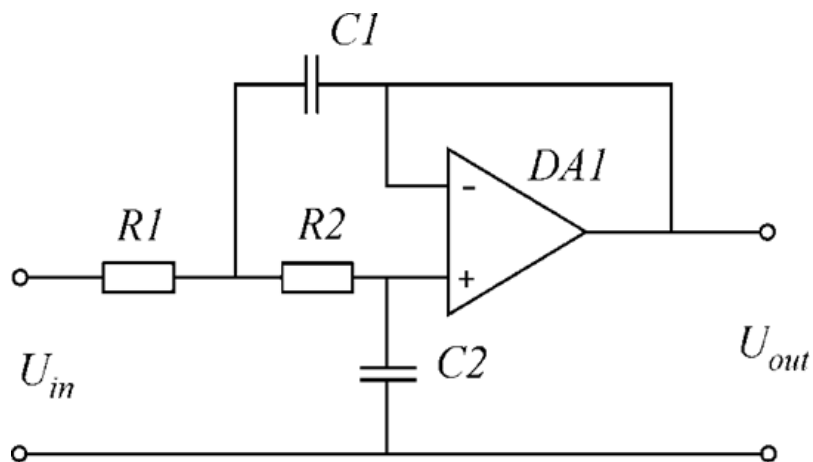


Рисунок 1.6 – Схема фільтра

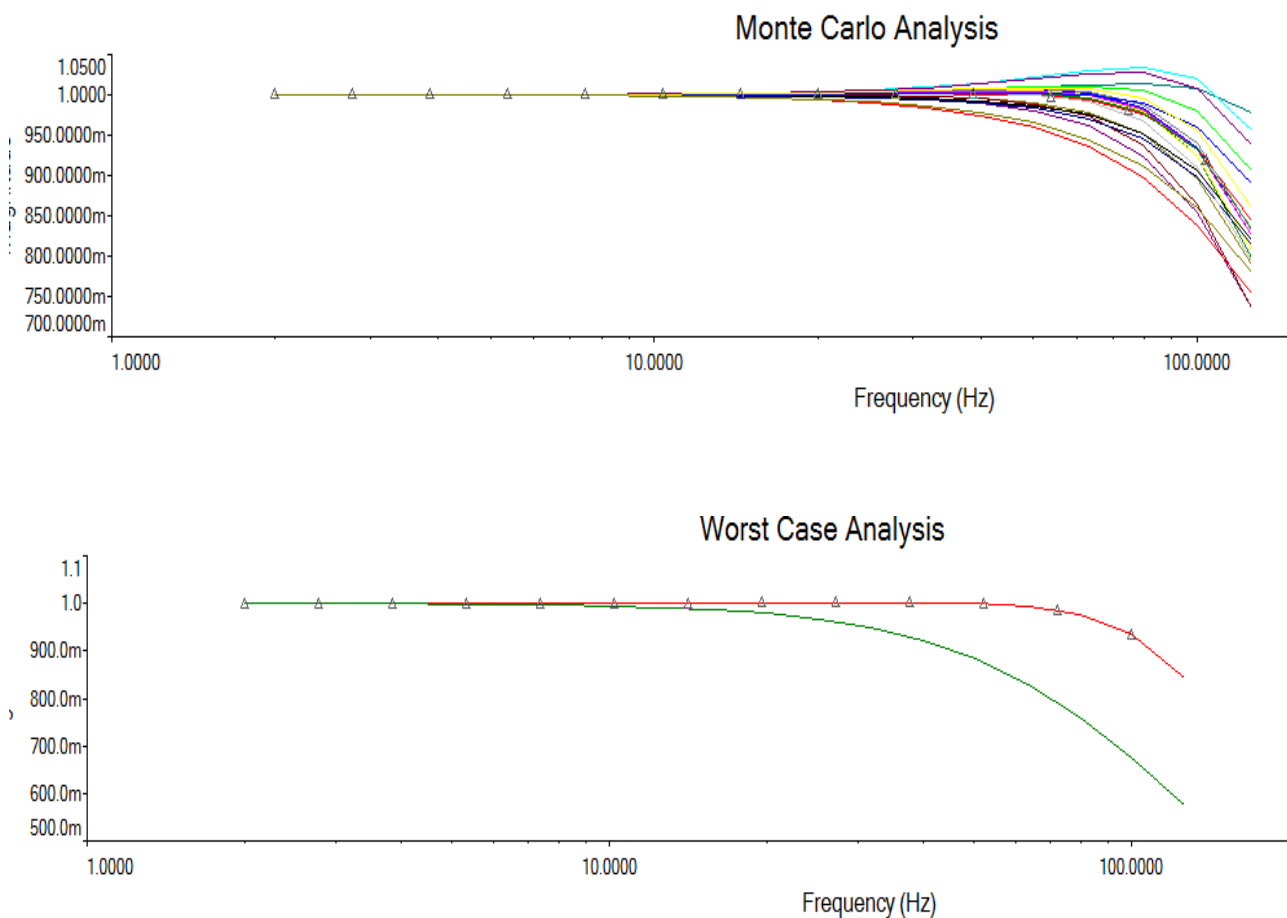


Рисунок 1.7 – Аналіз допусків в EDA системі

Таким чином, в усіх розглянутих системах автоматизації схемотехнічного проектування можливо проводити аналіз розкиду параметрів методом Монте-Карло, моделювання найгіршого випадку, а також в деяких системах можливе врахування експлуатаційних та інших допусків: технологічний розкид параметрів, температурні залежності, але в жодній з систем не передбачено вирішення задачі синтезу допусків на параметри радіоелектронних компонентів в системах автоматизованого моделювання схем електричних принципових розв'язуються лише задачі аналізу допусків.

Програмне забезпечення для моделювання вихідних характеристик пристроїв надвисоких частот створюється на базі чисельних методів: методу кінцевих різниць; методу кінцевих елементів; методу Галеркіна, методу матриць ліній передавання; методу інтегральних рівнянь; методу моментів, а також методу поперечного резонансу; методу узагальненої матриці розсіяння; методу Олінера, методу обчислення в спектральній області. Дані методи розраховують вихідні характеристики складних мікрохвильових структур. Найбільше розповсюдження в САПР отримали: метод кінцевих елементів; метод моментів; метод кінцевих різниць [187].

Для задач проектування НВЧ-пристроїв використовуються програмні системи AWR Design Environment компанії Applied Wave Research, CST Microwave Studio та HFSS.

AWR DESIGN ENVIRONMENT містить у собі три пакета програм: Microwave Office, Visual System Simulator та Analog Office. Це програмне забезпечення інтегроване в єдине середовище проектування радіоелектронних пристроїв. Microwave Office для моделювання пристроїв надвисоких частот використовує два методи: метод Олінера, який формує аналітичні вирази для матриць розсіяння неоднорідностей тракту та метод моментів, що виконує електродинамічний аналіз смужкової схеми. Ця автоматизована система містить модулі: Voltaire LS для лінійного моделювання в частотній області; EM Sight для тривимірного електромагнітного моделювання багатопарових

структур; Voltaire XL для нелінійного моделювання методом гармонічного балансу та методом рядів Вольтера [180].

CST MICROWAVE STUDIO – система для чисельного моделювання високочастотних пристроїв (планарних та багат шарових структур, антен, фільтрів, розгалужувачів потужності), а також аналізу проблем електромагнітної сумісності та цілісності сигналів в часовій та частотних областях з використанням прямокутної чи тетраедальної сіток розбиття. Для моделювання в програмній системі використовується метод кінцевих інтегралів. Метод може бути використано як в часовій, так і в частотній області. Метод не накладає ніяких обмежень на тип сітки розбиття. В ньому підтримуються структуровані сітки в декартовій системі координат та неортогональні сітки, наприклад, тетраедальна [189].

На рис. 1.8 наведено тривимірну модель гребінчастого фільтра на зустрічних стержнях.

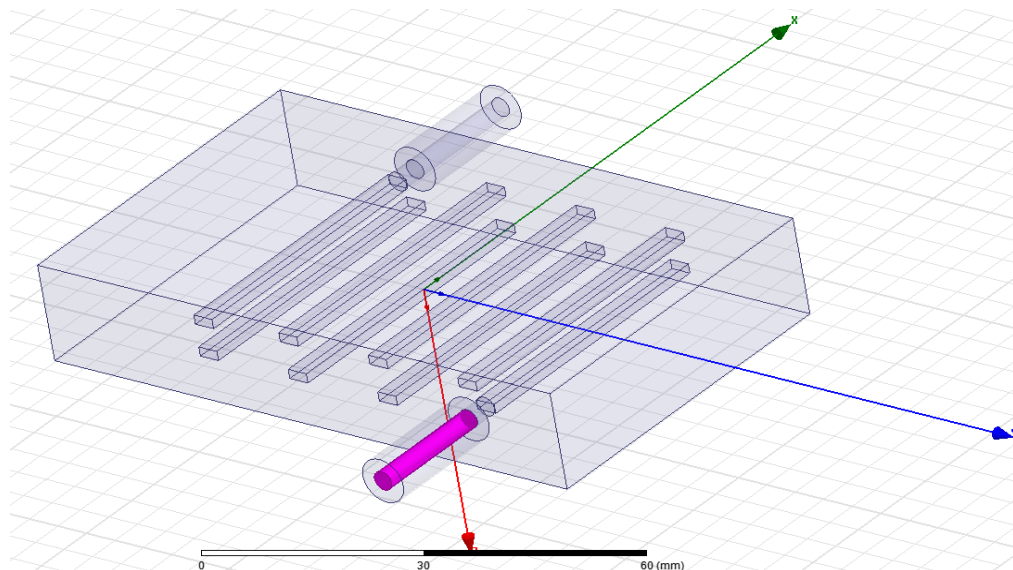


Рисунок 1.8 – Тривимірна модель гребінчастого фільтра на зустрічних стержнях

Вимоги, до проектування фільтра: смуга пропускання від 1,1 до 2 ГГц; максимальні втрати в смузі пропускання не більше 0,3 дБ; коефіцієнт стоячої

хвилі по напрузі в смузі пропускання $K_{\text{ств}} \leq 1,2$; ефективне загасання в смузі загородження не менше 40 дБ.

На рис. 1.9 наведено приклад впливу зміни конструктивних параметрів фільтра на АЧХ.

В теперішній час при створенні програмного забезпечення для проектування радіоелектронних пристроїв спостерігається тенденція до інтеграції різних систем проектування в єдине інформаційне середовище, в якому мається можливість розробки різних пристроїв від цифрових схем обробки та формування сигналів до НВЧ пристроїв та антен. Єдине інформаційне середовище характеризується організацією зручного інтерфейсу та асоціативного двонаправленого обміну даними між програмами з метою створення проекту радіоелектронної системи в цілому.

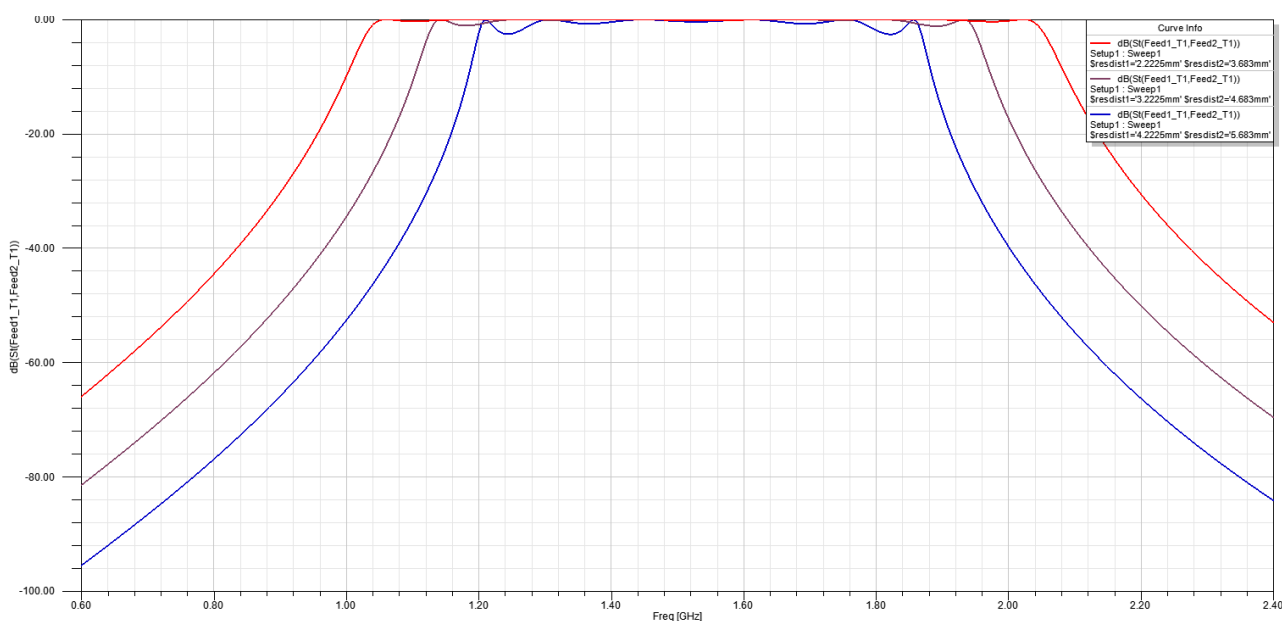


Рисунок 1.9 – Вплив зміни параметрів відстані між стержнями на АЧХ фільтра

Актуальною задачею є повний аналіз виробів радіоелектронної апаратури, починаючи з фізичних прототипів та завершуючи аналізом конструкції виробу з урахуванням впливу на неї факторів експлуатації.

Ansys Workbench – це приклад такого єдиного середовища, у склад якого входять модулі електромагнітного моделювання (HFSS, Q3D, Maxwell) та програми аналізу електронних схем та систем (Designer RF&SI та Simplorer). Ці програмні продукти через середовище Ansys Workbench можуть бути також інтегровані з інструментами теплового або механічного аналізу.

Програма High Frequency System Simulator призначена для аналізу тривимірних НВЧ структур. Моделювання в HFSS базується на використанні метода кінцевих елементів, що містить інструменти для адаптивного генерування та ділення комірок. Розв'язки для електромагнітного поля, які отримуються з рівнянь Максвелла, надають можливість точно визначити усі вихідні характеристики пристрою з урахуванням виникнення та перетворення одних типів хвиль в інші, втрат в матеріалах та на випромінювання. Розв'язок граничної задачі отримується в частотній області. Використання метода кінцевих елементів забезпечує універсальність чисельних алгоритмів [183-186].

Програмна система HFSS надає можливість розв'язувати задачі обчислення радіочастотних та мікрохвильових пристроїв; дослідження електромагнітної сумісності при розробці високочастотних компонентів, що використовуються в комунікаційних або радіолокаційних системах; моделювання антен, дільників потужності, схем комутації, хвилеводних елементів, НВЧ фільтрів. Початковими даними для розрахунків є тривимірна геометрична модель пристрою, властивості матеріалів конструкції. В результаті обчислень отримують поля усередині та зовні структур, а також багатомодові S -параметри та випромінювання [183-186].

Для аналізу конструкції пристрою система HFSS містить модуль Optimetrics, що надає можливість провести оптимізацію шляхом моделювання з використанням різних значень параметрів. Цей інструментарій забезпечує як зміну геометрії пристрою, так і параметрів матеріалів конструкції, значень параметрів елементів. Модуль Optimetrics містить п'ять інструментів: Parametric, Optimization, Tuning, Sensitivity, Statistical. Вони використовуються

для проведення різних типів досліджень при оптимізації конструкції [183-186].
Аналіз можливостей модуля наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Аналіз можливостей модуля Optimetrics

Назва інструменту	Тип досліджень
Parametric (параметричний аналіз)	Завдання одного або декількох параметрів, що змінюються в заданому діапазоні або містять ряд дискретних значень.
Optimization (оптимізація)	Задається цільова функція для задач оптимізації. Optimetric змінює значення параметрів проекту так, щоб досягнути заданої мети.
Tuning (налаштування)	Значення параметрів змінюються в інтерактивному режимі, та для кожного положення конструкції розраховуються вихідна характеристики.
Sensitivity (чутливість)	Розрахунок чутливості вихідних характеристик до незначної зміни вхідних параметрів.
Statistical (статистичний розподіл)	Визначення статистичного розподілу характеристик пристрою, що виникає під впливом випадкового розподілу значень вхідних параметрів.

В процесі проектування спочатку створюється номінальна конструкція, далі задаються параметри конструкції, які необхідно оптимізувати. Такими параметрами можуть бути будь-які параметри, що мають чисельне значення в HFSS. Наприклад, можна використовувати параметри геометрії моделі, властивості матеріалу, або граничні умови. Це надає можливість проводити порівняння результатів, щоб визначити, як зміна параметра конструкції впливає на характеристики пристрою. Для цього задаються діапазони зміни параметрів.

Optimetrics використовує результати попередньо проведеного чисельного моделювання, що надає можливість зрозуміти вплив на характеристики пристрою зміну значень проектних параметрів. В цьому випадку отримується варіант конструкції, який найменш чутливий до технологічних або експлуатаційних допусків [183-186].

Таким чином, розглянуті системи мають приблизно рівні функціональні можливості для проектування радіоелектронних пристроїв надвисоких частот, однак не містять процедури синтезу допусків на конструктивні параметри пристроїв та параметри матеріалів, для розв'язку задач допускового проектування використовується аналіз відхилень параметрів в заданому діапазоні та статистичний метод.

1.5 Постановка мети та задач дослідження

Проведений огляд літературних джерел, присвячених різним аспектам проблеми підвищення точності та надійності радіоелектронної апаратури [1-6, 20-62, 70-159] показав, що на сьогодні накопичено значний досвід в вирішенні задач допускового проектування. При цьому основні результати отримані для задач аналізу допусків на параметри елементів. Однак одним із головних завдань при проектуванні радіоелектронної апаратури є забезпечення заданої точності характеристик пристроїв впродовж усього життєвого циклу апаратури. В процесі експлуатації на апаратуру діють різноманітні зовнішні фактори, які за природою можна поділити на кліматичні, механічні, радіаційні впливи і фактори космічного простору. Дія окремого зовнішнього фактору або сукупність зовнішніх чинників призводить до зворотних та незворотних змін параметрів елементів радіоапаратури і значно впливають на точність її характеристик. Незворотні відхилення визначають як зміни, що виникають внаслідок дії дестабілізуючого фактору і після припинення його дії

залишаються. Зворотні відхилення змінюються в залежності від зміни значення дестабілізуючого зовнішнього фактору.

Проблема забезпечення точності вихідних характеристик і параметрів радіоелектронної апаратури вирішується на етапі схемотехнічного проектування з допомогою допускового проектування, в якому визначаються відхилення вихідних функцій при заданих відхиленнях на параметри елементів (задача аналізу) або відхилення на параметри елементів при заданих межових відхиленнях вихідних функцій (задача синтезу). Розроблені процедури аналізу та синтезу допусків враховують закони розподілу параметрів елементів і використовують функції чутливості для номінальних значень параметрів елементів. Це призводило до значних похибок при призначенні допусків.

Проблема підвищення точності процедур призначення допусків вирішувалась впровадженням інтервальних моделей вихідних функцій, утворених в точках дотику допускових областей і меж області працездатності. Запропоновані методи призначення допусків враховували нелінійні властивості вихідних функцій радіоелектронних пристроїв. Допускові області формувались у вигляді геометричних моделей з урахуванням функцій розподілу основних параметрів елементів. Але використання цих методів для призначення допусків з урахуванням зміни параметрів елементів під дією зовнішніх впливів призводило, як правило, до значних похибок у зв'язку з відсутністю методів формування допускових областей для усього життєвого циклу радіоелектронних пристроїв. Пов'язано це з перетворенням інтервальних величин, що використовувались в цих методах в інтервальні структури. Для підвищення ефективності процедур допускового проектування необхідно також враховувати цінові показники та особливості елементної бази радіоелектронних апаратів [202-210].

З урахуванням цього метою дисертаційної роботи є підвищення 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 цінові 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 врахуванням закону розподілу відхилень параметрів елементів від номінальних значень, заданих статистичними рядами.

8. Розроблення методу допускового проектування з врахуванням 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.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Задача синтезу допусків є обернена тобто некоректна задача. 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.

2. Існуючі процедури призначення допусків враховують закони розподілу параметрів елементів і використовують функції чутливості для номінальних значень параметрів елементів. Це призводить до значних похибок при призначенні допусків.

3. Проблема підвищення точності процедур призначення допусків вирішувалась впровадженням інтервальних моделей вихідних функцій, утворених в точках дотику допускових областей і меж області працездатності. Запропоновані методи призначення допусків враховували нелінійні властивості вихідних функцій радіоелектронних пристроїв. Допускові області формувались у вигляді брусів та еліпсоїдів. Але використання цих методів для призначення допусків з урахуванням зміни параметрів елементів під дією зовнішніх впливів призводило, як правило, до значних похибок у зв'язку з відсутністю методів формування допускових областей для усього життєвого циклу

радіоелектронних пристроїв. Пов'язано це з перетворенням інтервальних величин, що використовувались в цих методах в інтервальні структури. Таким чином, на сучасному етапі розвитку методів проектування радіоелектронної апаратури актуальною є задача розробки методів призначення допусків на параметри електронних апаратів з використанням моделей, які враховують експлуатаційні обмеження, що надають можливість скоротити терміни розробки виробів та зменшити їх собівартість.

4. Точність допускового проектування може бути підвищена за рахунок формування допускових областей у вигляді геометричних об'єктів, які враховують реальні закони розподілу параметрів, кореляційні зв'язки між параметрами та зовнішні впливи на параметри елементів пристроїв. Також необхідно розробити методи визначення розмірів допускових областей із урахуванням заданих відхилень вихідних функцій та стратегій оптимізації.

5. В багатьох розглянутих САПР існують програмні модулі, які надають можливість розв'язувати задачі допускового аналізу. Для реалізації задач допускового синтезу в кожній з таких САПР необхідно розробити спеціалізовані модулі, що пов'язано з необхідністю доступу до API-функцій таких систем. Однак функціонування багатьох радіоелектронних пристроїв можна описати з допомогою аналітичних функціональних моделей, що надасть можливість використовувати універсальний підхід до програмування задач допускового синтезу. Тому при автоматизації задачі допускового проектування різних видів радіоелектронних пристроїв можна розглядати два підходи: інтеграція спеціалізованих програмних модулів в кожен з систем автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв або використання існуючих математичних моделей вихідних характеристик радіоелектронних пристроїв в універсальному програмному продукті для допускового проектування.

РОЗДІЛ 2

МЕТОД СИНТЕЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Метод дотичних для синтезу інтервальних допусків

Задача синтезу інтервальних допусків ставиться як задача визначення розмірів допускової області у вигляді бруса та розташування його 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 [212]:

$$G(W, \varphi(X), K_{w_j}) \rightarrow \max_{W \in \mathbf{W}} ; \quad (2.1)$$

$$y(X) \in \mathbf{y}, \quad X \in \Omega_w ; \quad (2.2)$$

$$X = X_r + W \quad (2.3)$$

де G – цільова функція;

$W = \{w_1, \dots, w_n\}$ – множина відхилень параметрів;

$\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$ – інтервальна множина відхилень параметрів;

$\mathbf{w}_i = [\underline{w}_i, \dots, \overline{w}_i]$ та $\mathbf{y} = [\underline{y}, \dots, \overline{y}]$ – інтервали відхилю 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. Можна розглянути, наприклад, випадки рівних відхилень параметрів. Функція розподілу $\varphi(X)$ задає конфігурацію допускової області та впливає на відхилення параметрів. Ці особливості необхідно відобразити в назві допусків, що призначаються.

ВИЗНАЧЕННЯ 2.1. Інтервальні мають назву допуски, що призначаються при функції розподілу параметрів:

$$\varphi(X) = \begin{cases} f(X), & X \in \mathbf{X}; \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (2.4)$$

де $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$ – множина інтервалів, що обмежує область розподілу.

Допускова область при інтервальних допусках має вигляд бруса – ортогонального гіперпаралелепіпеду з ребрами, паралельними осям координат. На рис. 2.1 показано формування бруса при одnobічному обмеженні області працездатності, де Ω_t – допускова область; S_b та S_t – межа гіперповерхня області працездатності та гіперповерхня лінійної моделі вихідної характеристики; x_{bi} – координати точки дотику B допускової області Ω_t та межевої гіперповерхні S_b .

Обчислення інтервальних допусків відбувається з допомогою інтервальних моделей [212], при створенні яких використовується внутрішня та зовнішня інтерполяція. Внутрішня інтерполяція дозволяє визначити точки, які відповідають мінімальному та максимальному значенням вихідної функції.

Зовнішня інтерполяція уточнює значення коефіцієнтів моделі в обраних точках. Це дозволяє врахувати нелінійні властивості вихідної функції та підвищити точність обчислення допусків [213].

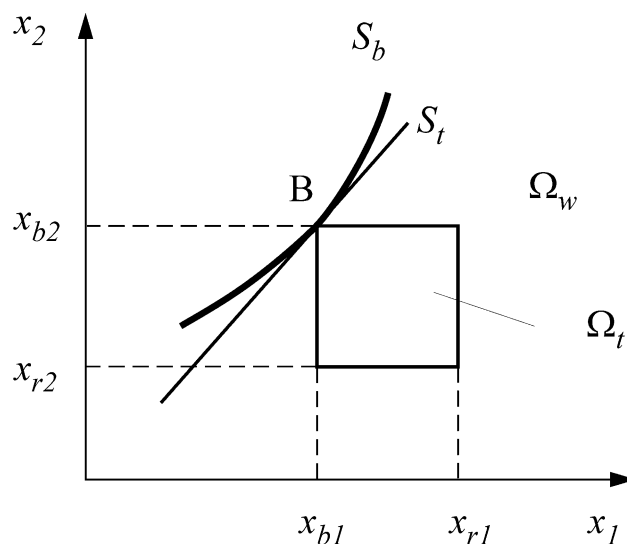


Рисунок 2.1 – Допускова область для призначення інтервальних допусків.

Найбільша точність обчислення забезпечується, коли модель вихідної функції в межових точках створюється розкладанням в ряд Тейлора [211]. Для призначення допусків тоді використовується рівняння [212]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i (x_i - x_{bi}), \quad (2.5)$$

де a_i – лінійні коефіцієнти розкладання в ряд Тейлора;

n – кількість елементів, для яких призначаються допуски;

x_i – параметри елементів;

x_{bi} – координати точки розкладання вихідної функції в ряд Тейлора.

ВИЗНАЧЕННЯ 2.2. Дотичним брусом до обмежувальної гіперплощини є брус, одна з вершин якого лежить на цій гіперплощині, а інші – в області простору, що обмежується гіперплощиною.

Властивості гіперпаралелепіпеду допускової області витікають з теореми дотичного бруса [212].

ТЕОРЕМА 2.1 (Дотичного бруса). В області простору, обмеженого гіперплощиною, може бути побудовано єдиний дотичний брус, одна з вершин якого лежить на обмежувальній гіперплощині, а максимально віддалена від неї вершина – в області обмежень, якщо виконуються умови:

$$|w_i| < \left| \frac{b}{a_i} \right|, \quad (i = \overline{1, n}) \quad (2.6)$$

де
$$b = y - y_b + \sum_{i=1}^n a_i w_{bi};$$

$w_i = x_i - x_{ri}$ та $w_{bi} = x_{bi} - x_{ri}$ – відхилення параметрів елементів в поточній та межовій точках;

y_b – значення вихідної функції в межовій точці (x_{b1}, \dots, x_{bn}) .

Доведення. Перенесемо початок координат в точку (x_{r1}, \dots, x_{rn}) номінальних значень параметрів елементів. Рівняння (2.5) в цьому випадку перетворюється до виду:

$$\sum_{i=1}^n a_i w_i = b. \quad (2.7)$$

Тоді брус Ω_t буде мати одну вершину в межовій точці B , а інші вершини – на координатних осях. Координати цих вершин визначаються співвідношеннями:

$$w_i = \frac{b}{a_i}, \quad (i = \overline{1, n}) \quad (2.8)$$

Всі ці вершини будуть знаходитись в області обмежень, якщо довжина цих ребер буде визначатися умовами (2.6). Одиначність бруса витікає з того, що в ортогональному гіперпаралелепіпеді довжина ребер визначається відстанню межевої точки від координатних площин.

Область Ω_t є брусом з ребрами інтервальних допусків. Об'єм цього гіперпаралелепіпеда залежить від координат межевої точки.

При призначенні допусків також можуть задаватись співвідношення між допусками різних параметрів. Це перетворює вираз (2.7) до виду:

$$w_j \sum_{i=1}^n k_{wij} a_i = b, \quad (2.9)$$

де $k_{wij} = w_i/w_j$ ваговий коефіцієнт інтервальних допусків.

Вагові коефіцієнти визначаються умовами призначення допусків. При однакових відхиленнях $k_{wij} = 1$.

Таким чином, задача призначення інтервальних допусків не може бути вирішена однозначно, а в допусковому проектуванні доцільно використовувати різні стратегії оптимізації допусків. Наприклад, стратегії рівних допусків (δ -стратегія), максимального об'єму допускової області (V -стратегія), мінімальної вартості (P -стратегія), оптимального співвідношення ціна/якість (P/V -стратегія).

2.2 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією однакових допусків

В стратегії однакових допусків приймається, що допустимі відхилення всіх параметрів елементів однакові [214-215]. Цільова функція δ -стратегії записується у вигляді:

$$\delta = |\delta_i| = \text{idem}, \quad (i = \overline{1, n}) \quad (2.10)$$

де δ_i – відносна зміна параметрів елементів;

n – кількість елементів.

Задача розв'язується при обмеженнях вихідної функції:

$$y \in [\underline{y}; \overline{y}], \quad (2.11)$$

де \underline{y} та \overline{y} – нижнє та верхнє значення вихідної функції.

Використовуються лінійні моделі вихідної функції:

$$\underline{y} = \underline{a}_0 + \sum_{i=1}^n \underline{a}_i \underline{x}_i; \quad \overline{y} = \overline{a}_0 + \sum_{i=1}^n \overline{a}_i \overline{x}_i, \quad (2.12)$$

де \underline{a}_i та \overline{a}_i – лінійні коефіцієнти розкладу вихідної функції в ряд Тейлора для нижній та верхній меж області працездатності;

$$\underline{a}_0 = \underline{y} - \sum_{i=1}^n \underline{a}_i \underline{x}_i; \quad \overline{a}_0 = \overline{y} - \sum_{i=1}^n \overline{a}_i \overline{x}_i;$$

\underline{x}_i та \bar{x}_i – нижнє та верхнє межові значення параметрів елементів в точках дотику меж області працездатності та вершин допускової області.

Якщо відбувається перехід до відносних відхилень параметрів рівняння (2.12) приймають вигляд:

$$\sum_{i=1}^n \underline{a}_i x_{ri} \underline{\delta}_i = \underline{b}; \quad \sum_{i=1}^n \bar{a}_i x_{ri} \bar{\delta}_i = \bar{b}, \quad (2.13)$$

де x_{ri} – номінальні значення параметрів елементів;

$\underline{\delta}_i$ та $\bar{\delta}_i$ – нижні та верхні допустимі відносні відхилення параметрів електрорадіоелементів від їх номінальних значень;

$$\underline{b} = \underline{y} - \underline{a}_0 - \sum_{i=1}^n \underline{a}_i x_{ri}; \quad \bar{b} = \bar{y} - \bar{a}_0 - \sum_{i=1}^n \bar{a}_i x_{ri}.$$

В рівняннях (2.13) знаки додатків та знак правої частини рівняння співпадають. Це дозволяє записати розв'язок рівнянь (2.13) у вигляді:

$$\underline{\delta} = |\underline{b}| / \sum_{i=1}^n |\underline{a}_i| x_{ri}; \quad \bar{\delta} = |\bar{b}| / \sum_{i=1}^n |\bar{a}_i| x_{ri}. \quad (2.14)$$

Співвідношення (2.14) в загальному випадку формують допускову область з несиметричними відхиленнями:

$$\underline{\delta}_i = \begin{cases} -\bar{\delta}, & \underline{a}_i > 0; \\ \underline{\delta}, & \text{інакше;} \end{cases} \quad \bar{\delta}_i = \begin{cases} \bar{\delta}, & \bar{a}_i > 0; \\ -\underline{\delta}, & \text{інакше;} \end{cases} \quad (i = \overline{1, n}).$$

Якщо прийняти допустимі відхилення симетричними, то формуються ще дві допускові області, що показано на рис. 2.2, де Ω_w – область

працездатності; Ω_t – допускова область з несиметричними відхиленнями; $\underline{\Omega}_t$ та $\overline{\Omega}_t$ – допускові області з симетричними відхиленнями параметрів.

На рис. 2.2 область $\overline{\Omega}_t$ виходить за межі області працездатності.

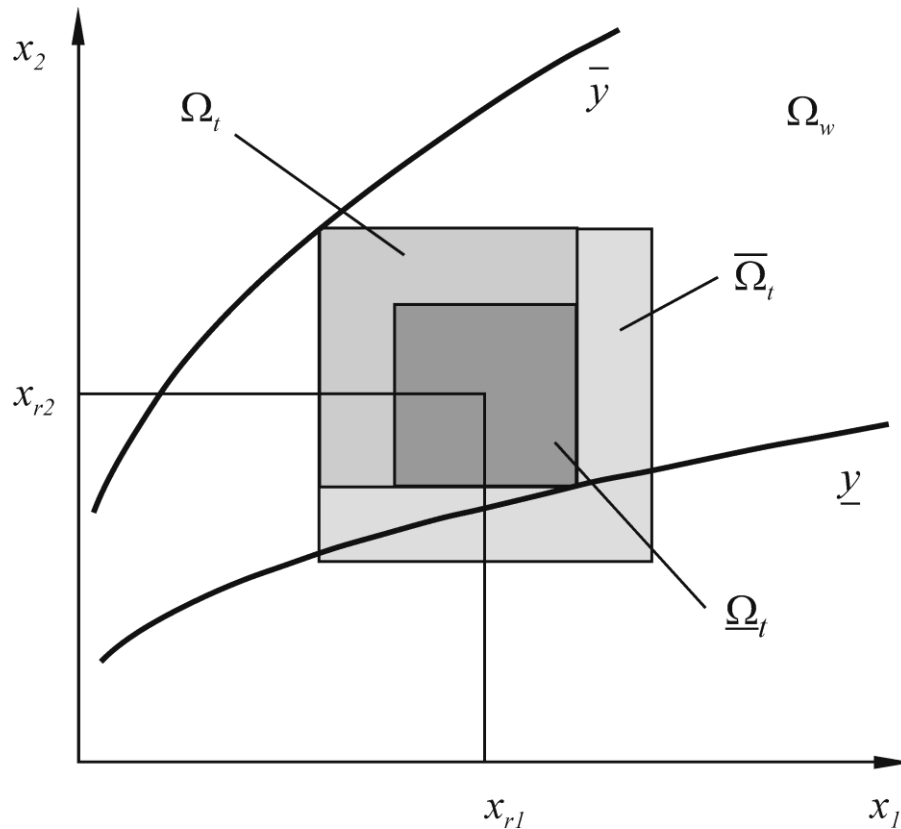


Рисунок 2.2 – Формування інтервальних допускових областей при двобічному обмеженні вихідної функції

Тому обираються несиметричні допуски (область Ω_t) або дозволяється неповне використання області працездатності (область $\underline{\Omega}_t$). Повне використання області працездатності при симетричних допусках можливо, якщо обмежується не значення вихідної функції, а ширина інтервалу її зміни:

$$w_y = \overline{y} - \underline{y},$$

де w_y — ширина інтервалу зміни вихідної функції.

Тоді з рівнянь (2.13) формується одне рівняння:

$$\sum_{i=1}^n (\bar{a}_i \bar{\delta}_i - \underline{a}_i \underline{\delta}_i) = b_w, \quad (2.15)$$

де $b_w = \bar{b} - \underline{b}$.

З врахуванням протилежних знаків верхніх та нижніх відхилень з рівняння (2.15) випливає:

$$\delta = b_w / \sum_{i=1}^n |\bar{a}_i + \underline{a}_i| x_{ri}. \quad (2.16)$$

Формування допускової області з симетричними відхиленнями параметрів при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції показано на рис. 2.3, з якого видно, що вершини допускової області торкаються меж області працездатності та таким чином досягається повне використання області працездатності.

Якщо допуски призначаються на однотипні елементи, наприклад, розміри елементів конструкцій виробів, то можуть використовуватись абсолютні значення допустимих відхилень. Отримано співвідношення для визначення абсолютних та відносних допустимих відхилень параметрів з використанням δ -стратегії, якщо область працездатності формується обмеженнями вихідної характеристики радіоелектронного пристрою зверху, знизу або шириною інтервалу її значень. Перелік співвідношень для призначення допустимих відхилень в δ -стратегії наведено в табл. 2.1.

Співвідношення табл. 2.1 використовуються в ітераційних алгоритмах, які дозволяють врахувати нелінійні властивості вихідних функцій.

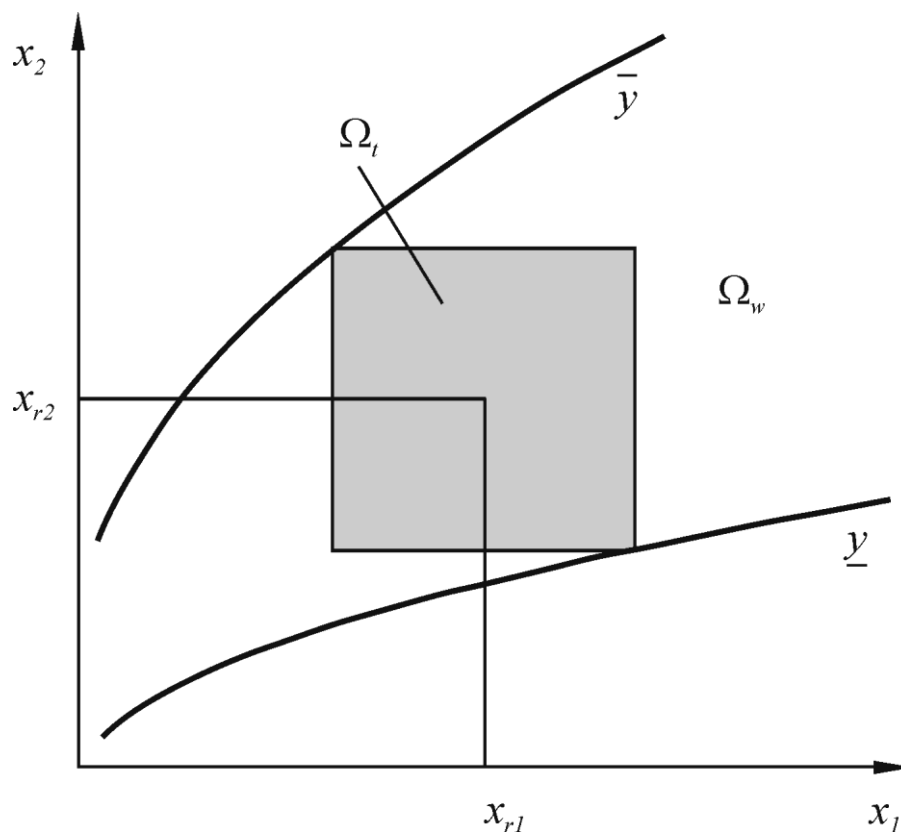


Рисунок 2.3 – Формування допускової області при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції

Таблиця 2.1 – Допустимі відхилення параметрів в δ -стратегії

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

Алгоритм при обмеженнях знизу має вигляд.

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 $\underline{\delta}_y = (y - y_r) / y_r$ – 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 (2.14).

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 -ій ітерації.

Крок 5. Визначається значення вихідної функції в точці дотику вершини допускової області та межі 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 δ -стратегії при інших обмеженнях вихідної функції.

2.3 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією максимального об'єму допускової області

Стратегія максимального об'єму допускової області надає можливість перерозподілити відхилення параметрів елементів з метою зменшення кількості бракованих виробів в процесі їх виробництва [214, 215]. Цільова функція V – стратегії записується у вигляді:

$$V = \prod_{i=1}^n |\delta_i| \rightarrow \max, \quad (2.17)$$

де V – об'єм допускової області.

Оптимізаційна задача (2.17) розв'язується методом множників Лагранжа [216-219]. Для цього при обмеженнях вихідної функції знизу створюється додаткова функція:

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^n |\underline{\delta}_i| + \lambda \sum_{i=1}^n \underline{a}_i x_{ri} \underline{\delta}_i, \quad (2.18)$$

де λ – множник Лагранжа.

Функція (2.18) досягає екстремального значення при виконанні умов:

$$\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |\underline{\delta}_i| + \lambda \underline{a}_j x_{rj} = 0, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (2.19)$$

Умови (2.19) можна записати у вигляді співвідношень:

$$\lambda = - \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |\underline{\delta}_i| / \underline{a}_j x_{rj}, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (2.20)$$

При однакових λ із (2.20) формуються співвідношення

$$\underline{a}_i x_{ri} \underline{\delta}_i = \underline{a}_j x_{rj} \underline{\delta}_j, \quad (i, j = \overline{1, n}).$$

Підстановка цих співвідношень в рівняння (2.13) дозволяє визначити оптимальне значення відхилень:

$$\underline{\delta}_i = \frac{\underline{b}}{n \underline{a}_i x_{ri}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (2.21)$$

Аналогічно записуються оптимальні співвідношення при інших обмеженнях вихідної функції. Перелік цих відхилень наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Допустимі відхилення параметрів в V -стратегії

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

Співвідношення табл. 2.2 використовуються в ітераційних алгоритмах, які мають структуру подібну до алгоритму δ -стратегії.

2.4 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією мінімальної вартості

При призначенні допусків з урахуванням цінних показників використовуються цінні характеристики [214, 215]. В радіоелектронній промисловості такі характеристики задають в вигляді таблиць. Графічне відображення цінних характеристик електрорадіоелементів наводиться на рис. 2.4, де P – ціна електрорадіоелемента; 1 – цінна характеристика резистора; 2 – цінна характеристика конденсатора.

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

$$P = p_0 |\delta|^{p_1}, \quad (2.22)$$

де p_0 и p_1 – коефіцієнти цінової характеристики.

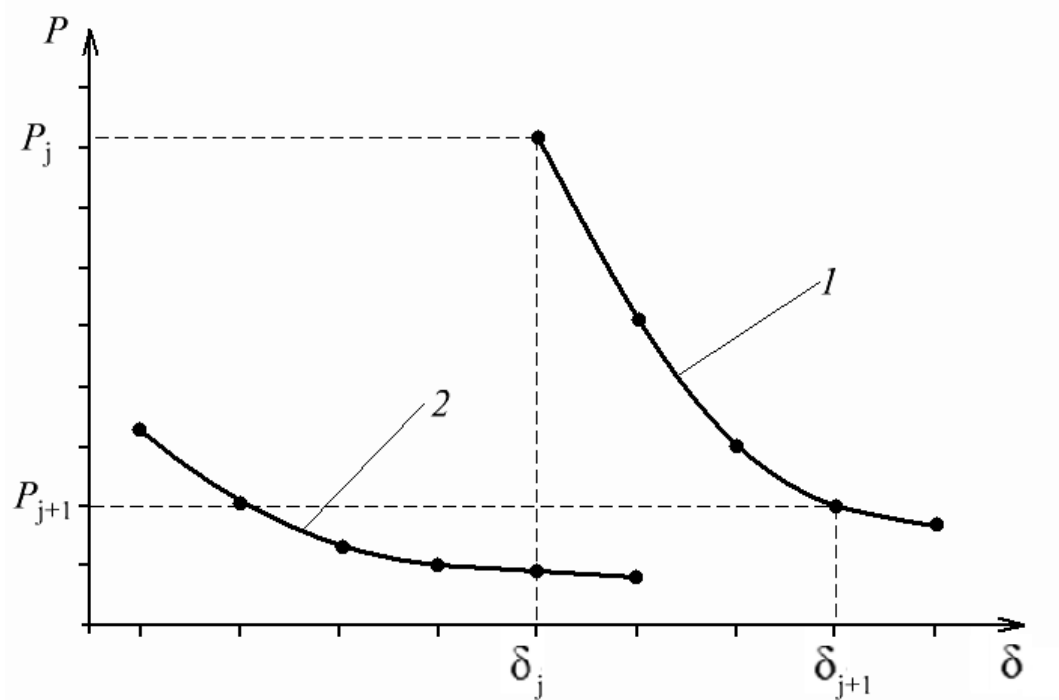


Рисунок 2.4 – Цінові характеристики електрорадіоелементів

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

$$p_1 = \frac{\lg(P_j / P_{j+1})}{\lg(\delta_j / \delta_{j+1})}; \quad p_0 = P_j |\delta_j|^{-p_1}, \quad (2.23)$$

де j – номер точки цінової характеристики.

Якщо використовувати модель (2.22) цільова функція P -стратегії записується у вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^n p_{0i} \delta_i^{p_{1i}} \rightarrow \min, \quad (2.24)$$

де P — загальна вартість елементів.

Для розв'язку оптимізаційної задачі створюється додаткова функція, яка при обмеженнях вихідної функції знизу має вид:

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^n p_{0i} |\underline{\delta}_i|^{p_{1i}} + \lambda \sum_{i=1}^n a_i x_{ri} \underline{\delta}_i. \quad (2.25)$$

Функція (2.25) досягає екстремального значення при виконанні умов:

$$p_{0i} p_{1i} |\underline{\delta}_i|^{p_{1i}-1} + \lambda a_i x_{ri} = 0, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (2.26)$$

Рівняння (2.26) разом з рівнянням (2.13) створюють систему рівнянь, розв'язком якої є співвідношення:

$$\underline{\delta}_i = \frac{b \mu_{pi}}{a_i x_{ri}}, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (2.27)$$

де $\mu_{pi} = p_{1i} P_i / \sum_{i=1}^n p_{1i} P_i$;

P_i — вартість i -го елемента.

В правую частину виразу (2.27) входять невідомі значення вартості елементів, які враховуються в ітераційному алгоритмі результатами попередньої ітерації.

Аналогічно в P -стратегії записуються оптимальні співвідношення при інших обмеженнях вихідної функції. Перелік оптимальних відхилень P -стратегії при різних обмеженнях наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – 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	$\bar{\delta}_i = b_w \mu_{pi} / [(\bar{a}_i + \underline{a}_i) x_{ri}]$	$\underline{\delta}_i = -\bar{\delta}_i$

При обмеженнях вихідної характеристики знизу ітераційний алгоритм має вид.

Крок 1. Визначаються початкові допустимі відхилення параметрів елементів та початкові координати точки дотику вершини допускової області та межі області працездатності.

Аналогічно кроку 1 та 2 алгоритму δ -стратегії.

Крок 2. Визначаються коефіцієнти моделі цінової характеристики. Використовуючи співвідношення (2.23).

Крок 3. Визначаються лінійні коефіцієнти розкладання вихідної функції в ряд Тейлора в точці дотику вершини допускової області та межі області працездатності.

Крок 4. Визначаються оптимальні допустимі відхилення з використанням виразів (2.27), в яких використовуються співвідношення:

$$\mu_{pi}^{(k)} = p_{1i} P_i^{(k-1)} / \sum_{i=1}^n p_{1i} P_i^{(k-1)}.$$

Крок 5. Визначаються координати точки дотику вершини допускової області та межі області працездатності.

Аналогічно кроку 4 алгоритму δ -стратегії.

Крок 6. Перевіряється умова завершення алгоритму:

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

Якщо умова виконується – кінець алгоритму, інакше – перехід до кроку 2.

Вирази з табл. 2.3 використовуються в ітераційних алгоритмах при призначенні допусків в P -стратегії.

2.5 Алгоритм синтезу інтервальних допусків за стратегією ціна/якість

В стратегії ціна/якість визначається оптимальне (мінімальне) значення відношення загальної вартості елементів до показника якості. Таким показником при допусковому проектуванні може виступати об'єм допускової області, оскільки збільшення цього об'єму призводить до зменшення браку в процесі виготовлення пристроїв. Тоді цільова функція в P/V -стратегії набуває вигляду [214, 215, 222]:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n P_{0i} |\delta_i|^{P_{1i}}}{\prod_{i=1}^n |\delta_i|} \rightarrow \min, \quad (2.28)$$

де $Q = P/V$ – показник ціна/якість.

Складний вид цільової функції (2.28) ускладнює отримання оптимізаційних співвідношень. Тому при оптимізації допустимих відхилень параметрів використовується модель вагової функції:

$$Q = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i |\delta_i|^{p_{i1}-1}, \quad (2.29)$$

де g_0 та g_i – коефіцієнти моделі вагової функції, що визначаються з умови паралельності дотичних гіперплощин до гіперповерхонь (2.28) та (2.29):

$$(p_{i1} - 1)g_i |\delta_i|^{p_{i1}-2} = c_i, \quad (i = \overline{1, n}),$$

де $c_i = \frac{\partial Q}{\partial \delta_i} \Big|_{X_b}$ – лінійні коефіцієнти розкладання функції (2.28) в ряд Тейлора;

$X_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – координати точки розкладання функції (2.28) в ряд Тейлора.

Для розв'язання оптимізаційних задач методом множників Лагранжа з обмеженням вихідної функції знизу створюється додаткова функція:

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^n g_i |\delta_i|^{p_{i1}-1} + \lambda \sum_{i=1}^n \underline{a}_i x_{ri} \delta_i.$$

Оптимальні значення допустимих відхилень визначаються з умов

$$(p_{i1} - 1) g_i |\delta_i|^{p_{i1}-2} + \lambda \underline{a}_i x_{ri} = 0, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (2.30)$$

Розв'язання системи рівнянь, що створена виразами (2.13) та (2.30), призводить до оптимальних значень допустимих відхилень:

$$\underline{\delta}_i = \frac{b \underline{\mu}_{qi}}{a_i x_{ri}}, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (2.31)$$

де $\underline{\mu}_{qi} = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$; $h_i = (p_{1i} - 1)g_i P_i / (p_{0i} \delta_i)$.

В праву частину виразу (2.31) входять невідомі значення відхилення параметрів та вартості елементів, що враховується в ітераційнім алгоритмі результатами попередньої ітерації. Існує можливість отримання прямого виразу для допустимих відхилень через параметри цільової та вихідної функції, цінової характеристики. Однак при цьому збіжність ітераційного процесу значно погіршується.

Інші обмеження призводять до виразів подібним (2.31). Перелік виразів для оптимальних відхилень параметрів P/V -стратегії при різних обмеженнях наведено в табл. 2.4. Вирази табл. 2.4 використовуються в ітераційних алгоритмах P/V -стратегії при різних обмеженнях вихідної функції. При обмеженнях вихідної функції знизу такий алгоритм має вид:

Таблиця 2.4 – Оптимальні відхилення параметрів в P/V -стратегії

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

Крок 1. Обираються початкові значення відхилень параметрів елементів та початкові координати точки дотику вершини допускової області та меж області працездатності.

Аналогічно кроку 1 та 2 алгоритму δ -стратегії.

Крок 2. Визначаються коефіцієнти моделі цінової характеристики. Аналогічно кроку 2 алгоритму P -стратегії.

Крок 3. Визначаються коефіцієнти моделі цільової функції. Використовуються співвідношення (2.29).

Крок 4. Визначаються лінійні коефіцієнти розкладання вихідної функції в ряд Тейлора в точці дотику вершини допускової області та меж області працездатності.

Крок 5. Визначаються оптимальні допустимі відхилення з допомогою виразу (2.31), в якому використовуються співвідношення:

$$\underline{h}_i^{(k)} = (p_{1i} - 1)g_i^{(k)}P_i^{(k-1)} / (p_{0i}\underline{\delta}_i^{(k-1)}).$$

Крок 6. Визначаються координати точки дотику вершини допускової області та меж області працездатності. Аналогічно кроку 4 алгоритму δ -стратегії.

Крок 7. Перевіряється умова завершення алгоритму

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

де k – номер ітерації.

Якщо умова виконується – кінець алгоритму, інакше – перехід до кроку 2.

Аналогічно описуються алгоритми при інших обмеженнях. У відповідності з табл. 2.4 змінюється тільки вираз для оптимальних відхилень та умова виходу з алгоритму.

2.6 Методика вибору стратегії інтервального допускового проектування

Для оцінювання властивостей стратегій допускового проектування можна використовувати значення їх вагових функцій при оптимальних допустимих відхиленнях параметрів. Тоді необхідно порівнювати між собою відповідні показники кожної стратегії, що не дозволяє однозначно вибрати найпривабливішу стратегію. Замість цього можна використовувати узагальнений нормований коефіцієнт стратегій, який визначається як додатак нормованих значень параметрів кожної стратегії [214, 215]:

$$k_i = \prod_{j=1}^m k_{ij}, \quad (2.32)$$

де m – кількість стратегій проектування, що оцінюються;

$i, j \in \{\delta, V, P, P/V\}$;

k_{ij} – нормовані значення параметрів стратегій проектування.

Нормування середнього значення відхилень та об'єму допускової області проводилось відносно максимального значення цих показників у δ - та V -стратегіях:

$$k_{i\delta} = \frac{\delta_{ci}}{\delta_{\delta}}; \quad k_{iV} = \frac{V_i}{V_V},$$

де δ_δ – допустиме відхилення параметрів в δ – стратегії;
 δ_{ci} – середнє значення допустимих відхилень в інших стратегіях;
 V_V – об'єм допускової області у V – стратегії;
 V_i – об'єм допускової області в інших стратегіях.

Нормування цінових показників та показників якості проводилось відносно цих параметрів у P – та P/V – стратегіях:

$$k_{ip} = \frac{P_p}{P_i}; \quad k_{iP/V} = \frac{Q_{P/V}}{Q_i},$$

де P_p – вартість елементів у P – стратегії;
 P_i – вартість елементів в інших стратегіях;
 $Q_{P/V}$ – показник ціна/якість в P/V – стратегії;
 Q_i – показник ціна/якість в інших стратегіях.

Порівняння стратегій проводилось на прикладі фільтра нижніх частот [223], який зображено на рис. 2.5.

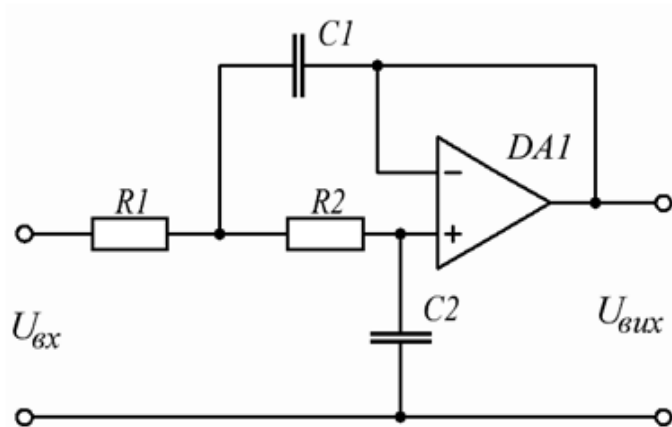


Рисунок 2.5 – Схема фільтра нижніх частот

Частота зрізу фільтра $f_D = 120$ 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 $\varepsilon = 10^{-5}$. Цінові характеристики елементів визначались двома точками у відповідності до табл. 2.5.

Загасання фільтра розраховувалось з допомогою співвідношення

$$a = \left| 1 + b_1 p + b_2 p^2 \right|,$$

де $p = j\omega$ – комплексна частота; $\omega = 2\pi f$; $j = \sqrt{-1}$;

$$b_1 = (R_1 + R_2) C_2; \quad b_2 = R_1 R_2 C_1 C_2.$$

В фільтрі нижніх частот менші допустимі відхилення параметрів елементів формувались при верхнім обмеженні вихідної функції. Результати розрахунків цих відхилень для різних стратегій проектування наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.5 – Цінові характеристики електрорадіоелементів

Елемент	Номинальне значення	Точка визначення			
		1		2	
		P , у.о.	δ , %	P , у.о.	δ , %
R , кОм	1-1000	0.65	0.05	0.14	2
C_1 , мкФ	0,18	1.525	1	0.26	20
C_2 , мкФ	0,068	1.624	1	0.326	20

Дані табл. 2.6 використовувались для розрахунку нормованих параметрів стратегій проектування. Результати розрахунків наведено в табл. 2.7 у вигляді матриці нормованих параметрів стратегій призначення допусків. ця матриця

надає можливість визначити механізми, які використовуються в стратегіях для досягнення оптимальних співвідношень.

Таблиця 2.6 – Допустимі номінальні відхилення параметрів фільтра

Стратегія	Відхилення параметрів δ , %			
	R_1	R_2	C_1	C_2
δ	2.98			
V	5.98	3.64	2.54	1.99
P	1.69	1.11	3.99	3.57
P/V	5.42	3.27	2.74	2.32

Таблиця 2.7 – Нормовані параметри стратегій

Стратегія	Параметри				Коефіцієнт стратегії
	$k_{\delta i}$	$k_{V i}$	$k_{P i}$	$k_{P/V i}$	
δ	1	0.714	0.938	0.749	0,529
V	1.188	1	0.829	0.977	0,962
P	0.870	0.243	1	0.287	0,061
P/V	1.146	0.980	0.866	1	0,972

В δ -стратегії рівні допуски формуються за рахунок зменшення об'єму допускової області майже на 30%. Зменшення допускової області в 4 рази дозволяє зменшити загальну вартість елементів на 17% в порівнянні з V -стратегією. Параметри V - та P/V -стратегії відрізняються незначно.

Оцінювання стратегій проводилось з допомогою узагальнених нормованих коефіцієнтів стратегій. Результати розрахунку цих коефіцієнтів наведено в крайньому правому стовпцю табл. 2.7. З таблиці видно, що найпривабливішою є стратегія ціна/якість, яка має найбільший коефіцієнт стратегії.

2.7 Висновки до розділу 2

1. Запропоновані співвідношення надають можливість розраховувати допустимі відхилення параметрів елементів для різних стратегій допускового проектування: рівних допусків, максимального об'єму допускової області, мінімальної вартості та оптимального співвідношення ціна/якість. Алгоритми, які 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.

2. Для порівняльного аналізу стратегій використовується матриця параметрів, які нормуються відносно їх оптимальних значень у відповідній стратегії. В 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% в порівнянні з P -стратегією при зменшенні об'єму допускової області на 28% в 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.

3. Однозначний вибір стратегії допускового проектування можна проводити з допомогою узагальненого нормованого коефіцієнта стратегій. В 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.

Результати розділу 2 опубліковано у працях:

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. 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).

3. 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.

4. 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.

РОЗДІЛ 3

ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИ НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНІ РОЗПОДІЛУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

3.1 Метод дотичних для синтезу допусків при нормальному законі розподілу параметрів

ВИЗНАЧЕННЯ 3.1. Допуски, що призначаються при нормальному законі розподілу параметрів, мають назву нормальних [213, 214]

При незалежних нормальних законах розподілу параметрів проекція перетину функції розподілу на вісь координат утворює еліпсоїд [67]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{l_i^2} = 1 \quad (3.1)$$

де $l_i = \gamma \sigma_i$ – півосі еліпсоїда або відхилення параметрів при нормальному законі розподілу параметрів;

γ – коефіцієнт поля розсіювання;

σ_i – середнє квадратичний відхил параметрів.

Еліпсоїд обмежує область нормальних допусків. Його розташування в області працездатності показано на рис. 3.1, де m_i – математичне сподівання параметрів елементів; \underline{x}_{bi} та \bar{x}_{bi} – координати нижньої та верхньої межових точок \underline{B} та \bar{B} ; Ω_{tm} та Ω_{tn} – області інтервальних і нормальних допусків; \underline{S}_b та \bar{S}_b – нижня та верхня межові гіперповерхні області працездатності. При обчисленні нормальних допусків використовується теорема дотичного еліпсоїда.

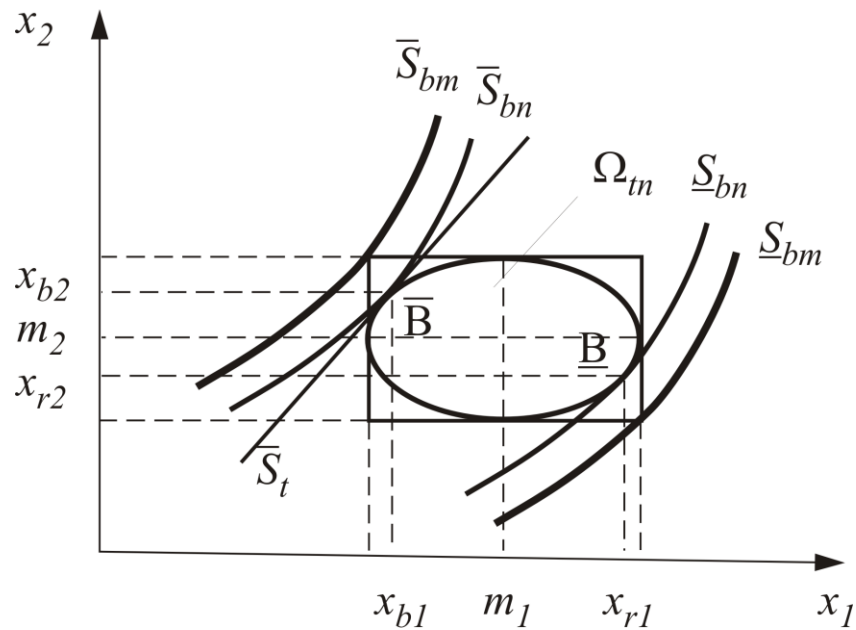


Рисунок 3.1 – Геометричні моделі інтервальних та нормальних допусків

ТЕОРЕМА 3.1 (Дотичного еліпсоїда). [213, 214] Через вершину гіперпаралелепіпеда інтервальних допусків, що розташована на межевій гіперповерхні області працездатності, проводиться єдиний дотичний еліпсоїд з центром в точці математичних сподівань параметрів.

Доказ. Доведення теореми базується на суміщенні дотичних до вихідної функції та еліпсоїду. Рівняння дотичної до еліпсоїду задається співвідношенням:

$$\sum_{i=1}^n \frac{w_{bi}}{l_i^2} w_i = 1. \quad (3.2)$$

Нормоване рівняння дотичної (2.7) має вигляд:

$$\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b} w_i = 1. \quad (3.3)$$

Дотичні (3.2) та (3.3) співпадають, якщо виконується умова:

$$\frac{w_{bi}}{l_i^2} = \frac{a_i}{b}. \quad (3.4)$$

За виразом (3.4) можна отримати єдине значення напівосьових відхилень від математичного сподівання параметрів, що доводить теорему. •

У випадку іншого розташування еліпсоїда афінні перетворення можуть перетворити його до канонічного виду [67]. Це дозволяє отримати аналогічні співвідношення для кореляційного зв'язку між параметрами елементів.

НАСЛІДОК 3.1 (Нормальних відхилень). При незалежних нормальних законах розподілу відхилення параметрів пов'язані з параметрами дотичної гіперплощини співвідношенням:

$$\sum_{i=1}^n a_i^2 l_i^2 = b^2. \quad (3.5)$$

Вираз (3.5) отримується підстановкою співвідношення (3.4) в рівняння дотичної (2.7).

НАСЛІДОК 3.2 (Зв'язки відхилень). Нормальні допуски перераховуються до інтервальних допусків за допомогою виразу:

$$w_{bj} = a_j l_j^2 \left(\sum_{i=1}^n a_i^2 l_i^2 \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.6)$$

Співвідношення для зв'язку нормальних та максимальних відхилень параметрів отримано з виразу (3.4) з урахуванням наслідку 3.1.

Вираз (3.6) може використовуватись для аналізу відхилень вихідної функції при заданих нормальних допусках на параметри елементів. Рівняння (3.5) дозволяє призначати допуски на параметри елементів за заданим відхиленням вихідної функції. Цьому рівнянню відповідає множина розв'язків,

що надає можливість оптимізувати призначення допусків у відповідності з обраним критерієм (ваговими коефіцієнтами). При використанні вагових коефіцієнтів нормальні відхилення параметрів визначаються з допомогою виразів:

$$l_j = b \left(\sum_{i=1}^n a_i^2 k_{lij}^2 \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.7)$$

де $k_{lij} = l_i/l_j$ – ваговий коефіцієнт нормальних відхилень.

ВЛАСТИВІСТЬ 3.1 (Вагових коефіцієнтів). Вагові коефіцієнти нормальних допусків перераховуються до вагових коефіцієнтів інтервальних допусків з допомогою співвідношення:

$$k_{wij} = \frac{a_i}{a_j} k_{lij}^2. \quad (3.8)$$

Властивість вагових коефіцієнтів доводиться підстановкою співвідношень (3.7) та (2.9) у вираз (3.4).

Якщо вихідна функція лінійна, то отримані координати межових точок надають можливість визначити межові значення вихідної функції та її відхилення від номінальних значень. Для нелінійних вихідних функцій коефіцієнти a_i залежать від точки побудови лінійної моделі. Тоді координати точки дотику визначаються з допомогою ітераційного алгоритму:

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

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

$$a_j^{(k+1)} = \frac{\partial y(X)}{\partial x_j} \Big|_{X_b^{(k)}} \cdot \quad (3.9)$$

Алгоритм (3.9) 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. Початкові значення координат точки $X_b^{(0)}$ обираються з допомогою алгоритму побудови інтервальних моделей на етапі внутрішньої інтерполяції [162]. Ітераційний алгоритм завершується при досягненні заданої точності визначення межового 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 проводилась для тестової функції [215]:

$$y(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_2^2}.$$

Оцінка похибки запропонованого метода проводилась порівнянням з точними значеннями відхилю вихідної функції та допусками, які отримані методом моментів.

Точне значення допусків при нормальному законі розподілу може бути знайдено визначенням межових значень вихідної функції при заданій ймовірності попадання в простір області працездатності:

$$P(\underline{y} \leq y \leq \bar{y}) = \int_{\Omega_w} \dots \int f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n, \quad (3.10)$$

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

Для порівняння розрахунків задавалось математичне сподівання вхідних параметрів $m_i = 1$. Підтримувалась точність обчислень $\varepsilon = 0,0001$. Імовірність виходу за межові значення вихідної функції задавалась $P = 0,27\%$ з однаковою імовірністю виходу за верхній та нижній допуски. Вираз для цієї імовірності отримується записом виразу (3.10) для зовнішньої області. Для нижньої межі воно приймає вид:

$$P(y \leq \underline{y}) = \int_{-\infty}^{\underline{y}} \int_{-\infty}^{y x_2^2} f(x_1) f(x_2) dx_1 dx_2, \quad (3.11)$$

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

Рівняння (3.11) розв'язувалось в ітераційному режимі зміною межового 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 образом розраховувалось також точне значення верхньої межі вихідної функції. Результати розрахунків наведено в табл. 3.1.

Як видно з табл. 3.1, метод моментів дає значну похибку при обчисленні допусків вихідної функції також при відхиленнях вхідних параметрів $\delta_j = 5\%$, що рекомендовані як граничні для використання метода моментів [66-68]. При відхиленнях вхідних параметрів $\delta_j = 20\%$ метод моментів дає похибку вище 28%. В цьому випадку метод дотичних забезпечував точність обчислень допусків не гірше 0,204%. 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.

Таблиця 3.1 – Оцінка точності метода дотичних

Відхилення вхідних параметрів	Метод розрахунку допусків					
	Точний		Дотичних		Моментів	
$\delta_1 = \delta_2, \%$	$\underline{\delta}_y, \%$	$\bar{\delta}_y, \%$	$\underline{\delta}_y, \%$	$\bar{\delta}_y, \%$	$\underline{\delta}_y, \%$	$\bar{\delta}_y, \%$
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

3.2 Алгоритм синтезу нормальних допусків за стратегією максимального об'єму при нормальному законі розподілу параметрів

Допускова область при нормальному законі розподілу має форму еліпсоїду. Об'єм еліпсоїдної допускової області визначається з допомогою виразу [213, 214]:

$$V_t = \frac{\pi^{n/2}}{\Gamma(n)} \prod_{i=1}^n \delta_i, \quad (3.12)$$

де $\Gamma(n)$ – гама-функція, для цілих n можна записати $\Gamma(n) = (n-1)!$ [66].

Цільова функція V – стратегії записується у вигляді:

$$\frac{\pi^{n/2}}{(n-1)!} \prod_{i=1}^n |\delta_i| \rightarrow \max. \quad (3.13)$$

Оптимізаційна задача (3.13) розв'язується методом множників Лагранжа. Для цього при обмеженнях вихідної функції знизу створюється додаткова функція:

$$L(\lambda) = \frac{\pi^{n/2}}{(n-1)!} \prod_{i=1}^n |\delta_i| + \lambda \sum_{i=1}^n a_i^2 x_{ri}^2 \delta_i^2. \quad (3.14)$$

Функція (3.14) досягає екстремального значення при виконанні умов:

$$\frac{\pi^{n/2}}{(n-1)!} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |\delta_i| + 2\lambda a_j^2 x_{rj}^2 \delta_j = 0, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (3.15)$$

Умови (3.15) можна записати у вигляді співвідношень:

$$\lambda = -\frac{\pi^{n/2}}{(n-1)!} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |\delta_i| / (2\lambda a_j^2 x_{rj}^2 \delta_j), \quad (j = \overline{1, n}) \quad (3.16)$$

При однакових λ із (3.16) формуються співвідношення

$$a_i x_{ri} \delta_i = a_j x_{rj} \delta_j, \quad (i, j = \overline{1, n}).$$

Підстановка цих співвідношень в рівняння (3.5) дозволяє визначити оптимальне значення відхилень:

$$\underline{\delta}_i = \frac{b}{\sqrt{n a_i} x_{ri}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.17)$$

Аналогічно записуються оптимальні співвідношення при інших обмеженнях вихідної функції. Перелік цих відхилень наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Допустимі відхилення параметрів в V -стратегії при нормальному законі розподілу параметрів

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

Співвідношення табл. 3.2 використовуються в ітераційних алгоритмах для призначення допусків.

НАСЛІДОК 3.3. (Відповідності допусків) При максимальному об'ємі простору допускової області взаємозв'язок нормальних та максимальних допусків встановлюється за допомогою виразу:

$$l_i = \sqrt{n} w_i. \quad (3.18)$$

Співвідношення (3.18) формується підстановкою в (3.17) виразу $b/a_i = n w_i$, який отримано з виразу (2.9).

Призначення допусків для нелінійної вихідної функції проводиться ітераційним алгоритмом з уточненням параметрів дотичних:

Крок 1. $k = 0$. Вибір початкових точок $\bar{X}_b^{(0)}$, $\underline{X}_b^{(0)}$ для побудови дотичних виходячи з симетричних відхилень вихідної функції аналогічно алгоритму (3.9).

Крок 2. Розрахунок коефіцієнтів рівняння дотичної $\bar{a}_j^{(k)}$, $\underline{a}_j^{(k)}$ з допомогою виразу (3.2).

Крок 3. Обчислення значень $w_t^{(k)}$, $\bar{b}^{(k)}$ та $\underline{b}^{(k)}$ з допомогою співвідношення (3.6).

Крок 4. Розрахунок параметрів допускової області з допомогою виразів, наведених в табл. 3.2.

Крок 5. Розрахунок межових точок та межових значень вихідної функції аналогічно алгоритму (3.9).

Крок 6. Перевірка умови виходу

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i^{(k)} - \delta_i^{(k-1)}}{\delta_i^{(k)}} \right)^2} \leq \varepsilon.$$

Якщо умова не виконується – $k = k + 1$ та перехід до кроку 2. Інакше – кінець роботи.

Наведений алгоритм надає можливість призначати допуски на параметри елементів при нормальному законі розподілу параметрів з урахуванням двобічних обмежень на вихідну функцію. При цьому реалізуються максимальні відхилення параметрів елементів.

Використання запропонованих методів показано на прикладі обчислення допусків на елементи смугового фільтру (рис. 3.2). Забезпечувалась задана ширина відхилень добротності [224]:

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

Фільтр мав номінальне значення добротності $Q_r = 10$ при нормованих номінальних значеннях параметрів $R_{r1} = 0,2$, $R_{r2} = 1$, $R_{r3} = 5$, $C_{r1} = 0,2$, $C_{r2} = 1$.

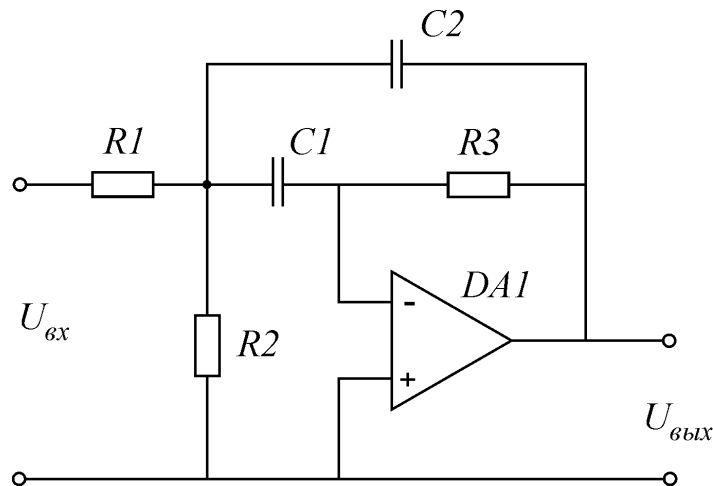


Рисунок 3.2 – Схема смугового фільтра

Результати призначення допусків на параметри елементів фільтра при загальній ширині відхилень добротності $w_Q = 20\%$ та максимальному об'єму допускової області наведено в табл. 3.3.

Відхилення параметрів елементів, що наведено в табл. 3.3, призводять до інтервалу допусків на добротність $\delta_Q = [-9,04; 11,04]\%$. Відношення отриманих інтервальних та нормальних допусків відповідає виразу (3.18).

Таким чином, в 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.

Таблиця 3.3 – 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

На основі цього сформовані співвідношення, які надають можливість проводити аналіз та синтез допусків. Встановлено зв'язок між ваговими коефіцієнтами, що використовується при призначенні інтервальних та нормальних допусків. Показано, що умови призначення допусків при максимальному об'ємі допускової області однакові для інтервальних та нормальних допусків. При врахуванні нелінійних властивостей вихідних функцій використовуються ітераційні алгоритми.

Дослідження точності метода дотичних показало, що, у порівнянні з методом моментів, при його використанні точність розрахунку нормальних допусків зростає більш ніж на два порядки. Точність обчислень зростає при зростанні нелінійності вихідних функцій.

3.3 Алгоритми синтезу нормальних допусків за ціновими стратегіями призначення нормальних допусків

Цільова функція для P -стратегії для оптимізації нормальних допусків [225, 226] аналогічна оптимізації інтервальних допусків та записується у вигляді (2.24).

З урахуванням еліпсоїдної допускової області, яка формується при нормальному законі розподілу, співвідношення (2.13) перезаписується у вигляді [225]:

$$\sum_{i=1}^n \underline{a}_i^2 \underline{l}_i^2 = \underline{b}^2; \quad \sum_{i=1}^n \bar{a}_i^2 \bar{l}_i^2 = \bar{b}^2, \quad (3.19)$$

де \underline{l}_i та \bar{l}_i – півосі еліпсоїда, що визначають поле розсіяння та допустимі відхилення параметрів при нижньому та верхньому відхиленнях вихідної функції.

Оптимізація цінових показників проводилась методом множників Лагранжа, для чого формувались допоміжні функції. Якщо вихідна функція обмежена знизу, то допоміжна функція записується у вигляді:

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^n p_{0i} \delta_i^{p_{1i}} + \lambda \sum_{i=1}^n \underline{a}_i^2 x_{ri}^2 \underline{\delta}_i^2, \quad (3.20)$$

де λ – множник Лагранжа.

Функція (3.20) досягає екстремального значення при виконанні умов

$$p_{1i} P_i + 2\lambda x_{ri}^2 \underline{a}_i^2 \underline{\delta}_i^2 = 0, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.21)$$

Рівняння (3.19) та (3.21) утворюють систему рівнянь, розв'язком якої є оптимальне значення відхилень параметрів в P -стратегії при обмеженнях вихідної функції знизу:

$$\underline{\delta}_i = \sqrt{\frac{\underline{b}^2}{x_{ri}^2 a_i^2} \cdot \frac{p_{1i} P_i}{\sum_{i=1}^n p_{1i} P_i}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.22)$$

При обмеженнях вихідної функції зверху аналогічна процедура призводить до допустимих відхилень параметрів:

$$\overline{\delta}_i = \sqrt{\frac{\overline{b}^2}{x_{ri}^2 a_i^2} \cdot \frac{p_{1i} P_i}{\sum_{i=1}^n p_{1i} P_i}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.23)$$

Допустимі відхилення, які обчислені з допомогою співвідношень (3.22) та (3.23) формують допускові області різного об'єму. Приклад формування допускових областей при двобічних обмеженнях вихідної функції показано на рис. 3.3, де Ω_w – область працездатності; $\underline{\Omega}_t$ та $\overline{\Omega}_t$ – допускові області, що формуються при нижніх та верхніх обмеженнях вихідної функції.

На рис. 3.3 область $\overline{\Omega}_t$ виходить за межі області працездатності. Тому допустимі відхилення обираються за областю $\underline{\Omega}_t$, що призводить до неповного використання області працездатності. Злиття областей $\underline{\Omega}_t$ та $\overline{\Omega}_t$ відбувається, якщо задається ширина інтервалу відхилення вихідної функції.

Тоді область працездатності задається співвідношенням:

$$\sum_{i=1}^n (\overline{a}_i \overline{w}_i - \underline{a}_i \underline{w}_i) = b_w, \quad (3.24)$$

де $b_w = \overline{b} - \underline{b}$.

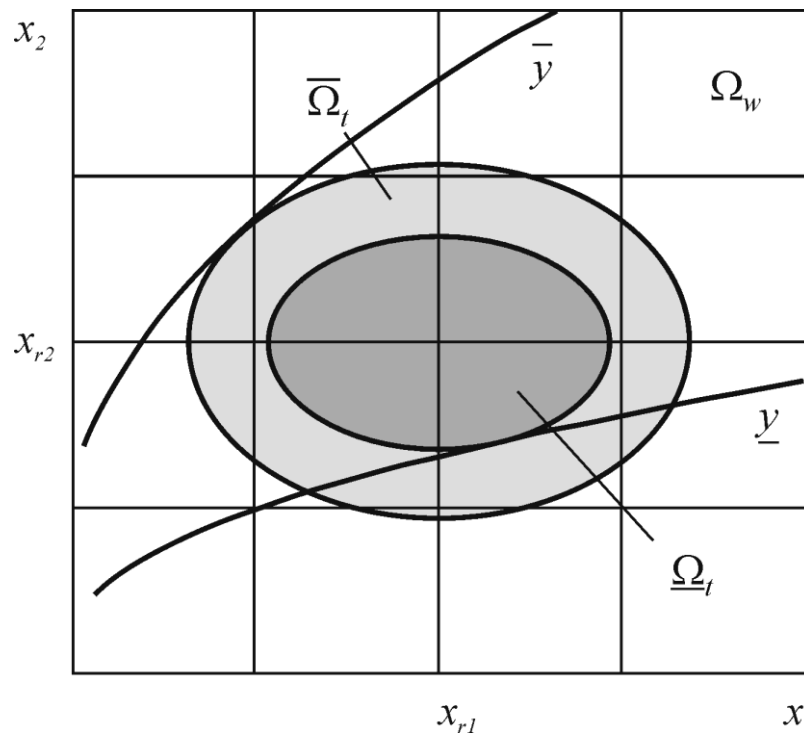


Рисунок 3.3 – Формування допусків областей при двобічних обмеженнях вихідної функції

З урахуванням еліпсоїдної допусквої області співвідношення (3.24) приймає вид:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{-2}{\bar{b}} \frac{a_i}{\bar{b}} - \frac{a_i^2}{\bar{b}} \right) l_i^2 = b_w. \quad (3.25)$$

Використання цільової функції (3.20) та співвідношення (3.25) при оптимізації методом множників Лагранжа призводить до допустимих відхилень:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{b_w}{x_{ri}^2 \left(\frac{-2}{\bar{b}} \frac{a_i}{\bar{b}} - \frac{a_i^2}{\bar{b}} \right)} \cdot \frac{p_{1i} P_i}{\sum_{i=1}^n p_{1i} P_i}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.26)$$

Формування допускової області при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції показано на рис. 3.4, з якого видно, що допускова область Ω_t дотикається до двох меж області працездатності. Таким чином, досягається повне використання області працездатності. Але відхилення вихідної функції в цьому випадку можуть виявитись несиметричними.

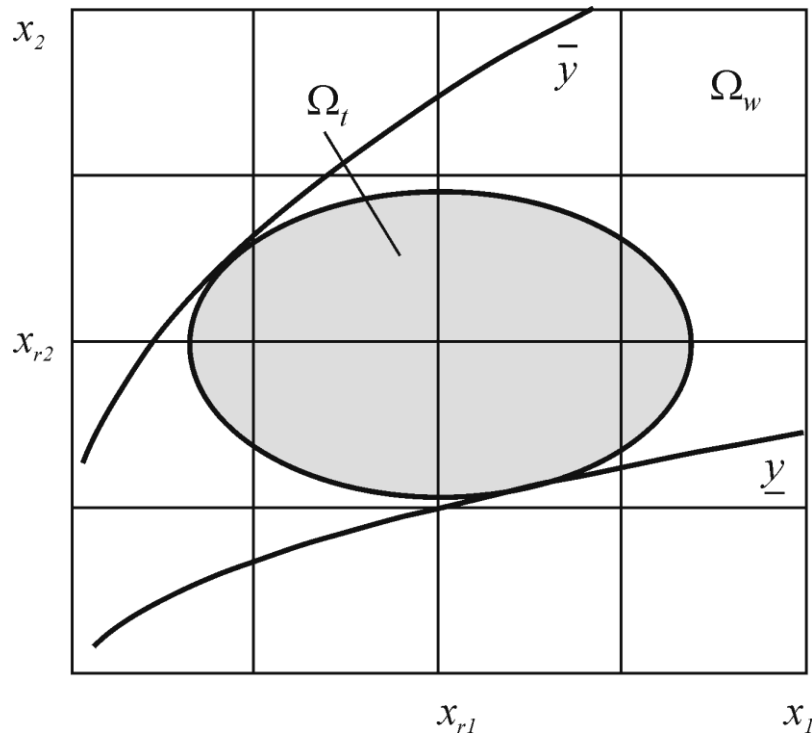


Рисунок 3.4 – Формування допускової області при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції.

Вирази (3.22), (3.23) та (3.26) застосовуються в ітераційних алгоритмах, в яких для визначення ціни електрорадіоелементів використовуються відхилення параметрів на попередній ітерації. Це дозволяє в процедурі призначення допусків відмовитись від усередненої цінової характеристики та використовувати цінові характеристики кожного електрорадіоелемента.

В стратегії ціна/якість використовується цільова функція (2.28). Об'єм еліпсоїдної допускової області визначається виразом [67]:

$$V_t = \frac{\pi^{n/2}}{\Gamma(n)} \prod_{i=1}^n \delta_i, \quad (3.27)$$

де $\Gamma(n)$ – гама-функція.

Використання виразів (2.28), (3.27) ускладнює отримання оптимізаційних співвідношень. Тому при оптимізації допустимих відхилень параметрів використовується модель вагової функції [225, 226]:

$$G = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i \delta_i^{p_{1i}-1}, \quad (3.28)$$

де g_0 та g_i – коефіцієнти моделі вагової функції.

Коефіцієнти g_i визначаються з умов паралельності дотичних гіперплощин до гіперповерхонь (3.27) та (3.28):

$$g_i (p_{1i} - 1) \delta_i^{p_{1i}-2} = c_i, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (3.29)$$

де $c_i = \left. \frac{\partial G}{\partial \delta_i} \right|_{\delta_b};$

$\delta_b = \{\delta_{b1}, \dots, \delta_{bn}\}$ – множина відносних відхилень параметрів, при яких визначається цільова функція.

Тоді коефіцієнти g_i визначаються з допомогою співвідношень:

$$g_i = \frac{c_i}{p_{1i} - 1} \delta_i^{2-p_{1i}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.30)$$

При оптимізації методом множників Лагранжа з обмеженням вихідної функції знизу створюється допоміжна функція:

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^n g_i \delta_i^{p_{1i}-1} + \lambda \sum_{i=1}^n \underline{a}_i^2 x_{ri}^2 \delta_i^2, \quad (3.31)$$

Оптимальним значенням допустимих відхилень відповідають умови

$$(p_{1i} - 1)g_i \delta_i^{p_{1i}-2} + 2\lambda \underline{a}_i^2 x_{ri}^2 \delta_i = 0, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.32)$$

Рівняння (3.19) та (3.32) утворюють систему рівнянь, розв'язком якої є оптимальне значення відхилень параметрів в P/V -стратегії при обмеженнях вихідної функції знизу:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\underline{b}^2}{x_{ri}^2 \underline{a}_i^2} \cdot \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}}, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (3.33)$$

де $h_i = (p_{1i} - 1)g_i P_i / (p_{0i} \delta_i)$.

При обмеженнях вихідної функції зверху аналогічна процедура призводить до допустимих відхилень параметрів:

$$\bar{\delta}_i = \sqrt{\frac{\bar{b}^2}{x_{ri}^2 \bar{a}_i^2} \cdot \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.34)$$

У випадку, якщо задається ширина інтервалу зміни вихідної функції, допустимі відхилення параметрів елементів в P/V -стратегії визначаються з допомогою виразів:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{b_w}{x_{ri}^2 \left(\frac{-2}{a_i} - \frac{a_i^2}{b} \right)} \cdot \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.35)$$

Вирази (3.33) – (3.35) застосовуються в ітераційних алгоритмах, в яких використовуються відхилення параметрів на попередній ітерації. Це надає можливість в процедурі призначення допусків за стратегією ціна/якість відмовитись від усередненої цінової характеристики, використовувати цінові характеристики кожного електрорадіоелемента та покращити збіжність ітераційного процесу.

Алгоритм призначення допусків при обмеженнях вихідної функції знизу записується у вигляді:

Крок 1. Обираються початкові наближення відхилень параметрів елементів. Рекомендується призначити початкові відхилення параметрів з допомогою співвідношення:

$$\underline{\delta}_i = \frac{\underline{\delta}_y}{n}; \quad (i = \overline{1, n}),$$

де $\underline{\delta}_y = (y - y_r) / y_r$; y_r – номінальне значення вихідної функції.

Крок 2. Формуються моделі цінових характеристик та визначаються ціни електрорадіоелементів при обчислених відхиленнях параметрів. Використовується апроксимація ступеневою функцією (2.29).

Крок 3. Формується модель цільової функції. Використовуються співвідношення (3.30).

Крок 4. Призначаються оптимальні значення відносних відхилень параметрів. Використовується співвідношення (3.33), в якому величини h_i визначаються з допомогою співвідношень:

$$h_i^{(k)} = (p_{li}^{(k)} - 1)g_i^{(k)}P_i^{(k)} / (p_{0i}^{(k)} \delta_i^{(k-1)}); \quad (i = \overline{1, n}),$$

де k – номер ітерації.

Крок 5. Перевіряється умова завершення алгоритму. Використовується співвідношення:

$$\left| \frac{y^{(k)} - y}{y} \right| \leq \varepsilon, \quad (3.36)$$

де ε – точність обчислень.

Якщо умова (3.36) не виконується, то відбувається перехід до кроку 2. Інакше – кінець алгоритму.

Аналогічно описуються алгоритми для призначення допусків в стратегії ціна/якість при обмеженнях вихідної функції зверху та заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції. Тільки співвідношення (3.33) замінюється співвідношеннями (3.34) або (3.35). Відповідним образом формується і умова завершення алгоритму (3.36).

3.4 Дослідження параметрів стратегій допускового проектування при нормальному законі розподілу

Порівняння параметрів допускового проектування при нормальному законі розподілу проводилось для стратегій максимального об'єму допускової області, рівних допусків, мінімальної вартості та оптимального співвідношення ціна/якість [225, 226]. Використовуються усереднені показники, які приведені до одного елементу:

– середнє допустиме відхилення:

$$\delta_m = \sqrt[n]{V_t};$$

– середня вартість елемента:

$$P_m = P/n;$$

– середня питома вартість допустимого відхилення:

$$P_\delta = P_m/\delta_m.$$

Порівняння проводилось на прикладі фільтра нижніх частот [181], який наведено на рис. 3.5.

Частота зрізу фільтра $f_D = 120$ Гц забезпечувалась номінальними параметрами елементів $R_1 = 5,56$ кОм; $R_2 = 16,4$ кОм; $C_1 = 0,15$ мкФ; $C_2 = 0,033$ мкФ; $C_3 = 0,068$ мкФ. Задавалось загасання $a = 1 \pm 1\%$ в смузі частот 0 до 50 Гц. Підтримувалась точність обчислень $\varepsilon = 0,0001$. Цінові характеристики елементів визначались двома точками у відповідності до табл. 3.4.

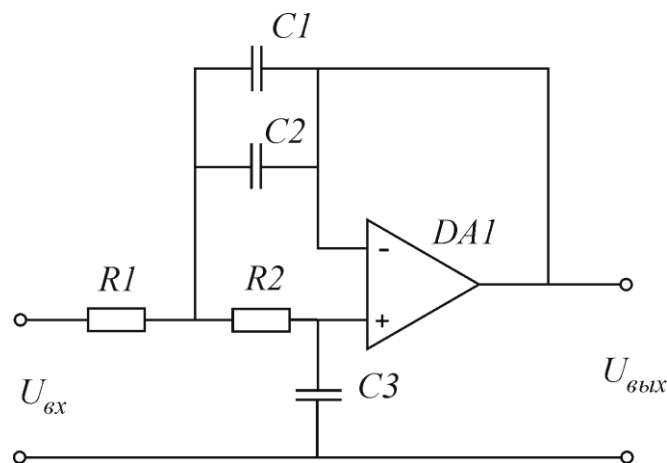


Рисунок 3.5 – Схема фільтра нижніх частот

Загасання фільтра обчислювалось за допомогою співвідношення

$$a = |1 + b_1 p + b_2 p^2|,$$

де $p = j\omega$ – комплексна частота;

$$\omega = 2\pi f; \quad j = \sqrt{-1};$$

$$b_1 = (R_1 + R_2)C_3; \quad b_2 = R_1 R_2 (C_1 + C_2) C_3.$$

Таблиця 3.4 – Цінові характеристики електрорадіоелементів

Елемент	1		2	
	P , у.о.	δ , %	P , у.о.	δ , %
R	4	0,005	1	5
C	60	1	20	20

Розраховані для двох меж на частоті 50 Гц допустимі відхилення параметрів елементів в P -стратегії наведено в табл. 3.5. Результати обчислень показують, що обмеження загасання зверху призводять до більш жорстких вимог на допустимі відхилення. На більш низьких частотах відхилення загасання не виходять за межі інтервалу $a = [0,99; 1,01]$.

Подібна ситуація виникає і при інших стратегіях призначення допусків. Результати обчислень допусків при верхній межі загасання для різних стратегій наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.5 – Допустимі відхилення параметрів в *P*-стратегії

Межа загасання	Відхилення параметрів δ , %				
	R_1	R_2	C_1	C_2	C_3
нижня	3,77	4,06	10,49	36,20	8,46
верхня	1,93	1,22	4,15	14,31	2,91

Таблиця 3.6 – Допустимі відхилення параметрів в різних стратегіях

Стратегія	Відхилення параметрів δ , %				
	R_1	R_2	C_1	C_2	C_3
δ	3,33				
<i>V</i>	6,06	3,58	3,19	14,48	2,03
<i>P</i>	1,93	1,22	4,15	14,31	2,91
<i>P/V</i>	5,83	3,43	3,29	14,39	2,13

Ці результати свідчать про близькість допустимих відхилень параметрів елементів в *V*- та *P/V*-стратегіях. *P*-стратегія представлена набором, в якій входять найменші та найбільші допустимі відхилення. Звичайно великі відхилення призначаються для елементів з більшою вартістю.

Відомості про параметри розглянутих стратегій допускового проектування наведені в табл. 3.7. Аналіз табл. 3.7 показує, що *P*-стратегія у порівнянні з *V*-стратегією дозволяє зменшити вартість елементів майже на

10 %. Середнє відхилення параметрів елементів при цьому зменшується на 27,6 %. Якщо цю оцінку перевести в об'єм допускової області, то перехід від V - до P -стратегії призводить до зменшення об'єму допускової області майже в 5 раз. Це в результаті призводить до збільшення питомої вартості відхилень на 24,4 %.

Таблиця 3.7 – Основні параметри стратегій призначення допусків

Стратегії	Параметри		
	δ_m , %	P_m , у.о.	P_δ , у.о / %
δ	3,12	28,75	9,21
V	4,31	26,61	6,18
P	3,12	24,02	7,69
P/V	4,30	26,21	6,09

Найгіршими показниками характеризується δ -стратегія, в якій зменшення об'єму допускової області також відбувається в 5 раз, а вартість елементів досягає найбільшого значення. Це призводить до збільшення питомої вартості відхилень майже на 50 %.

Відміна V - та P/V -стратегій за основними показниками незначна. Об'єм допускової області P/V -стратегії зменшується тільки на 0,74 %, що практично не призводить до відміни середніх відхилень. Питома вартість відхилень в P/V -стратегії зменшується на 2,4 %.

Наведені оцінки змінюються при зміні цінових характеристик та для інших видів пристроїв. Досвід застосування запропонованих алгоритмів

показує можливість зменшення цінових показників в *P*-стратегії на 15-20 %, що є суттєвим в умовах серійного виробництва.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Удосконалено метод дотичних для призначення нормальних допусків, в якому дотичні до межі області працездатності та допускової області співпадають, а допускова область формується як описаний біля області розсіяння еліпс, та надає можливість значно підвищити точність призначення допусків при нормальному законі розподілу.

2. Розроблено алгоритми призначення допусків за ціновими характеристиками. В оптимізаційних співвідношеннях запропонованих алгоритмів використовуються реальні цінові характеристики та значення допустимих відхилень на попередніх ітераціях. Це надало можливість відмовитись від усереднених цінових характеристик та покращило збіжність ітераційного процесу.

3. Порівняння стратегій показало, що найгірші параметри має стратегія рівних допусків, яка призводить до найменших відхилень параметрів та об'єму допускової області, найбільшій середній вартості елементів та найбільшій питомій вартості відхилень. Стратегія мінімальної вартості за середнім відхиленням параметрів близька до δ -стратегії, але надає можливість зменшити вартість елементів на 5-20% у порівнянні зі стратегією максимального об'єму допускової області. Найменшими значеннями питомої вартості відхилень крім стратегії ціна/якість характеризуються також *V*- та *P/V*-стратегії. Ці стратегії майже не відрізняються за середнім допустимим відхиленням, об'єму допускової області, показнику ціна/якість та середній вартості елементів.

Результати розділу 3 опубліковано у працях:

1. Шило Г.Н. Назначения нормальных допусков с учетом ценовых характеристик электрорадиоэлементов // Радиотехника (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).
2. 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).
3. Shilo G. Geometric methods of assigning tolerances // Proc. of the Third IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2005). Sofia (Bulgaria), 2005. P. 513-515.
4. 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.
5. 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.

РОЗДІЛ 4

СТАТИСТИЧНО-ОРІЄНТОВАНЕ ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ

4.1 Математичні моделі законів розподілу параметрів, заданих статистичними рядами.

Величина допусків суттєво залежить від законів розподілу значень параметрів елементів [212, 213, 227-229], які визначаються особливостями процесів виготовлення складових частин різних пристроїв. В загальному випадку такі розподіли отримують шляхом експериментальних досліджень, а результати представляють у вигляді статистичних рядів або гістограм [67, 87].

Статистичний ряд звичайно представлено у вигляді таблиці, в якій надаються інтервальні аргументи (розряди) в порядку їх зростання та відповідні їм частоти попадання значень параметрів елементів в задані інтервали [67]. Об'єднання всіх інтервальних аргументів утворюють діапазон (інтервал) спостережуваних значень параметрів елементів.

ВИЗНАЧЕННЯ 4.1. Нижньою (верхньою) ділянкою статистичного ряду називається сукупність деякої кількості перших (останніх) членів статистичного ряду [227, 228].

Для формування областей розсіяння використовуються математичні моделі у вигляді аналітичних виразів густини розподілу значень параметрів. Такі моделі звичайно створюються процедурою вирівнювання гістограм розподілу. Перехід від статистичних рядів до гістограм здійснюється діленням частот на ширину відповідного інтервального аргументу.

ВИЗНАЧЕННЯ 4.2. Область розсіяння значень параметрів – це проекція перетину поверхні розподілу в простір значень параметрів елементів при заданій ймовірності розташування значень параметра за межами цієї проекції.

При створенні математичних моделей також використано припущення 1.

ПРИПУЩЕННЯ 4.1. Закони розподілу значень параметрів елементів є модальними.

Із припущення 4.1 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 межових ділянок статистичного ряду. Тоді при формуванні моделі можуть використовуватись закони розподілу з густиною, що спадає до меж статистичного ряду. Найкращою є модель розподілу виду [227, 228]:

$$f(x) = F \cdot \exp\left[-\frac{(x-t)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.1)$$

де $f(x)$ – густина розподілу значень параметра елемента;

x – параметр елемента;

F – нормувальний множник;

t – координати центра симетрії кривої (4.1);

σ – параметр, який характеризує розсіяння випадкової величини відносно центра симетрії.

Модель (4.1) нагадує нормальний закон, але при її створенні не враховується основна умова вирівнювання закону розподілу:

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

Тому модель (4.1) можуть застосовувати лише на окремих ділянках статистичних рядів. Для використання співвідношення (4.1) інтервальні аргументи статистичного ряду замінюються середніми значеннями цих інтервалів. Тоді коефіцієнти моделі (4.1) визначаються за трьома точкам

гістограми, які задані середніми значеннями інтервальних аргументів статистичного ряду та відповідними їм величинами густини розподілу значень параметрів елементів. Для визначення параметрів моделі на нижній ділянці статистичного ряду використовується система рівнянь:

$$f_j = F_l \exp \left[-\frac{(x_j - m_l)^2}{2\sigma_l^2} \right], \quad (j = \overline{1,3}), \quad (4.2)$$

де x_j – середнє значення інтервального аргументу j -го члена статистичного ряду;

$f_j = f(x_j)$ – значення густини розподілу для значення x_j ;

F_l, m_l, σ_l – параметри моделі нижньої ділянки статистичного ряду.

При розв'язку системи (4.2) враховується припущення 1, яке записується у вигляді:

$$f_1 < f_2.$$

Тоді параметри моделі можуть визначатися за допомогою співвідношень:

$$m_l = \frac{1}{2} \frac{(x_2^2 - x_3^2) \ln(f_1/f_2) - (x_1^2 - x_2^2) \ln(f_2/f_3)}{(x_2 - x_3) \ln(f_1/f_2) - (x_1 - x_2) \ln(f_2/f_3)}; \quad (4.3)$$

$$\sigma_l^2 = \frac{1}{2} \frac{(x_2 - m_l)^2 - (x_3 - m_l)^2}{\ln(f_2/f_3)}; \quad (4.4)$$

$$F_l = f_3 \exp \left[\frac{(x_3 - m_l)^2}{2\sigma_l^2} \right]. \quad (4.5)$$

Аналогічно визначаються параметри моделі для верхньої ділянки статистичного ряду.

Приклад формування моделей густини розподілу на межових ділянках статистичного ряду показано на рис. 4.1, де наводиться гістограма розподілу значень параметрів елементів і криві 1 та 2, що моделюють відповідно нижню та верхню ділянки розподілу.

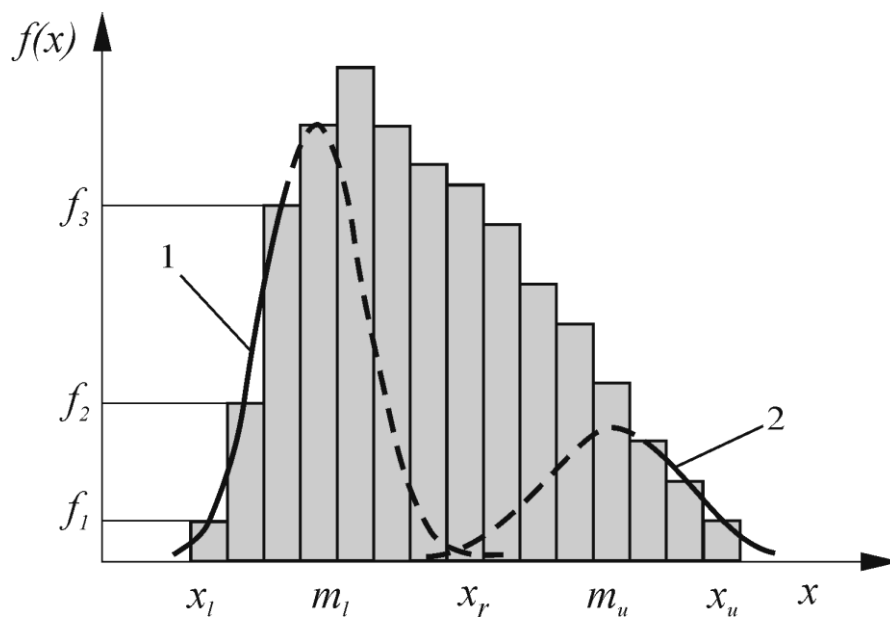


Рисунок 4.1 – Формування моделей граничних ділянок розподілу

На рис. 4.1 номінальне значення параметра елемента визначається як його середнє значення:

$$x_r = \frac{x_l + x_u}{2}, \quad (4.6)$$

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 межові відхилення:

$$h_l = x_l - x_r; \quad h_u = x_u - x_r, \quad (4.7)$$

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

Із співвідношень (4.6) та (4.7) випливає, що нижнє та верхнє межові відхилення зв'язані співвідношенням:

$$h_l = -h_u, \quad (4.8)$$

Оцінювання поля розсіяння граничних моделей проводиться за допомогою відхилень:

$$l_l = x_l - m_l; \quad l_u = x_u - m_u, \quad (4.9)$$

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:

$$l = \gamma\sigma, \quad (4.10)$$

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 межових точках статистичного ряду у відповідності до виразів (4.9) та (4.10) густина розподілу значень параметра приймає вид:

$$f(x_b) = F \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right), \quad (4.11)$$

де x_b – значення параметра в межовій точці.

Оцінювання форми закону розподілу може проводитися з допомогою коефіцієнтів нормалізації.

ВИЗНАЧЕННЯ 3. Коефіцієнтом нормалізації розподілу називається співвідношення поля розсіяння граничної моделі та граничного відхилення значення параметра статистичного ряду [227, 228]:

$$\xi = \frac{l}{h}, \quad (4.12)$$

де ξ – коефіцієнт нормалізації розподілу.

Коефіцієнт (4.12) 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.

4.2 Метод згладжених вершин для аналізу та синтезу допусків на параметри елементів, закон розподілу яких задано статистичними рядами

При незалежних законах розподілу значень параметрів елементів густина багатовимірного розподілу приймає вигляд:

$$f(X) = \left(\prod_{i=1}^n F_i \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_i)^2}{\sigma_i^2} \right], \quad (4.13)$$

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 (4.11) на межі області розсіяння густина розподілу (4.13) приймає значення:

$$f(X_b) = \left(\prod_{i=1}^n F_i \right) \exp \left(-\frac{\gamma^2}{2} \right), \quad (4.14)$$

де $X_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – множина координат межевої точки області розсіяння;

x_{bi} – координата межевої точки області розсіяння.

Із співвідношень (4.13) та (4.14) випливає еліпсоїдне рівняння для меж області розсіяння:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_i)^2}{l_i^2} = 1. \quad (4.15)$$

Співвідношення (4.15) може використовуватись 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 межових значень вихідної функції. Приклад конфігурацій області розсіяння для вихідної функції $y = x_1 / x_2^2$ показано на рис. 4.2, де 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;

\underline{y}_i , \underline{y}_n , \underline{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} — межові 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} .

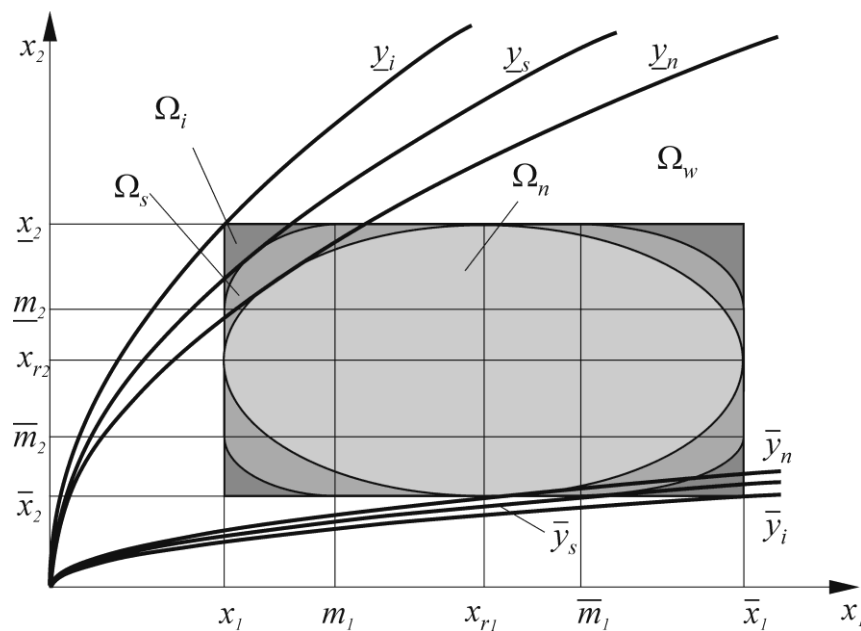


Рисунок 4.2 – Формування областей розсіяння

Межові значення параметрів елементів визначається з допомогою співвідношень:

$$\underline{x}_i = x_{li}; \quad \bar{x}_i = x_{ui}, \quad (y(X_{li}) < y(X_r)); \quad (4.16)$$

$$\underline{x}_i = x_{ui}; \quad \bar{x}_i = x_{li}, \quad (y(X_{li}) > y(X_r)), \quad (4.17)$$

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 (4.16) та (4.17) визначають межі допускової області та граничні відхилення значень параметрів елементів:

$$\underline{h}_i = \underline{x}_i - x_{ri}; \quad \bar{h}_i = \bar{x}_i - x_{ri}, \quad (4.18)$$

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

Співвідношення (4.8) тоді приймає вид:

$$\underline{h}_i = -\bar{h}_i. \quad (4.19)$$

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

$$\underline{y}_i = y(\underline{X}); \quad \bar{y}_i = y(\bar{X}), \quad (4.20)$$

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 \overline{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 (4.20) використовується метод дотичних [212-215]. 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 межових значень інтервалу зміни вихідної функції:

$$\underline{\xi}_i = \xi_{li}; \quad \overline{\xi}_i = \xi_{ui}, \quad (h_i < 0), \quad (4.21)$$

$$\underline{\xi}_i = \xi_{ui}; \quad \overline{\xi}_i = \xi_{li}, \quad (h_i > 0), \quad (4.22)$$

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

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

$$\underline{l}_i = \underline{\xi}_i h_i; \quad \overline{l}_i = \overline{\xi}_i h_i; \quad (4.23)$$

$$\underline{m}_i = \underline{x}_i - \underline{l}_i; \quad \overline{m}_i = \overline{x}_i - \overline{l}_i; \quad (4.24)$$

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

Використання виразів (4.21) – (4.24) в процедурах аналізу та призначення допусків призводить до відхилень, які, як впливає з рис. 4.2, можуть суттєво відрізнитись від інтервальних та нормальних допусків. Тому для таких допусків вводиться визначення статистично-орієнтовані допуски [227-230].

ВИЗНАЧЕННЯ 4.4. Статистично-орієнтованими допусками називаються допуски, які визначаються за статистичними рядами розподілу значень параметрів елементів.

Таким чином, запропоновано метод формування моделей областей розсіяння параметрів елементів та моделей меж допускових областей. Використання апроксимації межових ділянок статистичних рядів функціями, які подібні нормальному закону розподілу в цих моделях, надало можливість створювати області розсіяння з вершинами, згладженими з допомогою еліпсоїдних поверхонь – брусоеліпсоїдні області розсіяння. Такі моделі можна застосовувати в проектних процедурах аналізу та синтезу допустимих відхилень значень параметрів при різних стратегіях оптимізації, якщо закон розподілу надано у вигляді статистичних рядів.

4.3 Алгоритми призначення статистично-орієнтованих допусків.

В задачах аналізу допусків визначаються відхилення вихідних функцій в точках дотику меж області працездатності та області розсіяння. Для визначення координат цих точок необхідно провести ототожнення дотичних гіперплощин до меж області працездатності та вершинних еліпсоїдів [227, 228].

Рівняння дотичної гіперплощини до меж області працездатності записується у вигляді:

$$y_b = a_{b0} + \sum_{i=1}^n a_{bi}x_i, \quad (4.25)$$

де y_b – значення вихідної функції в точці дотику межі області працездатності та області розсіяння;

$a_{bi} = \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X_b}$ – лінійні коефіцієнти розкладання вихідної функції в ряд

Тейлора;

$X_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – множина координат точки дотику меж області працездатності та області розсіяння;

$$a_{b0} = y_b - \sum_{i=1}^n a_{bi} x_{bi}.$$

Рівняння дотичної (4.25) можна записати у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n a_{bi} w_i = b_b, \quad (4.26)$$

де $w_i = x_i - m_{bi}$ – відхилення координат дотичної гіперплощини (4.26) від центра симетрії межового еліпсоїда;

m_{bi} – координата центра симетрії межового еліпсоїда;

$$b_b = y_b - a_{b0} - \sum_{i=1}^n a_{bi} m_{bi}.$$

Рівняння дотичної гіперплощини до межового еліпсоїду області розсіяння записується у вигляді співвідношення:

$$\sum_{i=1}^n \frac{w_{bi} w_i}{l_{bi}^2} = 1, \quad (4.27)$$

де $w_{bi} = x_{bi} - m_{bi}$ – відхилення межової точки еліпсоїда від його центра симетрії;

l_{bi} – ширина поля розсіювання граничної моделі статистичного ряду.

Дотичні гіперплощини (4.26) та (4.27) тотожні, якщо виконуються умови:

$$\frac{a_{bi}}{b_{bi}} = \frac{w_{bi}}{l_{bi}^2}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (4.28)$$

Відхилення межевої точки визначаються з системи рівнянь (4.28), якщо відомі значення параметрів моделі (4.25). У зв'язку з нелінійністю вихідної функції обчислення цих параметрів проводиться в ітераційному режимі з допомогою алгоритму [227, 228]:

$$\begin{aligned} a_{bi}^{(k)} &= \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X_b^{(k-1)}}; & a_{b0}^{(k)} &= y_b^{(k-1)} - \sum_{i=1}^n a_{bi}^{(k)} x_{bi}^{(k-1)}; \\ b_b^{(k)} &= y_b^{(k-1)} - a_{b0}^{(k)} - \sum_{i=1}^n a_{bi}^{(k)} m_{bi}; & w_{bi}^{(k)} &= \frac{a_{bi}^{(k)}}{b_b^{(k)}} l_{bi}^2; \\ x_{bi}^{(k)} &= m_{bi} + w_{bi}^{(k)}; & y_b^{(k)} &= y(X_b^{(k)}). \end{aligned} \quad (4.29)$$

Початкові координати точки дотику та параметри межових еліпсоїдних поверхонь обираються з допомогою співвідношень (4.16) – (4.24). Алгоритм (4.29) завершується при досягненні заданої точності визначення граничного значення вихідної функції:

$$\left| \frac{y_b^{(k)} - y_b^{(k-1)}}{y_b^{(k)}} \right| \leq \varepsilon, \quad (4.30)$$

де ε – задане значення точності обчислення граничного значення вихідної функції.

В задачах призначення допусків проводиться оптимізація цільової функції при заданих законах розподілу значень параметрів елементів, інтервали зміни вихідної функції та номінальних значеннях параметрів елементів. Законом розподілу значень параметрів, заданих статистичними рядами, відповідає оптимізаційна задача [230]:

$G(\mathbf{H}) \rightarrow \text{optimum} ;$

$$\begin{aligned} f(x_{ij}) &\in \{f_{i1}, \dots, f_{ik}\}, & (i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}); \\ y &\in \mathbf{y}; \\ X &= X_r, & (h_i = 0), \end{aligned} \quad (4.31)$$

де $G(\mathbf{H})$ – цільова функція;

$\mathbf{H} = \{\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_n\}$ – множина інтервалів допустимих відхилень значень параметрів;

$\mathbf{h}_i = [h_i; \bar{h}_i]$ – інтервал зміни допустимих відхилень значень параметрів;

$f_{ij} = f(x_{ij})$ – значення густини j -го члена статистичного ряду i -го параметра;

k – кількість членів статистичного ряду;

$\mathbf{y} = [y; \bar{y}]$ – інтервал зміни вихідної функції.

Задача (4.31) розв'язується встановленням зв'язків між параметрами дотичних гіперплощин до меж області працездатності та області розсіяння з параметрами законів розподілу та цільової функції. Зв'язок між параметрами дотичних гіперплощин встановлюється підстановкою співвідношень (4.28) в рівняння дотичної до гіперплощини (4.26):

$$\sum_{i=1}^n a_{bi}^2 l_{bi}^2 = b_b^2, \quad (4.32)$$

Особливості закону розподілу значень параметрів елементів враховуються підстановкою в рівняння (4.32) співвідношень (4.23):

$$\sum_{i=1}^n a_{bi}^2 \xi_{bi}^2 h_i^2 = b_b^2, \quad (4.33)$$

де ξ_b – коефіцієнт нормалізації граничної моделі при заданих відхиленнях вихідної функції.

Рівняння (4.33) використовується в процедурах призначення статистично-орієнтованих допусків, якщо задано одно із межових значень вихідної функції. У випадках, коли задано ширину інтервалу зміни вихідної функції, із співвідношень (4.26) формується рівняння:

$$\sum_{i=1}^n (\bar{a}_i \bar{w}_i - \underline{a}_i \underline{w}_i) = b_w, \quad (4.34)$$

де \underline{a}_i та \bar{a}_i – лінійні коефіцієнти розкладання вихідної функції в ряд Тейлора при нижніх та верхніх значеннях інтервалу та її зміни;

$$b_w = w_y - (\bar{a}_0 - \underline{a}_0) - \sum_{i=1}^n (\bar{a}_i \bar{m}_i - \underline{a}_i \underline{m}_i);$$

$w_y = \bar{y} - \underline{y}$ – ширина інтервалу зміни вихідної функції;

\underline{a}_0 та \bar{a}_0 – коефіцієнти a_{b0} , які визначаються з допомогою виразів (4.25)

при нижньому та верхньому граничних значеннях вихідної функції;

\underline{m}_i та \bar{m}_i – координати центрів симетрії вершинних еліпсоїдів, які визначаються при нижньому та верхньому межових значеннях вихідної функції;

\underline{w}_i та \bar{w}_i – відхилення координат точок дотику меж області працездатності та області розсіяння від центрів симетрії вершинних еліпсоїдів при нижньому та верхньому межовим значенням вихідної функції.

Після підстановки співвідношень (4.19), (4.23) та (4.28) рівняння (4.34) перетворюється до вигляду, який використовується в процедурах призначення статистично-орієнтованих допусків при заданій ширині інтервалу зміни вихідної функції:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i^{-2} \xi_i^2}{\underline{b}} - \frac{a_i^2 \xi_i^2}{\bar{b}} \right) \bar{h}_i^{-2} = b_w. \quad (4.35)$$

Рівняння (4.33) та (4.35) відрізняються від рівнянь, які використовуються при призначенні нормальних допусків, тільки множниками ξ_i^2 . Тому в процедурах призначення статистично-орієнтованих допусків можуть використовуватись подібні оптимізаційні співвідношення. Наприклад, при призначенні рівних допусків в задачі (4.33) використовується співвідношення:

$$\delta = |\delta_{bi}| = \sqrt{b_b^2 / \sum_{j=1}^n a_{bj}^2 \xi_{bj}^2 x_{rj}^2}, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (4.36)$$

де $\delta_{bi} = h_{bi} / x_{ri}$ – відносні допустимі відхилення параметрів елементів;

h_{bi} – відхилення параметрів елементів при заданих межових значеннях вихідної функції.

Знак відхилень (4.36) визначається з допомогою виразів:

$$\begin{aligned} \underline{\delta}_i &= -\delta; & \bar{\delta}_i &= \delta, & (\bar{a}_i > 0); \\ \underline{\delta}_i &= \delta; & \bar{\delta}_i &= -\delta, & (\bar{a}_i < 0). \end{aligned} \quad (4.37)$$

В стратегії максимального об'єму допускової області використовуються оптимізаційні співвідношення:

$$\delta_{bi} = \frac{b_b}{\sqrt{n} a_{bi} \xi_{bi} x_{ri}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (4.38)$$

Подібним чином змінюються оптимізаційні співвідношення в задачах (4.35) та інших стратегіях призначення допусків. Необхідно тільки мати на

увазі, що в алгоритмах призначення статистично-орієнтованих допусків необхідно враховувати особливості формування брусоеліпсоїдних допускових областей. Якщо задано одно із межових значень вихідних функцій, то алгоритм призначення статистично-орієнтованих допусків записується у вигляді:

Крок 1. Визначаються початкові значення допустимих відхилень параметрів:

$$\delta = |\delta_y/n|,$$

де $\delta_y = (y_b - y_r)/y_r$ – відносне допустиме відхилення вихідної функції.

Крок 2. Визначаються початкові координати межових вершин допускової області:

$$\begin{aligned} \underline{x}_i &= x_{ri}(1 + \delta); & \bar{x}_i &= x_{ri}(1 - \delta), & (y(X_i) > y(X_r)); \\ \underline{x}_i &= x_{ri}(1 - \delta); & \bar{x}_i &= x_{ri}(1 + \delta), & (y(X_i) < y(X_r)). \end{aligned}$$

Крок 3. Визначаються параметри брусоеліпсоїдної області розсіяння. Використовуються співвідношення (4.18) та (4.21)-(4.24).

Крок 4. Визначаються параметри моделі меж області працездатності. Використовуються співвідношення (4.25) та (4.26).

Крок 5. Визначаються оптимальні значення допустимих відхилень параметрів елементів. Використовуються співвідношення (4.36), (4.38) або інші оптимальні співвідношення, що враховують зміни умов оптимізаційної задачі (вид обмежень, стратегія оптимізації і тощо).

Крок 6. Уточнюється оптимальне значення допустимих відхилень параметрів елементів:

$$h_i^{(k)} = h_i^{(k-1)} + \xi^2 (h_i^{(k)} - h_i^{(k-1)}). \quad (4.39)$$

Крок 7. Визначаються координати точки дотику меж області працездатності та області розсіяння. Використовуються співвідношення (4.29).

Крок 8. Перевіряється умова:

$$\left| \frac{y_b - y^{(k)}}{y_b} \right| \leq \varepsilon. \quad (4.40)$$

Якщо умова не виконується, то здійснюється перехід на крок 4. Інакше – кінець алгоритму.

Вираз (4.39) використовується в алгоритмі для покращення збіжності ітераційного процесу при малих значеннях коефіцієнта нормалізації, коли допустимі статистично-орієнтовані відхилення наближуються до інтервальних допусків. Двобічні обмеження вихідної функції враховуються на кроці 5 відповідними оптимізаційними співвідношеннями. В умову завершення алгоритму (4.40) в цьому випадку підставляється задане та поточне значення ширини інтервалу зміни вихідної функції.

4.4 Дослідження параметрів допускового проектування при законах розподілу заданих статистичними рядами

Між інтервальними та нормальними допусками існує однозначний взаємозв'язок, який для стратегії максимального об'єму допускової області записується в виді [215]:

$$\delta_n = \sqrt{n} \delta_i, \quad (4.41)$$

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 [227, 228]. Дослідження цієї залежності проводилось на прикладі неінвертованого фільтру нижніх частот [223], який зображено на рис. 2.5

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 таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Відхилення параметрів елементів

Коефіцієнт нормалізації	Відхилення параметрів елементів, %			
	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>
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 – з допомогою алгоритму

призначення статистично-орієнтованих допусків. Зі зростанням коефіцієнта нормалізації допустимі відхилення параметрів елементів теж зростають, досягаючи при $\xi = 1$ значень нормальних допусків, які визначаються з допомогою виразу (4.41). При значеннях коефіцієнта нормалізації $\xi < 0,02$ статистично-орієнтовані допуски перевищують інтервальні не більш чим на 1%, що надає можливість в цих випадках використовувати інтервальну оцінку допустимих відхилень.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Запропоновано проводити апроксимації граничних ділянок статистичних рядів функціями, які подібні нормальному закону розподілу, що дало можливість створювати області розсіяння з вершинами, які згладжені з допомогою еліпсоїдних поверхонь – брусоеліпсоїдні області розсіяння.

2. Розроблений метод згладжених вершин для допускового проектування надає можливість проводити аналіз та призначати допустимі відхилення значень параметрів при різних стратегіях оптимізації у випадках, коли закони розподілу значень параметрів задано статистичними рядами.

3. При аналізі та призначенні допусків в методі використовується умова тотожності дотичних гіперповерхонь до меж області працездатності та вершинним еліпсоїдним поверхням. Це дозволило в рівняннях призначення допусків враховувати параметри моделей меж області працездатності та параметри брусоеліпсоїдної області розсіяння. Отримані оптимізаційні співвідношення перетворюються до виразів для оптимізації нормальних допусків при коефіцієнті нормалізації $\xi = 1$.

4. Дослідження показало, що запропоновану процедуру призначення статистично-орієнтованих допусків можна застосовувати при призначенні допусків в широкому діапазоні зміни коефіцієнтів нормалізації. Необхідно мати

на увазі, що при малих значеннях коефіцієнта нормалізації збіжність алгоритму погіршується. Проблеми з обчисленнями виникають при $\xi < 0,02$, коли інтервальні та статистично-орієнтовані допуски відрізняються незначно. В цих випадках можна використовувати інтервальну оцінку допустимих відхилень параметрів.

5. Запропонований метод забезпечує таку ж точність процедур допускового проектування, як і метод дотичних при призначені нормальних допусків. Метод можна використовувати також для аналітично заданих законів розподілу. В цих випадках тільки необхідно проводити апроксимацію граничних ділянок законів розподілів та отримувати нові співвідношення для визначення параметрів допускових областей. Виключенням є лише інтервальний розподіл, при якому допускова область співпадає з областю розсіяння, яка також має вид бруса.

Результати розділу 4 опубліковано у працях:

1. 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).

2. 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.

3. 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.

РОЗДІЛ 5

ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКАХ МІЖ
ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕМЕНТІВ5.1 Метод аналізу допусків з урахування кореляційних зв'язків між
параметрами елементів

Нормальному закону розподілу та кореляційному зв'язку між параметрами відповідає функція розподілу [231 - 237]:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \frac{x_j - m_j}{\sigma_j}\right]}{(2\pi)^{n/2} D^{1/2} \prod_{i=1}^n \sigma_i}, \quad (5.1)$$

де x_i , m_i та σ_i – вхідні параметри, їх математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення;

D – визначник матриці R кореляційних коефіцієнтів;

D_{ij} – алгебраїчне доповнення елемента R_{ij} цієї матриці.

На межі допускової області густина розподілу незмінна:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{\exp(-\gamma^2 / 2)}{(2\pi)^{n/2} D^{1/2} \prod_{i=1}^n \sigma_i}, \quad (5.2)$$

де γ – коефіцієнт поля розсіяння.

Умови рівності показників степенів в (5.1) та (5.2) надають можливість отримати рівняння для гіперповерхні допускової області у вигляді еліпсоїда:

$$\frac{1}{D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{w_i}{l_i} \frac{w_j}{l_j} = 1, \quad (5.3)$$

де $w_i = x_i - m_i$ – відхилення параметрів елементів;

$l_i = \gamma \sigma_i$ – напіввісь еліпса.

Вплив коефіцієнтів кореляції на конфігурацію допускової області показано на рис. 1, де \underline{y}_R та \bar{y}_R – нижнє та верхнє значення вихідної функції $y(X)$ при коефіцієнті кореляції $R_{1,2}$; $X=(x_1, \dots, x_n)$ – множина параметрів елементів. Як видно з рис. 5.1, збільшення коефіцієнта кореляції призводить до звуження допускової області. При $R_{1,2} = 1$ ця область вироджується в пряму лінію. Одночасно зі зміною коефіцієнта кореляції змінюється положення межових гіперповерхонь та допустимі відхилення вихідної функції. Якщо межа гіперповерхня описується зростаючою функцією, то збільшення коефіцієнта кореляції призводить до зменшення ширини відхилень вихідної функції. Спадній функції межової гіперповерхні та збільшенню коефіцієнта кореляції відповідає збільшення ширини відхилень вихідної функції.

Рівняння дотичної до вихідної функції можна записати у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b} w_i = 1, \quad (5.4)$$

де $a_i = \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X_b}$ – лінійні коефіцієнти моделі вихідної функції в точці

$X_b = (x_{b1}, \dots, x_{bn})$;

$$b = y(X) - y(X_b) + \sum_{i=1}^n a_i w_{bi}; \quad w_{bi} = x_{bi} - m_i.$$

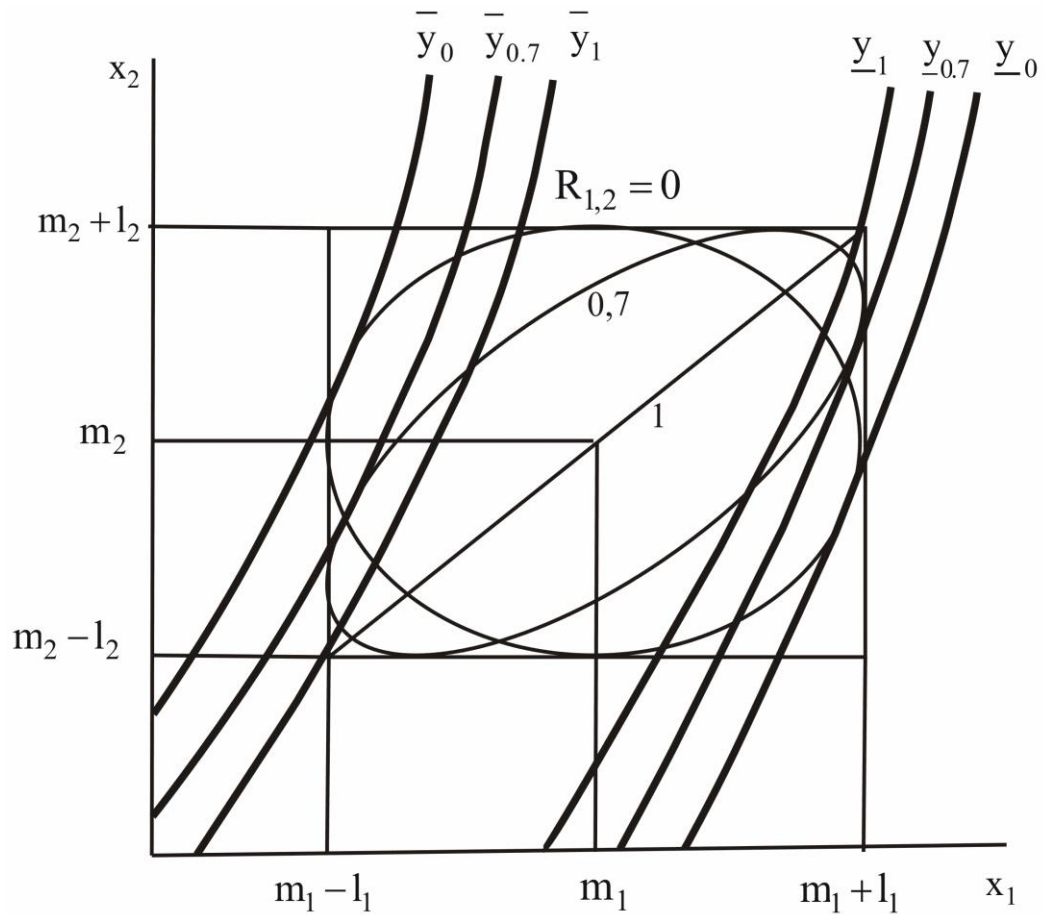


Рисунок 5.1 – Конфігурація допускової області

Рівняння дотичної до еліпсоїду (5.3) має вигляд:

$$\frac{1}{D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{w_i}{l_i} \frac{w_{bj}}{l_j} = 1. \quad (5.5)$$

Рівняння (5.4) та (5.5) співпадають, якщо виконуються умови:

$$\frac{1}{D l_i} \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{w_{bj}}{l_j} = \frac{a_i}{b}, \quad (i = \overline{1, n}) \quad (5.6)$$

Система рівнянь (5.6) може бути записана в матричному вигляді:

$$R^{-1}W = \frac{A}{b}, \quad (5.7)$$

де $W = \left[\frac{w_1}{l_1}, \dots, \frac{w_n}{l_n} \right]^T$; $A = [a_1 l_1, \dots, a_n l_n]^T$ – нормовані вектори відхилень та коефіцієнтів моделі вихідної функції.

Розв'язком системи рівнянь (5.7) є відхилення параметрів елементів:

$$w_i = \frac{l_i}{b} \sum_{j=1}^n R_{ij} a_j l_j, \quad (i = \overline{1, n}) \quad (5.8)$$

Підстановкою відхилень (5.8) до рівняння дотичної (5.4) призводить до виразу:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j l_i l_j = b^2 \quad (5.9)$$

Співвідношення (5.8) та (5.9) встановлюють зв'язок між параметрами еліпсоїдної допускової області та параметрами моделі вихідної функції. Для лінійної вихідної функції вони однозначно визначають положення точки дотику межевої гіперповерхні вихідної функції та еліпсоїдної допускової області. У випадку нелінійних вихідних функцій використовується ітераційний алгоритм.

Задача розрахунку допусків вихідної функції ставиться як задача визначення її межових значень при заданих напівосевих параметрах допускової області. Вона буде розв'язана, якщо встановлено координати точки дотику межевої гіперповерхні вихідної функції та еліпсоїда. Ці координати розраховуються з допомогою співвідношення (5.8), в які підставляється відоме значення параметра:

$$b = \pm \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j l_i l_j \right)^{1/2}. \quad (5.10)$$

Знак параметра b приймається додатним при розрахунку максимального значення вихідної функції та від'ємним – при розрахунку мінімального значення. Для нелінійних вихідних функцій значення коефіцієнтів a_i залежить від обраних координат точки дотику межевої гіперповерхні та допускового еліпсоїда. Вони можуть встановлюватись за допомогою ітераційного алгоритму:

$$\begin{aligned} w_{bi}^{(k)} &= \frac{l_i}{b^{(k-1)}} \sum_{j=1}^n R_{ij} a_j^{(k-1)} l_j; \\ x_{bi}^{(k)} &= m_i + w_{bi}^{(k)}; & y_b^{(k)} &= y(X_b^{(k)}); \\ a_i^{(k)} &= \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X_b^{(k)}}; & b^{(k)} &= \pm \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i^{(k)} a_j^{(k)} l_i l_j \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Початкові координати точки дотику обираються з використанням інтервальних алгоритмів [213, 238, 239]. Завершується алгоритм (5.11) досягненням заданої точності визначення межевого значення вихідної функції:

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

де ε – задане значення точності розрахунку межевого значення вихідної функції.

Точність алгоритму оцінювалась порівнянням із результатами розрахунку інтегральним методом. Порівняння з методом дотичних [240] для незалежних значень параметрів за однакових тестових функціях виявилось, що

кореляційний зв'язок може декілька 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 мікросмушкового фільтра нижніх частот. Технічні дані фільтра та співвідношення для розрахунку коефіцієнта передачі відповідали наведеним в [241, 242]. Ескіз топології фільтра зображено на рис. 5.2, де h_i та d_i – довжина та ширина ланок. Основні параметри фільтра: межова 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 мікросмушкової лінії передачі $Z_0 = 50$ Ом.

Номінальні розміри ланок наведено в табл. 5.1. При виготовленні фільтра використовувалась підкладка товщиною $c = 1$ мм та відносною діелектричною проникністю $\varepsilon = 9,6$.

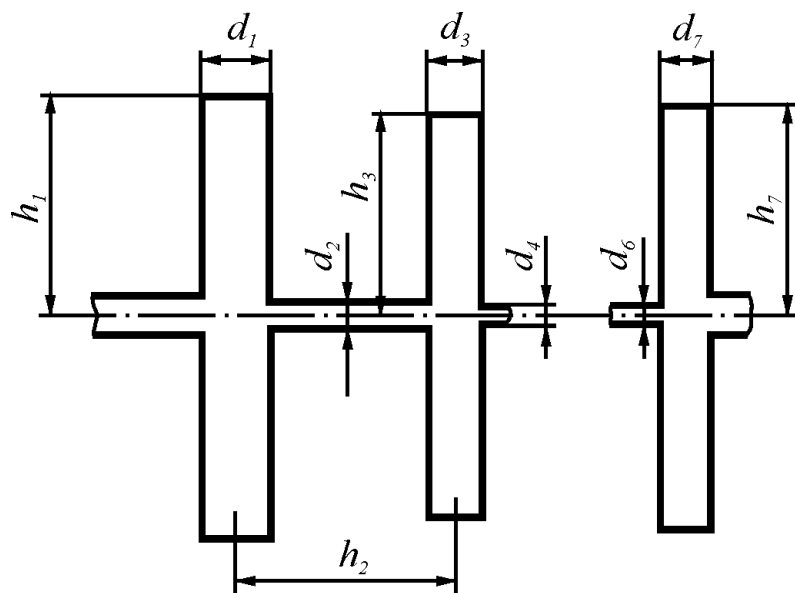


Рисунок 5.2 – Мікросмушковий фільтр нижніх частот

Враховувалось, що товщина підкладки, її діелектрична проникність, довжина ланок h_2 , h_4 , h_6 змінювалась взаємозалежно. Коефіцієнт кореляції між рядом розташованими паралельними (ємнісними) 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. Результати розрахунку наведено в табл. 5.2, де δ_{xi} - допуски на параметри ланок, $\underline{\delta}_H$ та $\bar{\delta}_H$ - нижні та верхні допуски на коефіцієнт передачі.

Таблиця 5.1 – 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

Таблиця 5.2 – 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

Результати розрахунку інтервальних допусків і нормальних допусків при відсутності кореляційного зв'язку наведено в таблиці 5.3.

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.

Таблиця 5.3 – Розрахунок допусків при незалежних параметрах

$\delta_{xi}, \%$	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

5.2 Метод призначення нормальних допусків при кореляційних зв'язках між параметрами елементів

Нормальному закону розподілу та кореляційному зв'язку між параметрами елементів відповідає допускова область, яка обмежена еліпсоїдом [232, 233]:

$$\frac{1}{D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \frac{w_i}{l_i} \frac{w_j}{l_j} = 1, \quad (5.12)$$

де D – визначник матриці R кореляційних коефіцієнтів;

D_{ij} – алгебраїчне доповнення елемента R_{ij} цієї матриці;

$w_i = x_i - m_i$ – відхилення параметрів елементів;

x_i та m_i – параметри елементів та їх математичні сподівання;

$l_i = \gamma \sigma_i$ – напіввісі еліпсоїда;

γ – коефіцієнт поля розсіяння;

σ_i – середнє квадратичне відхилення параметрів;

n – кількість елементів.

Геометричні моделі для призначення нормальних допусків при кореляційному зв'язку показано на рис. 5.3, де Ω_w , Ω_n та Ω_l – області працездатності, нормальних допусків и напівосевих відхилень; \underline{s}_b та \bar{s}_b – нижня и верхня межові гіперповерхні області працездатності, що відповідають нижньому та верхньому значенням вихідної функції; \underline{s}_t та \bar{s}_t – дотичні гіперплощини до гіперповерхонь \underline{s}_b та \bar{s}_b ; \underline{B} та \bar{B} – точки дотику допускової області та межових гіперповерхонь області працездатності.

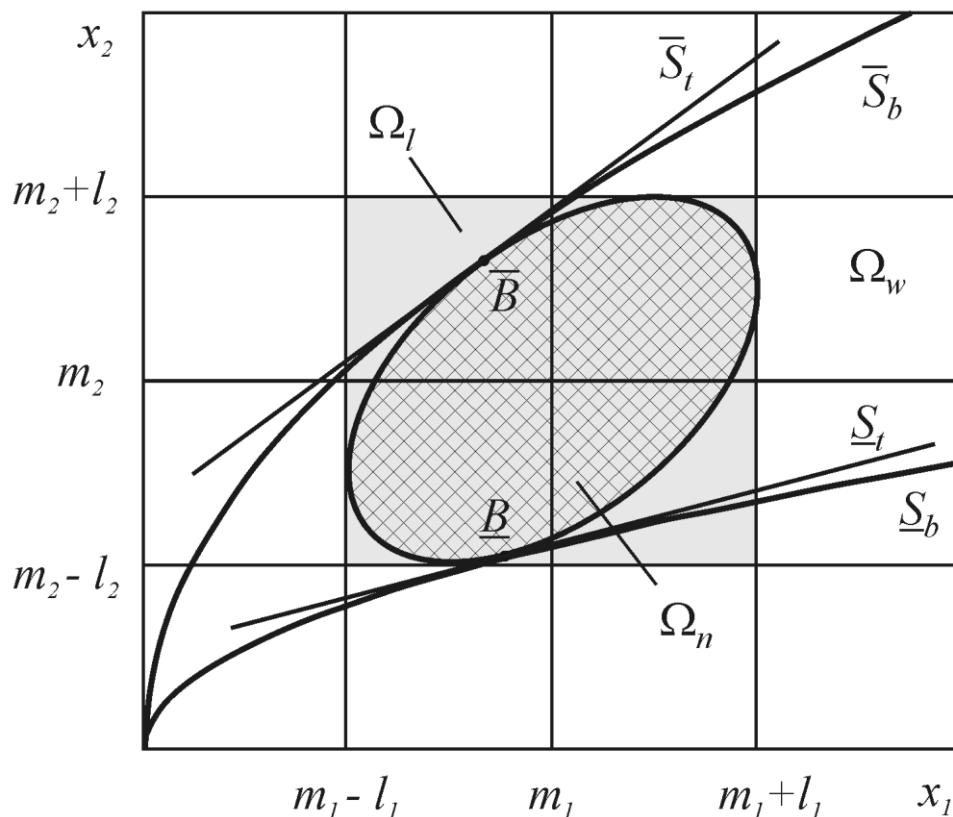


Рисунок 5.3 – Геометричні моделі для призначення допусків

Гіперплощини s_t співпадають з дотичними гіперплощинами до еліпсоїду Ω_n в точках дотику, якщо виконуються умови:

$$w_{bi} = \frac{l_i}{b} \sum_{j=1}^n R_{ij} a_j l_j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5.13)$$

де w_{bi} – відхилення параметрів елементів в точках дотику;

$$b = y(X) - y(X_b) + \sum_{i=1}^n a_i w_{bi};$$

a_j – лінійні коефіцієнти розкладання вихідної функції в ряд Тейлора в точках дотику;

$X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множина параметрів елементів;

$X_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – множина координат точок дотику;

$y(X)$ та $y(X_b)$ – значення вихідної функції при значеннях параметрів елементів X та X_b .

Параметри дотичної гіперплощини та еліпсоїда (5.12) зв'язані співвідношенням, яке використовується при призначенні допусків:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j l_i l_j = b^2 \quad (5.14)$$

Рівняння (5.14) має множину розв'язків, що надає можливість проводити оптимізацію допусків шляхом використання додаткових обмежень. В загальному вигляді такі обмеження можуть задаватися ваговими коефіцієнтами:

$$k_{lip} = \frac{l_i}{l_p}. \quad (5.15)$$

Підстановка виразу (5.15) в рівняння (5.14) надає можливість визначити напіввісь еліпсоїда:

$$l_p = |b| \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j k_{lip} k_{ljp} \right)^{-1/2}, \quad p = \overline{1, n} \quad (5.16)$$

При рівних відхиленнях параметрів елементів вираз (5.16) перетворюється до виду:

$$l_p = |b| \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j \right)^{-1/2}, \quad p = \overline{1, n} \quad (5.17)$$

Об'єм еліпсоїда визначається виразом [105]:

$$V = \frac{\pi^{n/2} D^{1/2}}{\Gamma(n)} \prod_{i=1}^n l_i, \quad (5.18)$$

де $\Gamma(n)$ – гама-функція.

Допускова область має максимальний об'єм при напіввосях еліпсоїда:

$$l_p = \left| \frac{b}{a_p} \right| \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} v_i v_j \right)^{-1/2}, \quad p = \overline{1, n} \quad (5.19)$$

де $v_i = \text{sign } a_i$.

Вираз (5.19) доводиться підстановкою до (5.18) співвідношення для однієї з напіввосей, яке отримано з виразу (5.14), або дослідженням цього виразу на екстремум. При максимальному об'ємі допускової області вагові коефіцієнти приймають значення:

$$k_{lij} = \left| \frac{a_j}{a_i} \right| \quad (5.20)$$

Нормальні допуски при кореляційному зв'язку дорівнюють інтервальним допускам, якщо виконуються умови:

$$R_{ij} \nu_i \nu_j \rightarrow 1, \quad i, j = \overline{1, n}.$$

При виконанні цих умов сума в (5.19) приймає значення:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} \nu_i \nu_j \rightarrow n^2,$$

що перетворює вираз (5.19) до виразу для інтервальних допусків при максимальному об'ємі допускової області [239]:

$$l_p = \frac{1}{n} \left| \frac{b}{a_p} \right|, \quad p = \overline{1, n} \quad (5.21)$$

Якщо кореляційний зв'язок між параметрами елементів є відсутній, то сума в (5.19) приймає значення:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} \nu_i \nu_j \rightarrow n.$$

Тоді максимальному об'єму допускової області відповідають нормальні допуски [215]:

$$l_p = \frac{1}{\sqrt{n}} \left| \frac{b}{a_p} \right|, \quad p = \overline{1, n}. \quad (5.22)$$

Вирази (5.16) – (5.22) можуть використовуватися для призначення абсолютних відхилень параметрів, якщо всі елементи мають одну фізичну природу. Якщо ця умова не виконується, то призначаються відносні відхилення параметрів, які нормовані відносно їх математичних сподівань. Співвідношення для призначення таких відхилень наведено в табл. 5.4, де $\delta_p = l_p / m_p$ – відносні відхилення параметрів; $k_{\delta ij} = \delta_i / \delta_j$ – вагові коефіцієнти відносних відхилень.

Таблиця 5.4 – Співвідношення для призначення відносних відхилень при однобічних обмеженнях

δ_p	Застосування
$ b \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j m_i m_j k_{lip} k_{ljp} \right)^{-1/2}$	
$ b \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i a_j m_i m_j \right)^{-1/2}$	$k_{\delta ij} = 1$
$\left \frac{b}{a_p m_p} \right \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} v_i v_j \right)^{-1/2}$	$V \rightarrow \max$
$\frac{1}{\sqrt{n} m_p} \left \frac{b}{a_p} \right $	$V \rightarrow \max$ $R_{ij} = 0$ $i \neq j$

Вирази (5.16), (5.17) та (5.19) використовуються в ітераційних алгоритмах призначення допусків при однобічних обмеженнях, які ґрунтуються на

уточненні координат точок дотику допускової області та межевої гіперповерхні області працездатності. Це надає можливість врахувати нелінійні властивості вихідних функцій радіоелектронних пристроїв.

В загальному випадку алгоритм призначення допусків має вид [232]:

$$\begin{aligned}
 l_p^{(k)} &= \left| b^{(k-1)} \left| \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i^{(k-1)} a_j^{(k-1)} k_{lip} k_{ljp} \right)^{-1/2} \right. \right| ; \\
 w_{bp}^{(k)} &= \frac{l_p^{(k)}}{b^{(k-1)}} \sum_{i=1}^n R_{ip} a_i^{(k-1)} l_i^{(k)} ; \\
 x_{bp}^{(k)} &= m_p + w_{bp}^{(k)} ; y_b^{(k)} = y(X_b^{(k)}) ; \\
 a_p^{(k)} &= \left. \frac{\partial y}{\partial x_p} \right|_{X_b^{(k)}} ; b^{(k)} = y - y_b^{(k)} + \sum_{i=1}^n a_i^{(k)} w_{bi}^{(k)} .
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

Початкове наближення в алгоритмі (5.23) обирається як в алгоритмах призначення інтервальних допусків [239, 213]. Завершується алгоритм при виконанні умови:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i^{(k)} - l_i^{(k-1)}}{l_i^{(k)}} \right)^2} \leq \rho ,$$

де ρ – задане значення точності розрахунку допусків.

Інше граничне значення вихідної функції визначається після призначення допусків з допомогою алгоритму аналізу [233]. При призначенні рівних відхилень параметрів в алгоритмі (5.23) використовується вираз (5.17). Призначення допусків з максимальним об'ємом допускової області передбачає використання виразу (5.19).

У зв'язку з симетричністю нормального закону розподілу параметрів допускова область в загальному випадку не може торкатися одночасно двох,

заданих довільно, межових гіперповерхонь області працездатності. Тоді допуски призначаються по кожному з межових значень вихідної функції, та обирається їх менше значення. Повне використання області працездатності при двобічних обмеженнях можливо, коли призначення допусків виконується за заданою шириною інтервалу вихідної функції:

$$w_y = \bar{y} - \underline{y},$$

де w_y – ширина інтервалу вихідної функції;

\underline{y} і \bar{y} – нижнє та верхнє значення вихідної функції.

Врахувати при призначенні допусків ширину інтервалу вихідної функції можна шляхом віднімання рівнянь дотичних, які складено для двох межових точок \underline{B} і \bar{B} (рис. 5.3):

$$\sum_{i=1}^n (\bar{a}_i \bar{w}_i - \underline{a}_i \underline{w}_i) = w_t, \quad (5.24)$$

де $\underline{a}_i, \underline{w}_i$ та \bar{a}_i, \bar{w}_i – коефіцієнти лінійної моделі та відхилень параметрів елементів для дотичних \underline{S}_t та \bar{S}_t ;

$$w_t = w_y - y(\bar{X}_b) + y(\underline{X}_b) + \sum_{i=1}^n (\bar{a}_i \bar{w}_{bi} - \underline{a}_i \underline{w}_{bi});$$

\underline{X}_b та \bar{X}_b – координати точок дотику \underline{B} та \bar{B} ;

\underline{w}_{bi} та \bar{w}_{bi} – відхилення параметрів елементів в точках дотику \underline{B} та \bar{B} .

Підстановка відхилень (5.13) у вираз (5.24) призводить до співвідношення:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} A_{ij} l_i l_j = w_t, \quad (5.25)$$

де $A_{ij} = \frac{\bar{a}_i \bar{a}_j}{\bar{b}} - \frac{\underline{a}_i \underline{a}_j}{\underline{b}}$.

Співвідношення (5.25) встановлює зв'язок між параметрами допускової області та параметрами дотичних гіперплощин \underline{S}_t та \bar{S}_t при заданій ширині інтервалу вихідної функції. Підстановка в (5.25) вагових коефіцієнтів (5.15) надає можливість визначити напіввосі еліпсоїда:

$$l_p = \sqrt{w_t} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} A_{ij} k_{lip} k_{ljp} \right)^{-1/2}, \quad p = \overline{1, n}. \quad (5.26)$$

При рівних відхиленнях параметрів елементів вираз (5.26) перетворюється до виду:

$$l_p = \sqrt{w_t} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} A_{ij} \right)^{-1/2}, \quad p = \overline{1, n}. \quad (5.27)$$

Допускова область має максимальний об'єм, якщо напіввосі еліпсоїда задаються виразами:

$$l_p = \sqrt{\frac{w_t}{A_{pp}}} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} \frac{A_{ij}}{\sqrt{A_{ii} A_{jj}}} \right)^{-1/2}, \quad p = \overline{1, n}. \quad (5.28)$$

Вираз (5.28) доводиться аналогічно виразу (5.19). В цьому випадку вагові коефіцієнти приймають значення:

$$k_{lij} = \sqrt{\frac{A_{jj}}{A_{ii}}}.$$

При відсутності кореляційного зв'язку вираз (5.28) перетворюється до виду [215]:

$$l_p = \sqrt{\frac{w_t}{nA_{pp}}}. \quad (5.29)$$

Співвідношення для призначення відносних відхилень параметрів при двобічних обмеженнях наведено в табл. 5.5.

Призначення допусків на параметри елементів при заданій ширині інтервалу вихідної функції в загальному випадку виконується з допомогою алгоритму:

$$\begin{aligned}
 l_p^{(k)} &= \sqrt{w_t^{(k-1)}} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} A_{ij}^{(k-1)} k_{lip} k_{ljp} \right)^{-1/2}; \\
 w_{bp}^{(k)} &= \frac{l_p^{(k)}}{\underline{b}^{(k-1)}} \sum_{i=1}^n R_{ip} a_{ip}^{(k-1)} l_i^{(k)}; \\
 x_{bp}^{(k)} &= m_p + w_{bp}^{(k)}; \quad y_b^{(k)} = y(X_b^{(k)}); \\
 a_p^{(k)} &= \left. \frac{\partial y}{\partial x_p} \right|_{X_b^{(k)}}; \quad \underline{b}^{(k)} = \pm \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} a_i^{(k)} a_j^{(k)} l_i^{(k)} l_j^{(k)} \right)^{1/2}; \\
 w_t^{(k)} &= w_y - \overline{y}_b^{(k)} + \underline{y}_b^{(k)} + \sum_{i=1}^n (\overline{a}_i^{(k)} \overline{w}_{bi}^{(k)} - \underline{a}_i^{(k)} \underline{w}_{bi}^{(k)}); \\
 A_{ij}^{(k)} &= \frac{\overline{a}_i^{(k)} \overline{a}_j^{(k)}}{\overline{b}^{(k)}} - \frac{\underline{a}_i^{(k)} \underline{a}_j^{(k)}}{\underline{b}^{(k)}}
 \end{aligned} \quad (5.30)$$

де $\mathbf{y}_b = [\underline{y}_b; \bar{y}_b]$, $\mathbf{x}_{bp} = [\underline{x}_{bp}; \bar{x}_{bp}]$, $\mathbf{w}_{bp} = [\underline{w}_{bp}; \bar{w}_{bp}]$ – інтервал вихідної функції в точці дотику, координати точки дотику та їх відхилення;

$\mathbf{a}_i = [\underline{a}_i; \bar{a}_i]$ та $\mathbf{b} = [\underline{b}; \bar{b}]$ – інтервальні параметри лінійної моделі вихідної функції.

Таблиця 5.5 – Співвідношення для призначення відносних відхилень при двобічних обмеженнях

δ_p	Застосування
$\sqrt{w_t} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} A_{ij} m_i m_j k_{lip} k_{ljp} \right)^{-1/2}$	
$\sqrt{w_t} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} A_{ij} m_i m_j \right)^{-1/2}$	$k_{\delta ij} = 1$
$\frac{1}{m_p} \sqrt{\frac{w_t}{A_{pp}}} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} \frac{A_{ij}}{\sqrt{A_{ii} A_{jj}}} \right)^{-1/2}$	$V \rightarrow \max$
$\frac{1}{m_p} \sqrt{\frac{w_t}{n A_{pp}}}$	$V \rightarrow \max$ $R_{ij} = 0$ $i \neq j$

Параметр b приймає додатне значення для верхньої межі вихідної функції та від'ємне значення – для нижньої. При інших умовах оптимізації перший рядок в алгоритмі (5.30) замінюється виразом (5.27) або (5.28). Початок та завершення алгоритму подібно алгоритму (5.23).

Запропоновані методи розрахунку можуть використовуватись при призначенні допусків на елементи и функціональні вузли, які виготовляються з використанням групових технологічних процесів. До таких пристроїв відносяться, зокрема, мікросмушкові пристрої НВЧ діапазону. Геометричні

методи допускового аналізу використовувались при призначенні в таких пристроях переважно інтервальних допусків [213], які найчастіше використовуються при дрібносерійним виробництві. Запропоновані алгоритми надають можливість провести дослідження впливу закону розподілу та кореляційного зв'язку на відхилення параметрів елементів.

Об'єктом дослідження обрано мікросмужковий фільтр нижніх частот (рис. 5.2) з параметрами, які наведені в підрозділі 5.1. Було розглянуто варіанти з відхиленням товщини підкладки $\Delta c = \pm 0,01$ мм та $\pm 0,02$ мм, відносної діелектричної проникності $\delta_\varepsilon = \pm 0,5$ та $\pm 1\%$. Призначались однакові допуски на всі геометричні розміри ланок при заданій ширині інтервалу загасання фільтра $w_y = 10\%$ та 20% .

Результати розрахунків наведено в табл. 5.6 та табл. 5.7. Обчислення показали, що кореляційний зв'язок в такому мікросмужковому пристрої призводить до зменшення допустимих відхилень геометричних розмірів на 7 – 9% у порівнянні з взаємозалежним нормальним розподілом параметрів. Інтервальний розподіл зменшує допуски в 2,6 – 2,9 раз.

Таблиця 5.6 – Відхилення розмірів фільтра при $w_y = 10\%$

Закон розподілу параметрів	$\Delta d_i = \Delta h_i$, мкм	
	$\Delta c = \pm 10$ мкм $\delta_\varepsilon = \pm 0,5\%$	$\Delta c = 0$ $\delta_\varepsilon = 0$
інтервальний	$\pm 2,83$	$\pm 5,11$
нормальний з взаємозалежними параметрами	$\pm 8,21$	$\pm 8,69$
нормальний з кореляційної зв'язком	$\pm 7,63$	$\pm 7,97$

Використання ідеальних підкладок з нульовими відхиленнями параметрів розширює інтервальні допуски в 1,8 раз. Підвищення якості підкладки значно менш впливає при нормальних законах розподілу параметрів, коли допуски збільшуються лише на 10 %.

Таблиця 5.7 – Відхилення розмірів фільтра при $w_y = 20\%$

Закон розподілу параметрів	$\Delta d_i = \Delta h_i$, мкм	
	$\Delta c = \pm 20$ мкм $\delta_\varepsilon = \pm 1\%$	$\Delta c = 0$ $\delta_\varepsilon = 0$
інтервальний	$\pm 5,63$	$\pm 10,13$
нормальний з взаємозалежними параметрами	$\pm 16,13$	$\pm 17,03$
нормальний з кореляційної зв'язком	$\pm 14,72$	$\pm 15,56$

Нелінійні властивості загасання фільтра проявляються в несиметричності його відхилень, які при ширині інтервалу $w_y = 10\%$ для інтервальних розподілів мали інтервальні значення $\delta = [-4,81; 5,19]\%$, а при кореляційному зв'язку – $\delta = [-4,62; 5,58]\%$. Ширині відхилень $w_y = 20\%$ відповідали інтервали $\delta = [-9,25; 10,74]\%$ та $\delta = [-8,50; 11,5]\%$ з подібним збільшенням несиметричності загасання при кореляційному зв'язку.

5.3 Метод призначення статистично-орієнтованих допусків з урахуванням кореляційних зв'язків між параметрами елементів.

Точність розрахунків статистично-орієнтованих допусків можна підвищити, якщо при формуванні моделей допускових областей враховувати кореляційні зв'язки між параметрами елементів [243].

При формуванні таких допускових областей необхідно враховувати, що область розсіювання вписується в допускову область, яка має вид бруса — прямокутного гіперпаралелепіпеда з ребрами паралельними координатним площинам. Таким чином, допускова область обмежується крайовими членами статистичного ряду за кожною з координат. Тому у зв'язку з великою кількістю елементів, що характерно для радіоелектронних апаратів, межі областей розсіювання необхідно формувати на основі проекції статистичного ряду на кожен з координатних площин. Перехід від n -вимірного статистичного ряду до n проекцій на координатні площини суттєво знижує об'єм вибірки при створенні області працездатності, де n — кількість елементів, що впливають на точність радіоелектронного апарата.

Проекція області розсіювання на одну з координатних площин може мати вид, показаний на рис. 5.4, де позначено: Ω_w — область працездатності пристрою; Ω_s та Ω_t — область розсіювання та допускова область; x_{r1} , та x_{r2} — номінальні значення параметрів; \underline{x}_1 та \bar{x}_1 , \underline{x}_2 та \bar{x}_2 — нижні та верхні значення параметрів x_1 , та x_2 , які визначають межі допускової області; \bar{y} — верхнє межове значення інтервалу зміни вихідної функції.

Граничні ділянки розподілу параметрів в статистично-орієнтованому допусковому проектуванні апроксимуються еліпсоїдними поверхнями. Для ділянки області розподілу, яка дотична до верхній межі вихідної функції на рис. 5.4, використовується апроксимація з допомогою еліпсоїда $\bar{\Omega}_c$, центр

симетрії якого задається координатами \bar{m}_{c1} та \bar{m}_{c2} . Еліпсоїд дотикається меж допускової області в точках \bar{x}_{s1} та \bar{x}_{s2} .

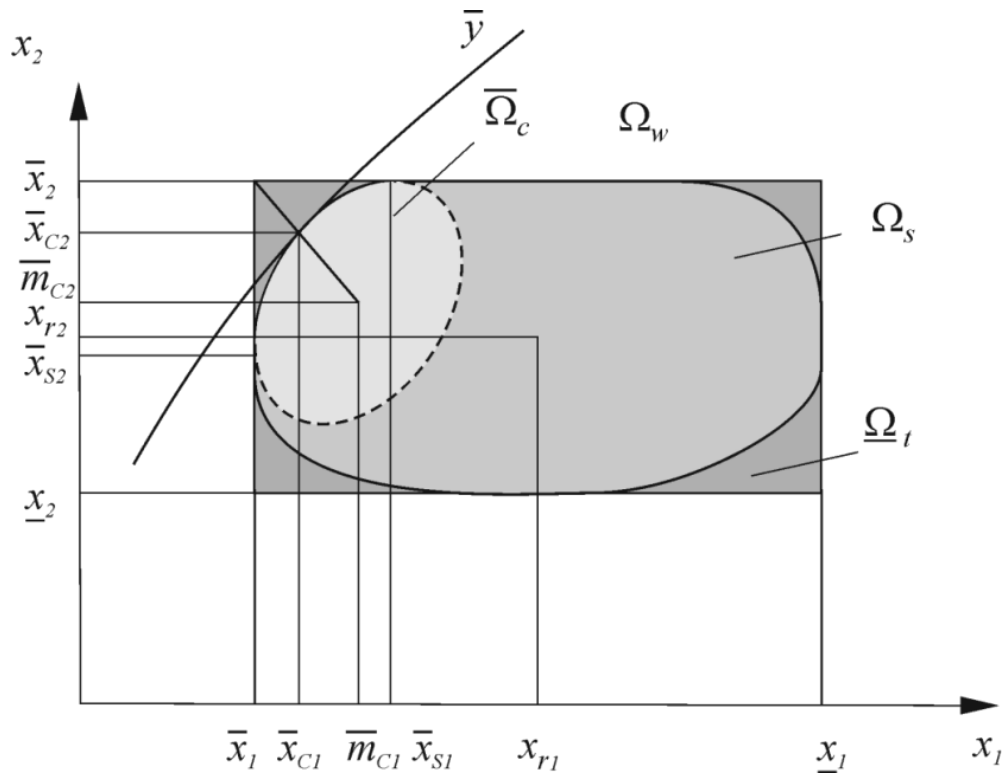


Рисунок 5.4 – Проекція області розсіяння на координатну площину

Рівняння еліпсоїда $\bar{\Omega}_c$ з урахуванням кореляційного зв'язку між параметрами елементів тоді приймає вид

$$\frac{1}{D} \left[\frac{(x_1 - \bar{m}_{c1})^2}{l_1^2} + \frac{(x_2 - \bar{m}_{c2})^2}{l_2^2} - 2R \frac{(x_1 - \bar{m}_{c1})(x_2 - \bar{m}_{c2})}{l_1 l_2} \right] = 1, \quad (5.31)$$

де $l_1 = \bar{x}_1 - \bar{m}_{c1}$, $l_2 = \bar{x}_2 - \bar{m}_{c2}$ – півосі еліпсоїда;

$D = 1 - R^2$ – детермінант кореляційної матриці;

R – коефіцієнт кореляції.

В точках дотику еліпсами $\bar{\Omega}_c$ меж допускової області виконуються співвідношення:

$$\left. \frac{\partial \bar{\Omega}_c}{\partial x_1} \right|_{\substack{x_2 = \bar{x}_2 \\ x_1 = \bar{x}_{s1}}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \bar{\Omega}_c}{\partial x_2} \right|_{\substack{x_1 = \bar{x}_1 \\ x_2 = \bar{x}_{s2}}} = 0, \quad (5.32)$$

де \bar{x}_{s1} та \bar{x}_{s2} – координати точок дотику еліпсоїда до меж допускової області.

Підстановка рівняння еліпса (5.31) в перше зі співвідношень (5.32) призводить до співвідношення:

$$2 \frac{\bar{x}_{s1} - \bar{m}_{c1}}{l_1^2} - 2R \frac{(\bar{x}_2 - \bar{m}_{c2})}{l_1 l_2} = 0,$$

яке перетворюється до виду:

$$\frac{\bar{x}_{s1} - \bar{m}_{c1}}{\bar{x}_1 - \bar{m}_{c1}} = R. \quad (5.33)$$

Аналогічний вираз можна отримати зі співвідношення (5.32) для іншого параметра:

$$\frac{\bar{x}_{s2} - \bar{m}_{c2}}{\bar{x}_2 - \bar{m}_{c2}} = R. \quad (5.34)$$

Рівняння (5.33) та (5.34) містять сім параметрів, з яких \bar{x}_1 та \bar{x}_2 , \bar{x}_{s1} та \bar{x}_{s2} визначаються з допомогою проекції статистичного ряду на координатну площину. Невідомими залишаються параметри \bar{m}_{c1} , \bar{m}_{c2} та R . Для їх визначення необхідно додаткові рівняння, які враховують кореляційні зв'язки

між параметрами елементів. Такі рівняння створюються з урахуванням лінійної залежності між параметрами \bar{x}_{s1} та \bar{x}_{s2} , що випливає з рівнянь (5.33) та (5.34):

$$\frac{\bar{x}_{s1} - \bar{m}_{c1}}{\bar{x}_1 - \bar{m}_{c1}} = \frac{\bar{x}_{s2} - \bar{m}_{c2}}{\bar{x}_2 - \bar{m}_{c2}} . \quad (5.35)$$

Рівняння (5.35) є рівняння прямою, яка проходить через вершину допускової області та центр симетрії еліпса $\bar{\Omega}_c$ відповідно з координатами (\bar{x}_1, \bar{x}_2) і $(\bar{m}_{c1}, \bar{m}_{c2})$.

ВИЗНАЧЕННЯ 5.5. Кореляційною прямою називається пряма лінія, що поєднує вершину допускової області та центр симетрії еліпса, який дотичний до меж допускової області, які перетинаються у цій вершині.

Кореляційна пряма створюється рухом точки, координати якої відповідають координатам точок дотику вершинного еліпса до меж допускової області. Якщо в допускову область вписується тільки один вершинний еліпс, який дотичний до всіх меж допускової області, то кореляційна пряма поєднує протилежні вершини допускової області, а закон розподілу параметрів є нормальним.

Будь-якій точці, яка розташована на кореляційній прямій, відповідає рівняння аналогічне рівнянню (5.35). Якщо таку точку вибрати на межі області розсіяння, то це забезпечує найбільшу точність розрахунку координат параметрів моделі статистичного ряду, оскільки забезпечує найбільшу відстань цієї точки від точок дотику еліпса до меж допускової області. Тоді для визначення координат цієї точки створюється рівняння як рівняння частини кореляційної прямої лінії, що проходить через вершину допускової області та точку з координатами (\bar{x}_e, \bar{x}_e) :

$$\frac{\bar{x}_{e1} - \bar{x}_{s1}}{\bar{x}_1 - \bar{x}_{s2}} = \frac{\bar{x}_{e2} - \bar{x}_{s2}}{\bar{x}_1 - \bar{x}_{s2}} , \quad (5.36)$$

де \bar{x}_{e1} та \bar{x}_{e2} – координати точки перетину кореляційної прямої та еліпса $\bar{\Omega}_c$.
Значення координат \bar{x}_{e1} та \bar{x}_{e2} визначаються в процесі руху точки вдовж кореляційної прямої до перетину з межею області розсіяння.

Підстановка отриманих координат в рівняння (5.31) створює співвідношення:

$$\frac{1}{D} \left[-\frac{(\bar{x}_{e1} - \bar{m}_{c1})^2}{\bar{l}_1^2} + \frac{(\bar{x}_{e2} - \bar{m}_{c2})^2}{\bar{l}_2^2} + 2R \frac{(\bar{x}_{e1} - \bar{m}_{c1})(\bar{x}_{e2} - \bar{m}_{c2})}{\bar{l}_1 \bar{l}_2} \right] = 1 \quad (5.37)$$

Для спрощення співвідношення (7) використовується рівняння кореляційної прямої, яке записано у вигляді:

$$\frac{\bar{x}_{e1} - \bar{m}_{c1}}{\bar{x}_1 - \bar{m}_{c1}} = \frac{\bar{x}_{e2} - \bar{m}_{c2}}{\bar{x}_1 - \bar{m}_{c2}} \quad (5.38)$$

Підстановка в вираз (7) рівняння (8) та виразу для детермінанта кореляційної матриці та півосі еліпсоїдів призводить до рівнянь:

$$\frac{2}{1+R} \frac{(\bar{x}_{e1} - \bar{m}_{c1})^2}{(\bar{x}_1 - \bar{m}_{c1})^2} = 1 \quad (5.39)$$

Рівняння (5.39) можна використовувати як третє рівняння для визначення невідомих параметрів еліпса \bar{m}_{c1} , \bar{m}_{c2} та R . Розв'язок системи рівнянь (5.33), (5.34) та (5.39) для координат центра симетрії еліпса тоді записується у вигляді:

$$\bar{m}_{c1} = \frac{2\bar{x}_{e1}^2 - \bar{x}_1^2 - \bar{x}_1 \bar{x}_{s1}}{4\bar{x}_{e1} - 3\bar{x}_1 - \bar{x}_{s1}} \quad (5.40)$$

$$m_{c2} = \frac{2\bar{x}_{e2}^2 - \bar{x}_2^2 - \bar{x}_2 \bar{x}_{s2}}{4\bar{x}_{e2} - 3\bar{x}_2 - \bar{x}_{s2}} \quad (5.41)$$

Коефіцієнти кореляції визначаються тоді підстановкою співвідношення (5.39) та (5.40) до виразів (5.33) та (5.34) при цьому отримуються однакові результати.

Таким чином, при формуванні моделі області розсіяння використовується проекція багатовимірної статистичної вибірки на багатовимірну прямокутну систему координат. Для допускового проектування необхідні математичні моделі тих частин області розподілу, які дотикаються меж області працездатності. Зменшення об'єму статистичних випробувань досягається за рахунок формування в процесі вибірки проекцій статистичної вибірки на координатні площини. Більшість параметрів моделі тоді визначаються як параметри вписаного еліпсоїда в допускову область. До таких параметрів відносяться межові значення допускової області та координати точок дотику еліпсоїдної моделі меж допускової області.

Координати центра симетрії та коефіцієнти кореляційного зв'язку еліпсоїдної моделі визначаються з системи рівнянь, яка містить рівняння межових точок статистичної вибірки, які лежать на кореляційній прямій. Оскільки, для кожної вершини створюється свій граничний еліпсоїд, то вони будуть мати різні координати центра симетрії еліпсоїда та в загальному випадку різні півосі цих еліпсоїдів. Будуть відрізнятися також кореляційні коефіцієнти кожного еліпсоїда.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Встановлено співвідношення між параметрами допускової області та межами області працездатності при нормальному законі розподілу та

кореляційними зв'язками між параметрами елементами. Ці співвідношення надали можливість створити алгоритми для синтезу допусків при різних вимогах до області працездатності. Розглянуто випадки одно- та двобічних обмежень вихідної функції.

2. Запропоновано алгоритм аналізу допусків, що враховує зміну конфігурацію еліпсоїдної допускової області при виникненні кореляційного зв'язку між параметрами елементів. Алгоритм роботи є ітераційним. В процесі ітерацій уточнюються точки дотику еліпсоїдної допускової області та межевої гіперповерхні.

3. При кореляційному зв'язку метод дотичних має декілька меншу точність. Але вона на два порядки вище точності метода моментів. Кореляційний зв'язок при великій кількості параметрів призводить до деякого збільшення допусків на вихідну функцію. Однак це збільшення набагато менш, чим збільшення, що обумовлено законом розподілу параметрів. Прикладом цього є гарантовані допуски, що відповідають рівномірному закону розподілу.

4. Запропоновано співвідношення для призначення допусків при різних вагових коефіцієнтах. Можливо забезпечення максимального об'єму допускової області. Нелінійні властивості враховуються ітераційним процесом призначення допусків.

5. Показано, що наявність кореляційного зв'язку між параметрами призводить до зміни допустимих відхилень порівняно з взаємозалежним розподілом параметрів. Змінна відхилень може проходити як в сторону їх зменшення до інтервальних допусків, так і в сторону збільшення. Запропоновані алгоритми надали можливість провести оцінку впливу кореляційних зв'язків та параметрів підкладки на величину допустимих відхилень топології мікросмужкових пристроїв.

Результати розділу 5 опубліковано у працях:

1. Шило Г.Н. Назначение нормальных допусков методом касательных при корреляционной связи // Прикладная радиоэлектроника. 2007. Том 6, № 4. С. 573-577.
2. Шило Г.М., Гапоненко М.П., Коваленко Д.А. Расчет допусков методом касательных при корреляционной связи // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2006. № 1. С. 29-32.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

РОЗДІЛ 6

ДОПУСКОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ НА РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ

6.1 Інтервальне оцінювання параметрів елементів при зовнішніх впливах

В процесі експлуатації електронних апаратів параметри елементів починають змінюватись під дією зовнішніх чинників (температурні, електричні та магнітні поля, дія вологості, опромінення і т. і.). Оцінювання цих впливів може проводитись з допомогою інтервальних структур [244]. Такі структури містять інформацію про діапазони змінювання параметрів і можуть застосовуватись в процедурах вибору елементів та компенсації зовнішніх впливів [245, 246]. В проведених дослідженнях використовувались дійсні коефіцієнти зовнішніх впливів, що утруднювало оцінювання усіх впливів недосконалості технологічних процесів на відхилення вихідних функцій електронних апаратів.

У разі залежності інтервального параметра елемента від зовнішніх чинників утворюється двовимірна область, в якій відбувається переміщення інтервального параметра (рис. 6.1), де 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 [247, 248].

ВИЗНАЧЕННЯ 6.1 (Загальне). Інтервальною структурою називається інтервал з інтервальними межами:

$$F_x(x, *, d \cdot t) = [x_m, x_p], \quad (6.1)$$

де F_x – оператор інтервальної структури;

$*$ $\in \{+, -, \cdot, /\}$ – множина арифметичних операцій;

$x = [\underline{x}, \bar{x}]$ та $t = [t_m, t_p]$ – інтервали параметра елемента і величини зовнішніх впливів;

d – коефіцієнт зовнішніх впливів;

x_m і x_p – нижній і верхній інтервали інтервальної структури.

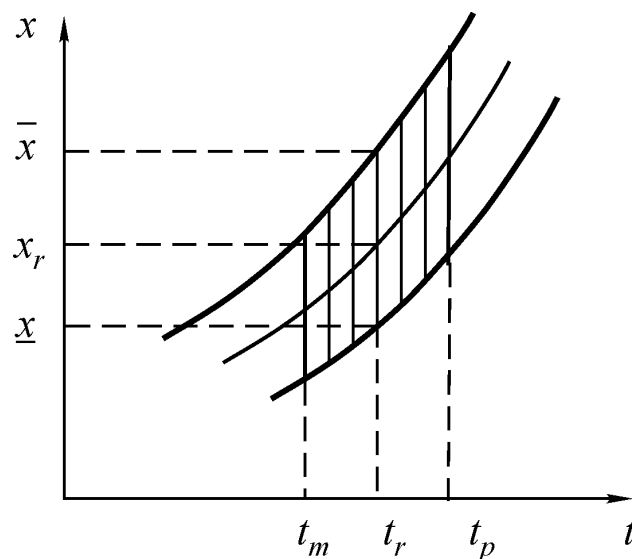


Рисунок 6.1 – Формування двовимірної інтервальної області при зовнішніх впливах

Спосіб формування інтервальних меж залежить від способу оцінювання двовимірної інтервальної області. Можуть утворюватись інтервальні структури із плаваючими інтервалами, плаваючими межами та зв'язаними інтервалами.

ВИЗНАЧЕННЯ 6.2. Інтервальною структурою із плаваючими інтервалами називається структура, у якій межі утворюються інтервальними значеннями параметра при нижньому і верхньому значенні зовнішнього впливу:

$$x_m = x * d \cdot t_m; \quad x_p = x * d \cdot t_p; \quad (Fx = Fi), \quad (6.2)$$

де F_i – оператор інтервальної структури із плаваючими інтервалами.

Формування інтервальної структури із плаваючими інтервалами показано на рис. 6.2.

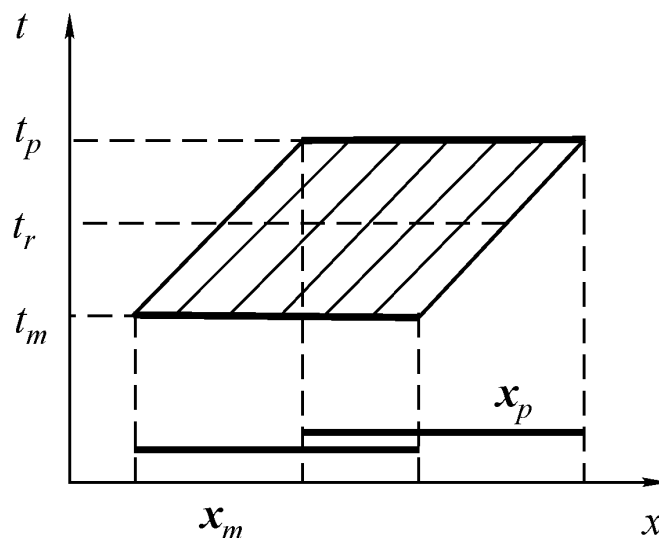


Рисунок 6.2 – Формування інтервальної структури із плаваючими інтервалами

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

ВИЗНАЧЕННЯ 6.3. Інтервальною структурою із плаваючими межами називається структура, у якій межі утворюються нижніми та верхніми межами параметра при інтервальному значенні зовнішнього впливу:

$$x_m = \underline{x} * d \cdot t; \quad x_p = \bar{x} * d \cdot t; \quad (F_x = F_b), \quad (6.3)$$

де F_b – оператор інтервальної структури із плаваючими межами.

Формування інтервальної структури із плаваючими межами показано на рис. 6.3. 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.

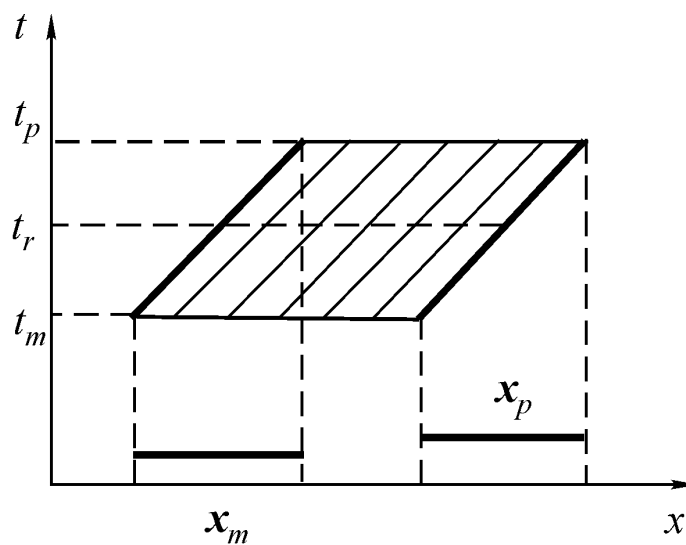


Рисунок 6.3 – Формування інтервальної структури із плаваючими межами

ВИЗНАЧЕННЯ 6.4. Інтервальною структурою із зв'язаними інтервалами називається структура, у якій межі утворюються протилежними межами параметра елемента при протилежних межах зовнішнього впливу:

$$x_m = x * \text{dual}(d \cdot t); \quad x_p = x * d \cdot t; \quad (F_x = F_c) \quad (6.4)$$

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

F_c – оператор інтервальної структури із зв'язаними інтервалами.

Формування інтервальної структури із зв'язаними інтервалами показано на рис. 6.4. Із рисунка видно, що інтервальна структура із зв'язаними інтервалами є проекцією на вісь абсцис діагоналей двовимірної області, що утворюється внаслідок зміни меж параметрів елементів при зовнішніх впливах.

Інтервальні структури із плаваючими інтервалами дозволяють оцінювати граничні значення інтервальних параметрів при межових значеннях зовнішніх впливів. Для оцінювання діапазону зміни межових відхилень параметрів елементів використовуються інтервальні структури із плаваючими межами. Із тих самих меж, які використовуються в попередніх структурах, формуються інтервали для внутрішнього і зовнішнього оцінювання зміни параметрів, що утворюють інтервальну структуру із зв'язаними інтервалами, яка може розглядатися як інтервальне розширення твінів [249, 250].

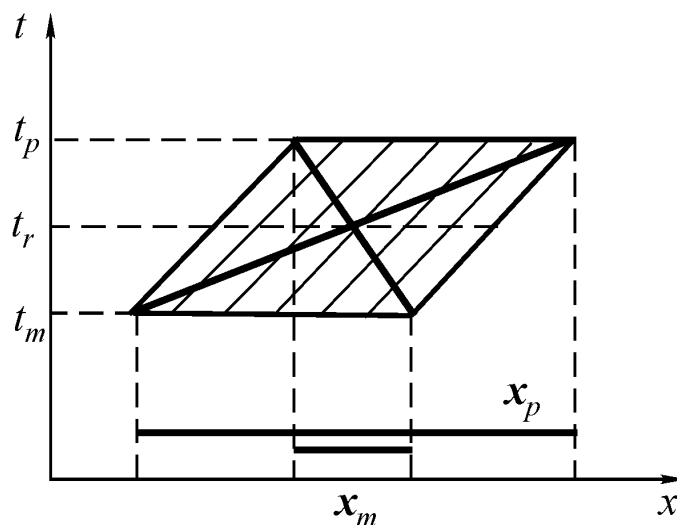


Рисунок 6.4 – Формування інтервальної структури із зв'язаними інтервалами

При однакових зовнішніх впливах арифметичні операції над інтервальними структурами виконуються з допомогою співвідношень:

$$F_x(x_1, *, d \cdot t) \circ F_x(x_2, *, d \cdot t) =$$

$$= [\mathbf{x}_{m1} \circ \mathbf{x}_{m2}, \mathbf{x}_{p1} \circ \mathbf{x}_{p2}]; \quad (6.5)$$

$$\mathbf{x}_1 \circ \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_2, *, d \cdot \mathbf{t}) = [\mathbf{x}_1 \circ \mathbf{x}_{m2}, \mathbf{x}_1 \circ \mathbf{x}_{p2}], \quad (6.6)$$

де $\circ \in \{+, -, \cdot, /\}$ – множина арифметичних операцій.

Інакше використовується нотація класичної інтервальної арифметики [38-42].

Із виразу (6.5) виникають співвідношення для розкладання однієї інтервальної структури на дві складові частини:

$$\mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2, ;, d\mathbf{t}) = \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_1, ;, d\mathbf{t}) + \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_2, ;, d\mathbf{t}); \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, f_1(\mathbf{t}) + f_2(\mathbf{t})) = \\ & = \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, f_1(\mathbf{t})) + \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, f_2(\mathbf{t})); \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_2, ;, f_1(\mathbf{t}) \cdot f_2(\mathbf{t})) = \\ & = \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_1, ;, f_1(\mathbf{t})) \cdot \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_2, ;, f_2(\mathbf{t})), \end{aligned} \quad (6.9)$$

де $f(\mathbf{t})$ – інтервальне розширення функції зовнішніх впливів.

Розкладання інтервальної структури на інтервал та інтервальну структуру відбувається, коли один із доданків або множників у виразах (6.7) – (6.9) стає дійсною величиною. Тоді утворюються співвідношення:

$$\mathbf{F}\mathbf{x}(1 + \mathbf{x}, ;, d \cdot \mathbf{t}) = d \cdot \mathbf{t} + \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, d \cdot \mathbf{t}); \quad (6.10)$$

$$\mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, 1 + f(\mathbf{t})) = \mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, f(\mathbf{t})); \quad (6.11)$$

$$\mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}, ;, f_1(\mathbf{t}) \cdot f_2(\mathbf{t})) = f_1(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_2, ;, f_2(\mathbf{t})); \quad (6.12)$$

$$\mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_2, ;, f(\mathbf{t})) = \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{x}_2, ;, f(\mathbf{t})). \quad (6.13)$$

Співвідношення (6.5) – (6.13) використовуються при перетвореннях моделей вихідних функцій електронних апаратів.

Вплив зовнішніх чинників на параметри елементів оцінюється з допомогою коефіцієнтів зовнішніх впливів. При виготовленні апаратури ці коефіцієнти також мають відхилення від номінальних значень і утворюють інтервальні величини. Тоді зовнішні впливи призводять до інтервальних значень параметрів елементів (рис. 5). 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.

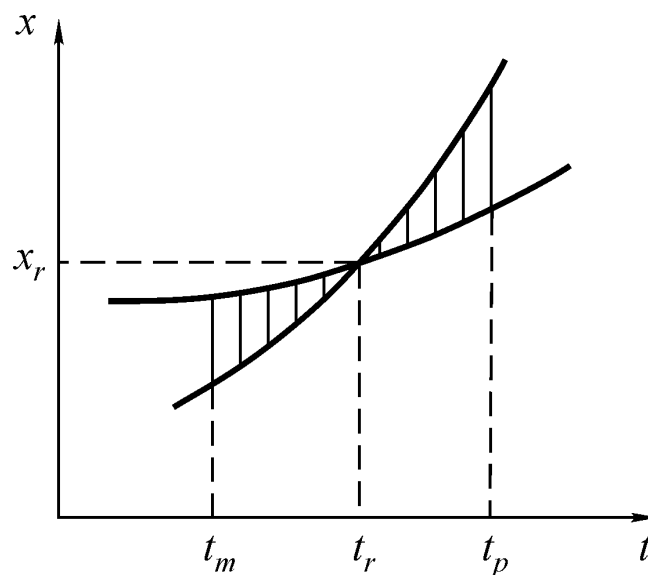


Рисунок 6.5 – Зміна параметрів елементів при інтервальних коефіцієнтах зовнішніх впливів

ВИЗНАЧЕННЯ 6.5. Гіллястою інтервальною структурою називається інтервал з межами у вигляді інтервальної структури:

$$\begin{aligned} Fx(x, *, Fy(d, \circ, t)) &= \\ &= [Fx(x, *d_m), Fx(x, *, d_p)], \end{aligned} \quad (6.14)$$

де $F_x, F_y \in \{F_i, F_b, F_c\}$ – множина операторів інтервальних структур;

$d = [d_m; d_p]$ – інтервал коефіцієнта зовнішніх впливів;

d_m та d_p – нижній та верхній інтервали інтервальної структури зовнішніх впливів.

Інтервали d_m та d_p формуються аналогічно інтервалам x_m та x_p . Гілляста інтервальна структура може бути однорідною, якщо в ній використовуються однакові оператори. Інакше структура стає змішаною. Якщо у виразі (6.14) зовнішні впливи задаються гіллястою інтервальною структурою, то тоді структура стає багатократною. Запис (6.14) відповідає подвійній інтервальній структурі.

З допомогою співвідношення (6.1) гіллясті інтервальні структури перетворюються до пар інтервалів. Процес перетворення має вигляд бінарного графа. У кроні графа гіллястої структури n -ої кратності міститься 2^n інтервалів. Подвійній інтервальній структурі (6.14) відповідає крона із двох пар інтервалів (рис. 6.6).

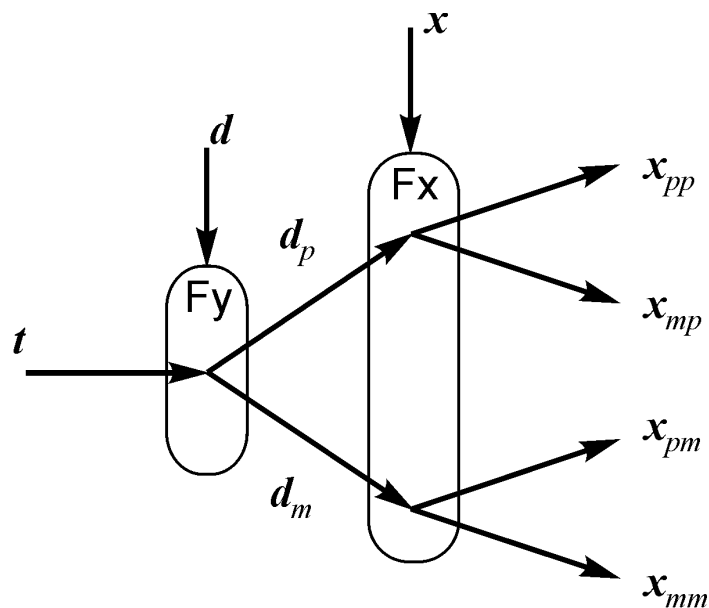


Рисунок 6.6 – Граф гіллястої інтервальної структури

Арифметичні операції над гіллястими інтервальними структурами виконуються з допомогою співвідношень:

$$\begin{aligned} Fx(x_1, *, Fy(d_1, \circ, t)) \bullet Fx(x_2, *, Fy(d_2, \circ, t)) &= \\ &= [Fx(x_1, *d_{m1}) \bullet Fx(x_2, *d_{m2}), \\ &Fx(x, *d_{p1}) \bullet Fx(x_2, *d_{p2})]; \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$\begin{aligned} Fx(x_1, *, t) \bullet Fx(x_2, *, Fy(d, \circ, t)) &= \\ &= [Fx(x_1, *, t) \bullet Fx(x_2, *d_m), \\ &Fx(x_1, *, t) \bullet Fx(x_2, *d_p)]; \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned} x_1 \bullet Fx(x_2, *, Fy(d, \circ, t)) &= \\ &= [x_1 \bullet Fx(x_2, *d_m), x_1 \bullet Fx(x_2, *d_p)], \end{aligned} \quad (6.17)$$

де $\bullet \in \{+, -, \cdot, / \}$ – множина арифметичних операцій.

Якщо в виразах (6.15), (6.16) використовуються різні види зовнішніх впливів, то в операціях віднімання і ділення застосовують нотації класичної інтервальної арифметики. Розкладання гіллястої інтервальної структури на дві структури можливо коли її основний параметр або зовнішні впливи задаються добутком інтервалів чи інтервальних структур:

$$\begin{aligned} Fx(x_1 + x_2, *, Fy(d, \circ, t)) &= \\ &= Fx(x_1, *, Fy(d, \circ, t)) + \\ &+ Fx(x_2, *, Fy(d, \circ, t)); \end{aligned} \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} Fx(x, *, Fy(d_1, \circ, f_1(t)) + Fy(d_2, \circ, f_2(t))) &= \\ &= Fx(x, *, Fy(d_1, \circ, f_1(t))) + \\ &+ Fx(x, *, Fy(d_2, \circ, f_2(t))); \end{aligned} \quad (6.19)$$

$$Fx(x_1 \cdot x_2, *, Fy(d_1, \circ, f_1(t)) \cdot Fy(d_2, \circ, f_2(t))) =$$

$$\begin{aligned}
&= Fx(x_1, *, Fy(d_1, \circ, f_1(t))) \times \\
&\times Fx(x_2, *, Fy(d_2, \circ, f_2(t))).
\end{aligned} \tag{6.20}$$

Розкладання двократної інтервальної структури на одно- і двократну витікає із співвідношень (6.18) – (6.20) при заміні одного з елементів на інтервал або дійсне число:

$$\begin{aligned}
&Fx(1+x, *, Fy(d, \circ, t)) = \\
&= Fy(d, \circ, t) + Fx(x, *, Fy(d, \circ, t));
\end{aligned} \tag{6.21}$$

$$\begin{aligned}
&Fx(x, *, f_1(t) + Fy(d_2, \circ, f_2(t))) = \\
&= Fx(x, \circ, f_1(t)) + Fx(x, *, Fy(d_2, \circ, f_2(t)));
\end{aligned} \tag{6.22}$$

$$\begin{aligned}
&Fx(x, *, Fy(d_1, \circ, f_1(t)) \cdot Fy(d_2, \circ, f_2(t))) = \\
&= Fy(d_1, \circ, f_1(t)) \cdot Fx(x, *, Fy(d_2, \circ, f_2(t)));
\end{aligned} \tag{6.23}$$

$$\begin{aligned}
&Fx(x_1 \cdot x_2, *, Fy(d, \circ, t)) = \\
&= x_1 \cdot Fx(x_2, *, Fy(d, \circ, t)).
\end{aligned} \tag{6.24}$$

Співвідношення (6.18) – (6.24) можуть використовуватись для декомпозиції інтервально-структурних рівнянь при розв'язанні задач компенсації зовнішніх впливів, вибору елементів та призначення допусків у випадках, коли параметри зовнішніх впливів є інтервальними величинами.

При обчисленні допусків на параметри елементів електронних апаратів без урахування зовнішніх впливів використовуються лінійні інтервальні моделі вихідних функцій, які мають вигляд:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i, \tag{6.25}$$

де y, x та a – інтервали вихідної функції, параметрів елементів та коефіцієнтів моделі;

n – кількість параметрів елементів.

Коефіцієнти інтервальної моделі утворюються при розкладанні нелінійних вихідних функцій електронних апаратів в ряд Тейлора в точках дотикання допусковою областю меж області працездатності.

Врахування впливу зовнішніх чинників на параметри елементів, як правило, проводиться з допомогою виразу:

$$x = x_0(1 + d \cdot t),$$

де x_0 – значення вхідного параметра при відсутності зовнішнього впливу.

Зовнішні впливи задаються нульмістивним інтервалом t . Якщо коефіцієнт зовнішніх впливів задається дійсним числом, то оцінювання вихідної функції (6.25) може проводитись з допомогою інтервально-структурного рівняння з плаваючими інтервалами:

$$\begin{aligned} \text{Fi}(y, ; 1 + d_y \cdot t) = \\ = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{Fi}(x_i, ; 1 + d_{x_i} \cdot t), \end{aligned} \quad (6.26)$$

де d_y і d_x – коефіцієнти зовнішніх впливів вихідної функції і параметрів елементів.

Формування допускових областей при інтервальному та інтервально-структурному оцінюванні надається на рис. 6.7, 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_p при межових значеннях зовнішніх впливів.

Із рис. 6.7 видно, що використання інтервальних структур дозволяє значно зменшити експлуатаційні відхилення вихідних функцій електронних апаратів без погіршення достовірності результату оцінювання.

Рівняння (6.22) з допомогою співвідношень (6.11) розкладаються на рівняння (6.25) та інтервально-структурне рівняння компенсації зовнішніх впливів:

$$d_y \cdot Fi(y, \cdot, t) = \sum_{i=1}^n d_{x_i} \cdot a_i \cdot Fi(x_i, \cdot, t). \quad (6.27)$$

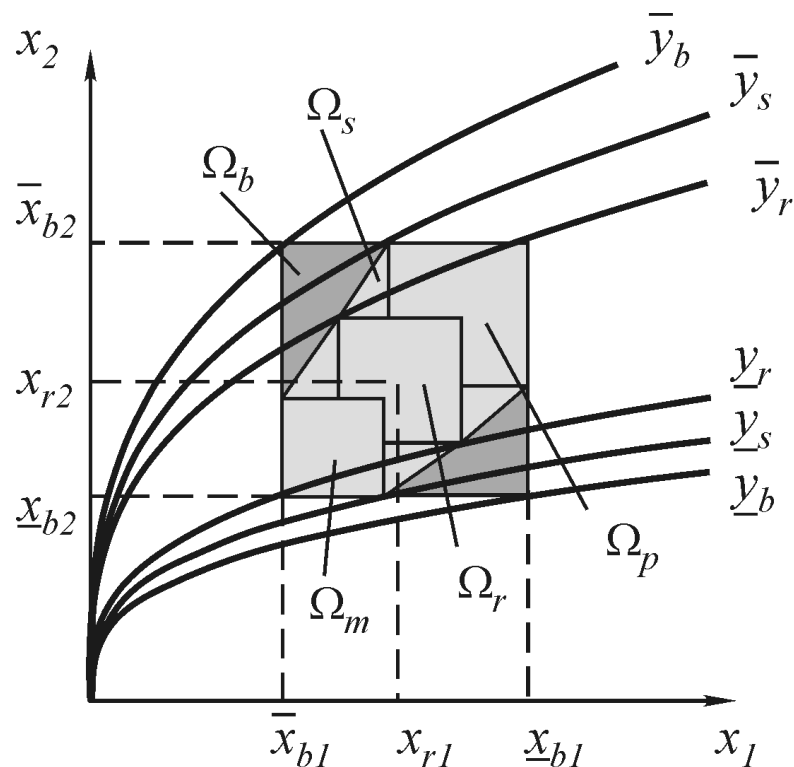


Рисунок 6.7 – Формування допускових областей при зовнішніх впливах

Інтервально-структурне рівняння (6.27) відображається у простір інтервальних величин двома інтервальними рівняннями:

$$d_y \cdot y_m = \sum_{i=1}^n d_{xi} \cdot a_i \cdot x_m ; \quad (6.28)$$

$$d_y \cdot y_p = \sum_{i=1}^n d_{xi} \cdot a_i \cdot x_p . \quad (6.29)$$

Чергове відображення рівнянь (6.28) – (6.29) в область дійсних чисел утворює чотири рівняння, які використовуються при виборі коефіцієнтів зовнішніх впливів. В процедурах вибору елементів можуть застосовуватись різні стратегії, які дозволяють досягнути оптимальних показників за одним параметром або їх групою. Можливо, наприклад, досягнення максимального об'єму простору факторів компенсації. Задача вирішується в ітераційному режимі з урахуванням експлуатаційних обмежень на вихідну функцію, які записуються у вигляді (6.25).

Після вибору коефіцієнтів зовнішніх впливів призначаються номінальні відхилення параметрів елементів. При цьому в область дійсних чисел відображається рівняння (6.25) і використовується процедура оптимізації допустимих відхилень параметрів.

Якщо коефіцієнти зовнішніх впливів задаються інтервальними величинами, то оцінювання вихідної функції проводиться рівняннями з гіллястими інтервальними структурами:

$$\begin{aligned} & \text{Fi}(y, ; 1 + \text{Fi}(d_y, ; t)) = \\ & = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{Fi}(x_i, ; 1 + \text{Fi}(d_{xi}, ; t)), \end{aligned}$$

де d_y та d_x – інтервали коефіцієнтів зовнішніх впливів вихідної функції та параметрів елементів.

Формування допускових областей при оцінюванні гіллястими інтервальними структурами відбувається аналогічно. Інтервальні коефіцієнти

зовнішніх впливів призводять до подальшого розширення допускових областей. Найбільший вплив відбувається на межу інтервальну область.

При виборі елементів також використовується розкладання інтервально-структурного рівняння вихідної характеристики радіоелектронного пристрою і виділення задачі компенсації зовнішніх впливів. Але відображення рівняння компенсації в область дійсних чисел призводить вже до восьми рівнянь. У зв'язку з цим можливо розширення видів стратегій вибору елементів.

6.2 Метод відображень для призначення інтервальних допусків на параметри елементів з урахуванням експлуатаційних навантажень на радіоелектронну апаратуру

Під час експлуатації радіоелектронної апаратури відбуваються незворотна або зворотна зміна параметрів елементів, що обумовлено старінням або дією зовнішніх чинників [26]:

$$x = x_r f(Z),$$

де x_r – номінальне значення параметра елемента;

$f(Z)$ - сумісна функція відносного значення параметра при зовнішніх впливах;

$Z = \{z_1, \dots, z_q\}$ – множина величин зовнішніх впливів;

q – кількість зовнішніх впливів, враховуючи старіння елементів.

Найчастіше розглядається взаємозалежний вплив зовнішніх факторів на кожний з параметрів елементів. Приклад такої залежності показано на рис. 6.8, де позначено: z_r, z_m та z_p – номінальне, нижнє та верхнє значення

зовнішнього фактору; $\underline{x}_m, \bar{x}_m, \underline{x}_p$ та \bar{x}_p – нижні та верхні межові значення параметра при зовнішніх факторах z_m та z_p . Заштриховані області враховують технологічний розкид впливу зовнішнього фактору на параметр елемента.

Для оцінювання зміни параметрів елементів кожний з ділянок кривих на рис. 6.8 можна апроксимувати лінійною функцією:

$$x = x_r(1 + c \cdot w_z), \quad (6.30)$$

де c – коефіцієнт зовнішніх впливів;

w_z – зміна зовнішнього впливу на відповідній ділянці кривої.

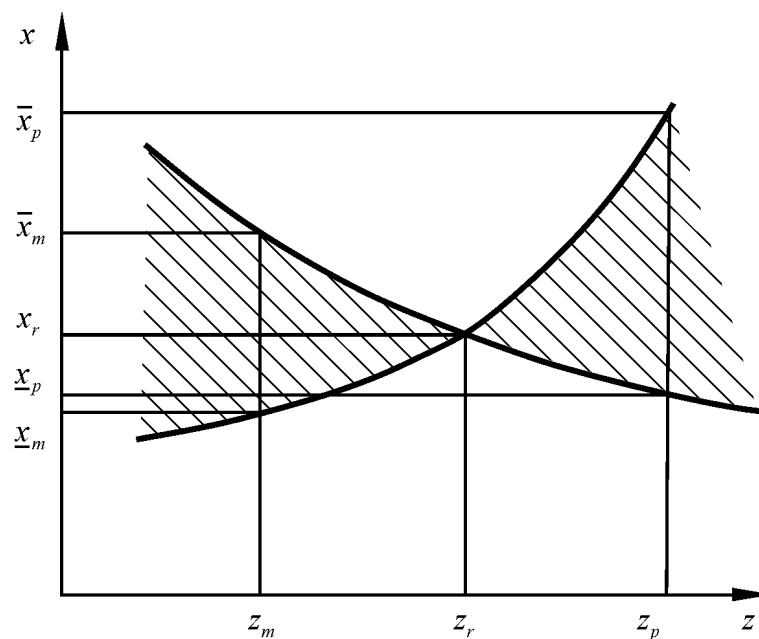


Рисунок 6.8 – Взаємозалежний вплив зовнішніх факторів.

Вираз (6.30) може бути використаний при інтервальному та інтервально-структурному оцінюванні змін параметра елемента [248]. З урахуванням технологічного розкиду інтервальна оцінка змін параметра елемента має вид:

$$x_e = x_r \cdot d_e, \quad (6.31)$$

де $\mathbf{x}_e = [\underline{x}_e; \bar{x}_e]$ та $\mathbf{x}_r = [\underline{x}_r; \bar{x}_r]$ – інтервали експлуатаційний та номінальної зміни параметра елемента;

$\mathbf{d}_e = [\underline{d}_e; \bar{d}_e]$ – інтервал відносної зміни параметра при зовнішньому впливі;

$\underline{x}_e, \bar{x}_e, \underline{x}_r, \bar{x}_r, \underline{d}_e$ та \bar{d}_e – нижні та верхні межі інтервалів $\mathbf{x}_e, \mathbf{x}_r$ і \mathbf{d}_e .

Межі інтервалу \mathbf{d}_e визначаються з допомогою співвідношень:

$$\underline{d}_e = \inf\{\underline{d}_m, \bar{d}_m, \underline{d}_p, \bar{d}_p\}; \quad \bar{d}_e = \sup\{\underline{d}_m, \bar{d}_m, \underline{d}_p, \bar{d}_p\},$$

де $\underline{d}_m = 1 + \underline{c}_m w_{zm}, \bar{d}_m = 1 + \bar{c}_m w_{zm}, \underline{d}_p = 1 + \underline{c}_p w_{zp}, \bar{d}_p = 1 + \bar{c}_p w_{zp}$;

$\underline{c}_m, \bar{c}_m, \underline{c}_p$ та \bar{c}_p – нижні та верхні значення інтервалів зміни коефіцієнтів зовнішніх впливів при зовнішніх факторах z_m та z_p ;

$w_{zm} = z_m - z_r$ та $w_{zp} = z_p - z_r$ – нижнє та верхнє приращення зовнішнього впливу.

Одночасний вплив декількох зовнішніх факторів враховується представленням інтервалів відносної зміни параметра у вигляді добутку:

$$\mathbf{d}_e = \prod_{j=1}^q \mathbf{d}_{ej}, \quad (6.32)$$

де \mathbf{d}_{ej} – інтервал відносної експлуатаційної зміни параметра при j -ому зовнішньому факторі.

У випадку необхідності можна оцінювати діапазон зміни параметра при межових значеннях зовнішніх факторів. Для цього використовуються інтервальні структури з плаваючими інтервалами [248]:

$$\text{Fi}(\mathbf{x}_r, \cdot, \mathbf{d}_e) = [\mathbf{x}_s; \mathbf{x}_a], \quad (6.33)$$

де $x_s = x_r \underline{d}_e$ і $x_a = x_r \bar{d}_e$ – нижня та верхня інтервальні межі інтервальної структури з плаваючими інтервалами.

Вирази (6.31) – (6.33) відповідають взаємозалежній дії зовнішніх факторів на елемент та надають можливість проводити оцінки інтервалів зміни параметрів елементів в процесі експлуатації. Для оцінювання інтервалів зміни вихідних функцій радіоелектронних апаратів необхідно враховувати, що кожний з зовнішніх факторів впливає одночасно на всі елементи. Ця особливість може враховуватись при формуванні інтервальних моделей вихідних функцій, які використовуються для призначення допусків.

Формування меж області працездатності та допускових областей з урахуванням одночасної дії зовнішніх факторів показано на рис. 6.8, де Ω_w – область працездатності; Ω_r – допускова область при нормальних умовах оточуючого середовища на початку експлуатації; Ω_{mi} та Ω_{pi} – допускові області при нижньому та верхньому значенні зовнішнього впливу z_{mi} та z_{pi} ; $\Omega_{m(p)i, m(p)j}$ – допускова область при одночасному впливі відповідних межових значеннях зовнішніх факторів z_1 та z_2 . Межові гіперповерхні y_r та y_e обмежують область працездатності при нормальних умовах оточуючого середовища та при самому несприятливому поєднанні зовнішніх впливів. Область працездатності обмежується гіперповерхнями y_a при формуванні допускової області Ω_a з допомогою співвідношень (6.31) – (6.32) без врахування одночасної дії кожного фактору на всі елементи радіоелектронного пристрою [251-252].

При призначенні допусків формуються інтервальні моделі вихідних функцій, що уявляють собою дотичні гіперплощини до межі області працездатності в межовій вершині допускової області [20]. На рис. 6.9 дотичні гіперплощини при нормальних умовах навколишнього середовища мають позначення \underline{S}_r та \bar{S}_r .

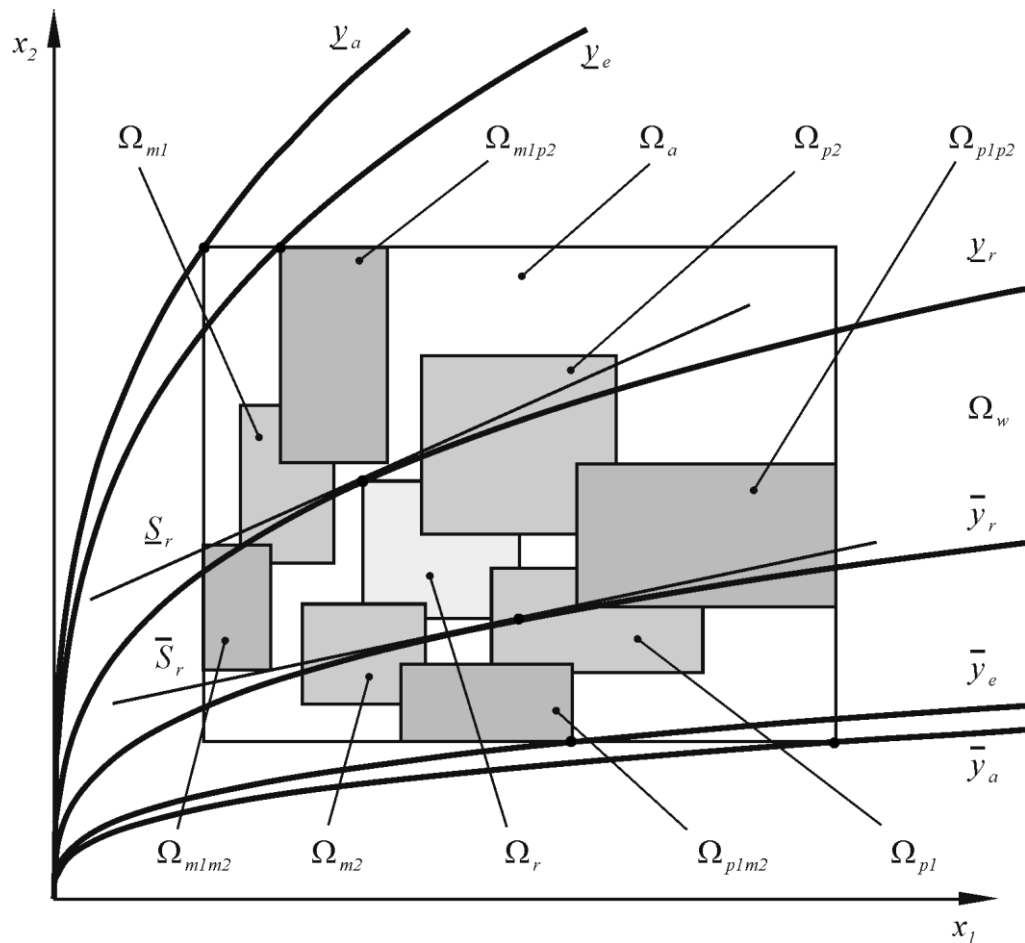


Рисунок 6.9 – Формування меж області працездатності та допускових областей з урахуванням одночасної дії зовнішніх факторів

Зовнішні впливи перетворюють координати вершин допускової області, в результаті чого рівняння гіперплощини приймає вид:

$$y = a_{r0} + \sum_{i=1}^n a_{ri} x_{ri} d_i, \quad (6.34)$$

де $y = [\underline{y}; \bar{y}]$ – інтервал зміни вихідної функції;

$$a_{ai} = [a_{ai}; \bar{a}_{ai}] = \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X_b}, \quad a_{r0} = y_b - \sum_{i=1}^n a_{ri} x_{bi} \quad - \quad \text{інтервальні коефіцієнти}$$

розкладання вихідної функції в ряд Тейлора при номінальних відхиленнях параметрів;

$\mathbf{y}_b = y(\mathbf{X}_b)$; $\mathbf{X}_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – множина інтервалів параметрів елементів, які відповідають точкам дотику вершин допускової області та меж області працездатності;

$d_i = [d_i; \bar{d}_i]$ – інтервал відносної зміни параметрів елементів при нижньому та верхньому значеннях вихідної функції;

n – кількість елементів.

Формування відносної зміни параметрів елементів проводиться з врахуванням інтервальних коефіцієнтів зовнішніх впливів, одночасної дії зовнішніх факторів на всі елементи радіоелектронного апарата за місцем їх розташування та самого несприятливого поєднання зовнішніх факторів. Процедура проводиться для кожної з межових точок допускової області.

При нижньому межовому значенні вихідної функції та нижніх приростах зовнішніх впливів відносна зміна кожного параметра визначається з допомогою співвідношень:

$$h_{mij} = \begin{cases} \underline{d}_{mij}, & y(\underline{X}_r)|_{x_{ri}=\underline{x}_{ri}} \underline{d}_{mij} \leq y(\underline{X}_r)|_{x_{ri}=\underline{x}_{ri}} \bar{d}_{mij}; \\ \bar{d}_{mij}, & \text{інаше} \end{cases}, \quad (6.35)$$

де $\underline{d}_{mij} = 1 + \bar{c}_{mijk_{zmij}w_{zmj}}$, $\bar{d}_{mij} = 1 + \bar{c}_{mijk_{zmij}w_{zmj}}$ – нижня та верхня відносна зміна i -го параметра при нижньому значенні j -го зовнішнього фактору;

$k_{zmij} = w_{zmij} / w_{zmj}$ – коефіцієнт установки елемента;

w_{zmij} – нижній приріст зовнішнього впливу на i -ий елемент при дії на апаратуру w_{zmj} ;

$\underline{X}_r = \{\underline{x}_{r1}, \dots, \underline{x}_{rm}\}$ – множина координат межової вершини номінальної допускової області при нижньому межовому значенні вихідної функції.

Аналогічно визначаються відносні зміни h_{rij} при зовнішніх впливах w_{zpj} .

Із отриманих відносних змін параметрів вибираються межові значення, що призводять до найменшого значення вихідної функції:

$$\underline{d}_{ij} = \begin{cases} \underline{h}_{mij}, & y(\underline{X}_{mj}) \leq y(\underline{X}_{pj}); \\ \overline{h}_{pij}, & \text{іначе} \end{cases}, \quad (6.36)$$

де $\underline{X}_{mj} = \{x_{m1j}, \dots, x_{mnj}\}$ та $\underline{X}_{pj} = \{x_{p1j}, \dots, x_{pnj}\}$ – множина координат межової вершини допускової області при нижньому та верхньому прирості зовнішнього впливу;

$$\underline{x}_{mij} = \underline{x}_r \underline{h}_{mij}, \quad \underline{x}_{pij} = \underline{x}_r \overline{h}_{pij}.$$

Загальна відносна зміна параметрів елементів при найнесприятливішому поєднанні зовнішніх впливів визначається добутком:

$$\underline{d}_i = \prod_{j=1}^q \underline{d}_{ij}. \quad (6.37)$$

Співвідношення (6.37) використовується при визначенні межових значень параметрів:

$$\underline{x}_{di} = \underline{x}_{ri} \underline{d}_i, \quad (6.38)$$

яке надає можливість визначити нижнє граничне значення вихідної функції при зовнішніх впливах:

$$\underline{y}_d = y(\underline{X}_d), \quad (6.39)$$

де $\underline{X}_d = \{x_{d1}, \dots, x_{dn}\}$ – множина координат межової точки при найнесприятливіше поєднання зовнішніх впливів.

Відносна зміна параметрів елементів та граничне верхнє значення вихідної функції визначаються аналогічно. Таким чином, співвідношення (6.35)

– (6.39) можуть використовуватись для аналізу відхилень вихідних функцій при найнесприятливіше поєднання зовнішніх впливів. Задача синтезу номінальних допусків розв'язується з використанням співвідношення (6.34) для сформованої інтервальної моделі відносних змін параметрів (6.37).

При призначенні номінальних допусків з урахуванням зовнішніх впливів задаються номінальні значення основних параметрів елементів x_{ri} , інтервали зміни зовнішніх факторів z_j , інтервальні коефіцієнти зовнішніх впливів c_{mij} та c_{rij} при нижньому та верхньому значенні зовнішніх факторів z_{mj} та z_{pj} , а також коефіцієнти установки елементів k_{zmij} та k_{zrij} , що враховують значення зовнішніх впливів безпосередньо за місцем установки елементів. Область працездатності може задаватися одним з межових експлуатаційних значень вихідної функції або допустимою шириною інтервалу зміни вихідної функції.

У зв'язку з нелінійністю вихідних функцій радіоелектронних апаратів використовуються ітераційні алгоритми. Начальні наближення призначаються з умови, що номінальні значення параметрів елементів при зовнішніх впливах співпадають з їх заданими значеннями при нормальних умовах експлуатації. Координати межових точок, що отримано в результаті призначення допусків при цих умовах, перераховуються до нормальних умов експлуатації, що надає можливість визначити номінальні межі області працездатності та призначити номінальні допуски в першому наближенні. Формування номінальних допускових областей з урахуванням зовнішніх впливів показано на рис. 6.10, де позначено: $\Omega_d^{(0)}$ – початкова допускова область при зовнішніх впливах; $\Omega_r^{(1)}$ – перше наближення номінальної допускової області; $\underline{B}_d^{(0)}$, $\underline{B}_r^{(0)}$, $\underline{B}_d^{(1)}$ та $\underline{B}_r^{(1)}$ – точки дотику області працездатності та допускової області в початковому та першому наближеннях при зовнішніх впливах та нормальних умовах експлуатації; $y_d^{(1)}$ – межа гіперповерхня області працездатності при зовнішніх впливах в першому наближенні. Стрілками показано напрямки відображення межових точок з допомогою співвідношень (6.38).

Межове значення вихідної функції y_d , що отримано після відображення межевої точки B_r до точки B_d , відрізняється від заданого експлуатаційного значення на величину:

$$\Delta y_d = y_d - y_e. \quad (6.40)$$

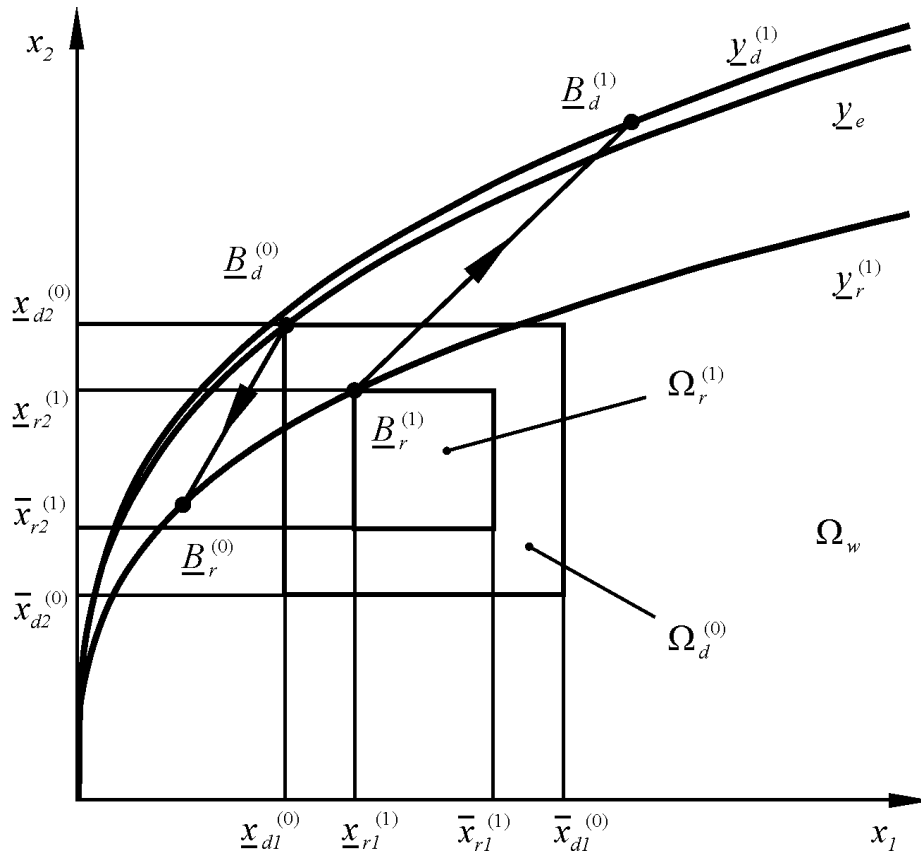


Рисунок 6.10 – Формування номінальних допускових областей з урахуванням зовнішніх впливів.

Прирощення (6.40) відповідає похибки визначення номінального межевого значення вихідної функції:

$$\Delta y_r = \Delta y_d / d_y, \quad (6.41)$$

де Δy_r – похибка визначення нижнього межового значення вихідної функції при нормальних умовах експлуатації;

$\underline{d}_y = \underline{y}_d / \underline{y}_r$ – відносна зміна нижнього межового значення вихідної функції в процесі експлуатації.

Співвідношення (6.40) – (6.41) надають можливість при заданому нижньому експлуатаційному значенню вихідної функції розробити процедуру призначення номінальних допусків з урахуванням зовнішніх впливів у вигляді алгоритму:

Крок 1. Визначаються межові значення параметрів елементів $\underline{x}_{di}^{(0)}$ виходячи з межового експлуатаційного значення вихідної функції \underline{y}_e та номінальних параметрів елементів x_{ri} . Використовується алгоритм призначення інтервальних допусків з заданим критерієм оптимізації [239, 253].

Крок 2. Біля граничної точки $\underline{B}_d^{(0)}$ визначаються відносні зміни параметрів елементів \underline{d}_i при найнесприятливішому поєднанні зовнішніх факторів. Використовуються співвідношення (6.35) – (6.37).

Крок 3. Координати граничних точок $\underline{x}_{di}^{(0)}$ відображаються до нормальних умов навколишнього середовища, та визначається номінальне граничне значення вихідної функції в першому наближенні:

$$\underline{x}_{ri}^{(0)} = \underline{x}_{di}^{(0)} / \underline{d}_i; \quad \underline{y}_r^{(1)} = y(\underline{X}_r^{(0)}),$$

де $\underline{X}_r^{(0)} = \{\underline{x}_{r1}^{(0)}, \dots, \underline{x}_{rn}^{(0)}\}$ – множина координат граничної точки $\underline{B}_r^{(0)}$.

Крок 4. Перевіряється можливість реалізації алгоритму при заданому граничному експлуатаційному значенні вихідної функції та заданих коефіцієнтах зовнішніх впливах. Для цього перевіряється умова:

$$\underline{y}_r^{(1)} < y_r,$$

де $y_r = y(X_r)$ – номінальне значення вихідної функції.

Якщо умова виконується, то – кінець алгоритму та вивід повідомлення про неможливість реалізації.

Крок 5. Призначаються номінальні інтервальні допуски при граничних значеннях вихідної функції $\underline{y}_r^{(k)}$ та визначаються номінальні граничні значення параметрів елементів $\underline{x}_{ri}^{(k)}$. Використовується алгоритм призначення інтервальних допусків [239, 253].

Крок 6. Визначаються граничні значення параметрів елементів та вихідної функції при зовнішніх впливах:

$$\underline{x}_{di}^{(k)} = \underline{x}_{ri}^{(k)} \underline{d}_i; \quad \underline{y}_d^{(k)} = y(\underline{X}_d^{(k)}).$$

Крок 7. Визначається відносна зміна граничного значення вихідної функції та уточнюється її граничне номінальне значення:

$$\underline{d}_y^{(k)} = \underline{y}_d^{(k)} / \underline{y}_r^{(k)}; \quad \underline{y}_r^{(k)} = \underline{y}_r^{(k-1)} - (\underline{y}_d^{(k)} - \underline{y}_e) / \underline{d}_y^{(k)}.$$

Крок 8. Перевіряється умова завершення алгоритму:

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

де ε – похибка обчислень.

При виконанні умови – кінець алгоритму. Інакше – перехід до кроку 5. •

Номинальні відхилення параметрів при іншому граничному експлуатаційному значенні вихідної функції призначаються аналогічно або обчислюються виходячи з заданого коефіцієнта асиметрії допусків. Якщо призначення допусків проводиться при заданій ширині експлуатаційного інтервалу вихідної функції, то прирощення (6.40), (6.41) замінюються виразами:

$$\Delta w_{yd} = w_{yd} - w_{ye}; \quad \Delta w_{yr} = \Delta w_{yd} / d_{yw},$$

де $w_{yd} = \bar{y}_d - \underline{y}_d$ – ширина інтервалу вихідної функції при зовнішніх впливах;

$w_{ye} = \bar{y}_e - \underline{y}_e$ – задана експлуатаційна ширина інтервалу вихідної функції;

$d_{yw} = w_{yd} / w_{yr}$ – відносна зміна ширини інтервалу вихідної функції при зовнішніх впливах;

$w_{yr} = \bar{y}_r - \underline{y}_r$ – номінальна ширина інтервалу вихідної функції при нормальних значеннях зовнішніх факторів.

Структура алгоритму призначення номінальних інтервальних допусків при заданій експлуатаційній ширині інтервалу вихідної функції не змінюється. Слід тільки враховувати, що в п.1 та п.5 використовується алгоритм призначення інтервальних допусків при заданій ширині інтервалу вихідної функції [253], а граничні значення параметрів та вихідних функцій визначаються для обох меж області працездатності. Можливість реалізації та завершення алгоритму перевіряється умовами:

$$w_{yr} < 0; \quad \left| \frac{w_{yd}^{(k)} - w_{ye}}{w_{ye}} \right| \leq \varepsilon.$$

В обох алгоритмах слід також враховувати, що відносна зміна параметрів елементів при зовнішніх впливах $d_i > 0$. Запропоновані алгоритми можуть

використовуватись для вибору параметрів елементів в процесі проектування радіоелектронних пристроїв.

Застосування запропонованого метода проілюстровано розрахунком номінальних допусків на елементи смугового фільтра (рис. 6.11). Забезпечувалась задана ширина відхилень добротності [224]:

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

Фільтр мав номінальне значення добротності $Q_r = 10$ при нормованих номінальних значеннях параметрів $R_{r1} = 0,2$, $R_{r2} = 1$, $R_{r3} = 5$, $C_{r1} = 0,2$, $C_{r2} = 1$. Задавалась загальна ширина відхилень добротності $w_Q = 10\%$. Температурні коефіцієнти опору резисторів в діапазоні температур від $-40\text{ }^\circ\text{C}$ до $20\text{ }^\circ\text{C}$ мали значення $\pm 150 \cdot 10^{-6}$ 1/К, а в діапазоні температур від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $60\text{ }^\circ\text{C}$ – значення $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Температурні коефіцієнти ємності конденсаторів у всьому діапазоні зміни температури задавались величинами $-(150 \pm 40) \cdot 10^{-6}$ 1/К. Коефіцієнти старіння резисторів мали значення $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ 1/год., а конденсаторів $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ 1/год. Час напрацювання фільтра складав 25000 годин.

Результати призначення допусків на параметри елементів фільтра при максимальному об'ємі допускової області наведено в табл. 6.1.

З таблиці видно, що кожен із зовнішніх факторів поглинає біля 30 % загального ресурсу допусків, що визначено у відсутності зовнішніх впливів. Зменшення загальної ширини відхилення добротності на таку ж величину призводить до результуючого відхилення параметрів елементів порядку $\pm 0,1\%$.

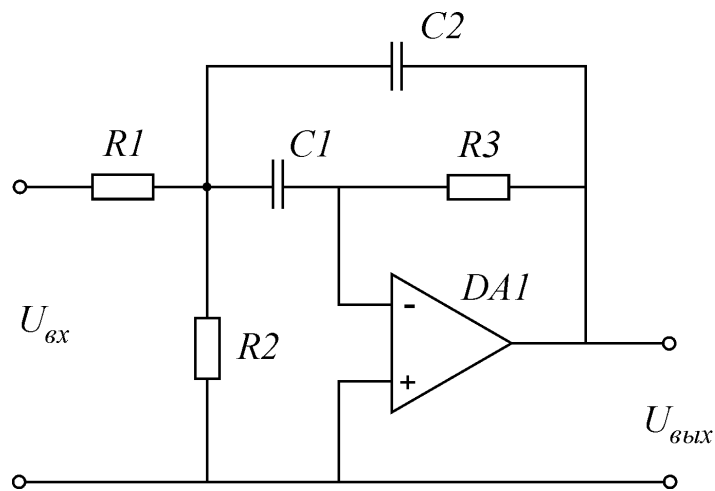


Рисунок 6.11 – Схема електрична принципова полосового фільтру

Таблиця 6.1 – Результати обчислення допусків

Зовнішні впливи	Відхилення параметрів, $\pm \delta_i$ %				
	$R1$	$R2$	$R3$	$C1$	$C2$
Відсутні	1,198	3,000	2,000	3,003	2,999
Температура	0,801	2,004	1,336	2,005	2,004
Старіння	0,799	2,000	1,333	2,001	1,999
Температура та старіння	0,401	1,004	0,669	1,004	1,004

Подальше зменшення загальної ширини відхилень вихідної функції до 5 % можливо тільки за рахунок зменшення коефіцієнтів зовнішніх впливів. Така можливість існує для температурних коефіцієнтів параметрів елементів. Використання температурних коефіцієнтів групи МП0 зменшує загальну ширину відхилення добротності до 5% при відхиленнях параметрів елементів порядку $\pm 0,1$ %.

Звичайно значення відносних відхилень задаються в технічних умовах на електрорадіоелементи для певного граничного значення зовнішнього фактора. Виключення становлять зміни температури, вплив якої розраховується за допомогою співвідношення:

$$\delta = cz, \quad (6.41)$$

де c – температурний коефіцієнт основного параметра;

z – зміна температури від нормального до граничного значень.

Аналіз існуючої елементної бази показує, що підприємства-виробники для кожного типу електрорадіоелемента пропонують обмежену множину стандартних значень номінальних відхилень і температурних коефіцієнтів основного параметра. Цінові характеристики формуються відповідно до номенклатури елементів і деяким значенням експлуатаційних відхилень можуть відповідати кілька значень температурних коефіцієнтів і, відповідно, вартості. Зокрема, збільшення температурних коефіцієнтів необов'язково приводить до зменшення вартості електрорадіоелемента. Зв'язане це, очевидно, з тим, що забезпечення малих номінальних відхилень приводить до більших витрат при виробництві. Ці особливості цінових характеристик слід урахувати при виборі елементів.

При великій кількості елементів у радіоелектронному пристрої існує можливість оптимізації допускових областей [246]. Урахування цінових показників може здійснюватися в стратегіях мінімальної вартості й ціна/якість.

Завдання призначення допусків, що забезпечують мінімальну вартість апаратури при заданій елементній базі, ставитися як оптимізаційна задача для цільової функції, можна урахувати також старіння елементів і можливі впливи на апаратуру зовнішніх факторів. Мінімальна вартість апаратури забезпечується з використанням співвідношення:

$$\delta_j = \frac{b}{a_j x_{rj}} \left(\sum_{i=1}^n \frac{P_i - p_{0i}}{P_j - p_{0j}} \right)^{-1} \quad j = \overline{1, n} \quad (6.42)$$

У зв'язку з нелінійністю вихідної функції й цінових характеристик вираз (6.42) використовується в ітераційному алгоритмі. У якості початкового наближення вибирається допускова область максимального об'єму або рівних допусків [246]. Отримані відхилення розглядаються як експлуатаційні. Це дозволяє за ціновими характеристиками вибирати параметри, необхідні для розрахунків допусків мінімальної вартості (6.42).

Перетворення допускових областей при призначенні допусків показано на рисунку 6.12, де $\Omega_e^{(0)}$ й $\Omega_e^{(1)}$ – початкове й перше наближення допускової області; y_e і δ_{ei} – граничні експлуатаційні значення вихідної функції й відхилень параметрів елементів. Таким чином, формується одне із граничних відхилень кожного параметра. Інше граничне значення встановлюється по заданім співвідношенню між верхнім і нижнім допустимими відхиленнями.

Двосторонні обмеження на вихідну функцію приводять до неповного використання області працездатності або до неоднозначності у виборі елементів. Ці протиріччя усуваються, коли задаються не граничні значення вихідної функції, а ширина інтервалу її зміни $w_y = \bar{y} - \underline{y}$. Ця величина може записуватися у вигляді співвідношення:

$$w_y = \bar{a}_0 - \underline{a}_0 + \sum_{i=1}^n x_{ri} d_i (\bar{a}_i - \underline{a}_i) + \sum_{i=1}^n x_{ri} \bar{\delta}_i (\bar{a}_i + \xi_i \underline{a}_i), \quad (6.43)$$

де $\bar{a}_0, \underline{a}_0, \underline{a}_i$ і \bar{a}_i – коефіцієнти розкладання в ряд Тейлора при верхньому й нижньому граничних значеннях вихідної функції.

$\xi_i = -\bar{\delta}_i / \bar{\delta}_i$ – коефіцієнт несиметричності відхилень параметрів;

$\bar{\delta}_i$ і $\underline{\delta}_i$ – нижнє й верхнє значення відхилень параметрів.

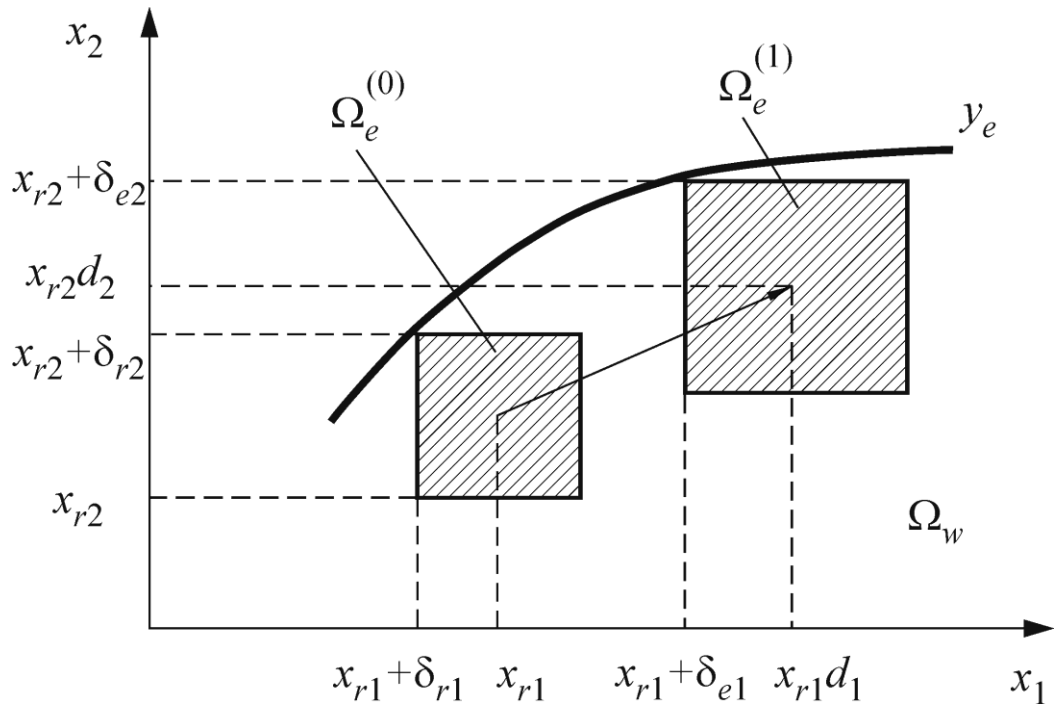


Рисунок 6.12 – Перетворення допускових областей при призначенні допусків

Умови мінімальної вартості (6.41) для вихідної функції (3.43) приймають вигляд:

$$x_{ri}(\bar{a}_i + \xi_i \underline{a}_i) p_{1j} = p_{1i} x_{rj}(\bar{a}_j + \xi_j \underline{a}_j). \quad (6.44)$$

Призначення допусків при обмеженнях на ширину інтервалу зміни вихідної функції проводиться за допомогою співвідношень:

$$\bar{\delta}_j = \frac{b_w}{x_{rj}(\bar{a}_j + \xi_j \underline{a}_j)} \left(\sum_{i=1}^n \frac{P_i - p_{0i}}{P_j - p_{0j}} \right)^{-1}, \quad j = \overline{1, n} \quad (6.45)$$

де $b_w = w_y - (\bar{a}_0 - \underline{a}_0) - \sum_{i=1}^n x_{ri} d_i (\bar{a}_i - \underline{a}_i)$.

Вирази (6.42)-(6.45) приводять до дійсних значень допустимих відхилень. Для переходу до стандартизованих відхилень ці значення допусків ранжуються

по їхній відносній близькості до стандартних значень. З отриманої множини вибирається найменший елемент, а відповідне йому відхилення округляється до стандартного значення. Для інших параметрів процедура призначення допусків повторюється.

На базі методу відображень створено алгоритми допускового проектування для різних стратегій оптимізації. Застосування різних стратегій проектування для вибору варіантів реалізації електронних схем показано на прикладі фільтра нижніх частот.

Коефіцієнт стратегій [258], який визначався як добуток нормованих значень показників цільових функцій кожної стратегії використовувався для вибору схем фільтрів нижніх частот, які можуть реалізуватися за неінвертуючою (рис. 6.12,а) та інвертуючою (рис. 6.12,б) схемами [223, 224].

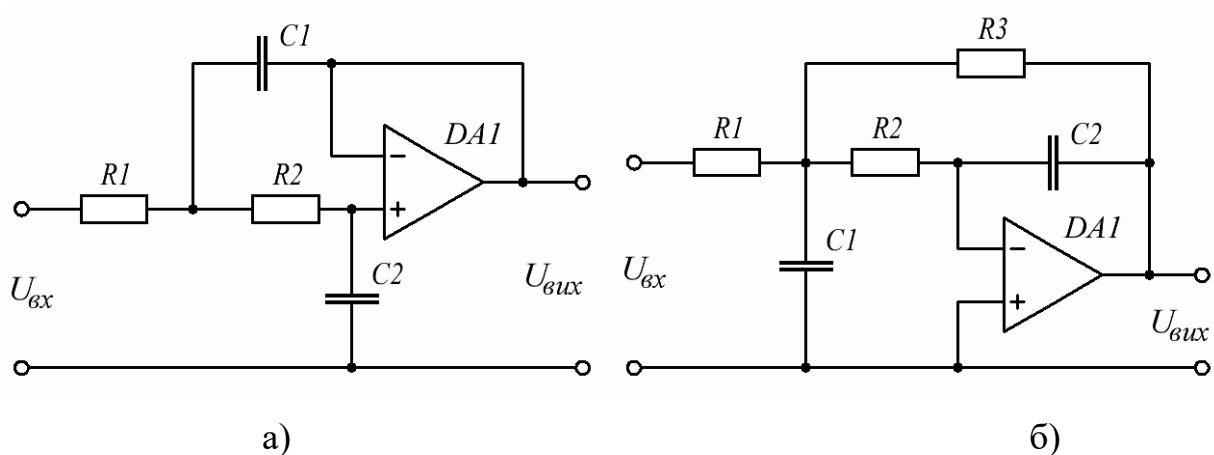


Рисунок 6.13 – Схеми фільтрів нижніх частот

Обидві схеми фільтрів забезпечували частоту зрізу смуги пропускання $f_D=120$ Гц і загасання $a=1\pm 1\%$ на частоті 50 Гц. Неінвертуючий фільтр нижніх частот мав номінальні параметри елементів $R_1 = 5,76$ кОм; $R_2 = 15,4$ кОм; $C_1 = 0,18$ мкФ; $C_2 = 0,068$ мкФ, а інвертуючий фільтр мав параметри $R_1 = 35,7$ кОм; $R_2 = 30,9$ кОм; $R_3 = 35,7$ кОм; $C_1 = 0,068$ мкФ; $C_2 = 0,015$ мкФ.

Використовувалися елементи для поверхневого монтажу. Температурні коефіцієнти опорів резисторів у діапазоні температур від -70°C до 20°C

мали значення $\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, а в діапазоні температур від 20°C до 45°C – значення $\pm 25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Температурні коефіцієнти ємності конденсаторів у всьому діапазоні зміни температури задавалися величинами $(0 \pm 30) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Коефіцієнти старіння резисторів мали значення $\pm 2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/годину}$, а конденсаторів $\pm 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/годину}$. Час напрацювання фільтра становив 30000 годин. Підтримувалася точність обчислень $1 \cdot 10^{-6}$. Цінові характеристики елементів визначалися за двома точками, параметри яких надаються у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Цінові характеристики електрорадіоелементів

Елемент	Номінальне значення	Точка визначення			
		1		2	
		$P, \text{ у.о.}$	$\delta, \%$	$P, \text{ у.о.}$	$\delta, \%$
$R, \text{ кОм}$	1-1000	0.65	0.05	0.14	2
$C, \text{ мкФ}$	0,015	1.906	1	0.14	20
$C, \text{ мкФ}$	0,068	1.624	1	0.326	20
$C, \text{ мкФ}$	0,18	1.525	1	0.26	20

Загасання фільтра обчислювалося з допомогою співвідношення:

$$a = \left| 1 + b_1 p + b_2 p^2 \right|,$$

де $p = j\omega$ – комплексна частота;

$$\omega = 2\pi f ;$$

$$j = \sqrt{-1} ;$$

b_i – коефіцієнти вихідної функції.

Для неінвертуючого фільтра нижніх частот коефіцієнти b_i визначалися за допомогою співвідношень:

$$b_1 = (R_1 + R_2)C_2 ; \quad b_2 = R_1 R_2 C_1 C_2 .$$

Коефіцієнти вихідної функції для інвертуючого фільтра нижніх частот мали вигляд:

$$b_1 = R_1 C_2 \left(1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_3}{R_1} \right) ; \quad b_2 = R_1 R_2 C_1 C_2 .$$

Призначення допусків проводилося для різних схем фільтрів і різних стратегій при нижньому і верхньому значеннях загасання фільтрів. У обох схемах фільтрів менші допустимі відхилення параметрів формувалися при верхньому обмеженні вихідної функції.

Результати обчислення номінальних допустимих відхилень параметрів елементів неінвертуючого фільтра нижніх частот для різних стратегій проектування надаються в табл. 6.3.

За цими результатами проводити вибір стратегії досить складно, оскільки не визначається узагальненого критерію проектування. Тому для вибору стратегії проектування обчислювалась матриця коефіцієнтів основних параметрів k_{ij} кожної стратегії, які для неінвертуючого фільтра надаються в табл. 6.4.

Таблиця 6.3 – Допустимі номінальні відхилення параметрів неінвертуючого фільтра

Стратегія	Відхилення параметрів δ , %			
	R_1	R_2	C_1	C_2
δ	1.507			
V	2.935	1.975	1.236	1.026
P	0.763	0.556	2.037	1.829
P/V	2.640	1.770	1.350	1.140

Таблиця 6.4 – Матриця основних параметрів стратегій призначення допусків неінвертуючого фільтра

Стратегія	Параметри			
	$k_{\delta i}$	$k_{V i}$	$k_{P i}$	$k_{P/V i}$
δ	1	0.701	0.932	0.779
V	1.190	1	0.818	0.976
P	0.860	0.215	1	0.256
P/V	1.145	0.979	0.857	1

Табл. 6.4 використовувалася для обчислення коефіцієнтів стратегій за допомогою співвідношень. Аналогічні обчислення проведені для інвертуючого фільтра. Результати цих обчислень надаються в табл. 6.5, яка дозволяє вибрати найбільш привабливу стратегію проектування.

За стратегією рівних допусків інвертуюча схема фільтра має переваги над неінвертуючою схемою. Усі інші критерії надають переваги неінвертуючій схемі фільтра. Але для обох фільтрів найпривабливішою є стратегія ціна/якість. Неінвертуючий фільтр дозволяє використовувати і V-стратегію без суттєвого зменшення коефіцієнта стратегії.

Таблиця 6.5 – Коефіцієнти стратегій проектування фільтрів нижніх частот

Фільтр	Коефіцієнти стратегій проектування			
	k_{δ}	k_V	k_P	$k_{P/V}$
Неінвертуючий	0,509	0,950	0,047	0,960
Інвертуючий	0,536	0,684	0,008	0,789

Оцінювання привабливості схем фільтрів за результатами допускового проектування проводилось за допомогою співвідношення. Коефіцієнт допускового проектування для неінвертуючого фільтра мав значення $k_t=0,022$. Для інвертуючого фільтра він зменшувався до значення $k_t=0,002$, що надає суттєвої переваги неінвертуючій схемі. Таке зменшення коефіцієнта допускового проектування інвертуючого фільтра пов'язано із більшою чутливістю вихідної функції до зміни параметрів елементів та більшою кількістю елементів.

Таким чином, отримані співвідношення дозволяють призначати допустимі номінальні відхилення параметрів за стратегіями рівних допусків, максимального об'єму допускової області, мінімальної вартості електрорадіоелементів та оптимального співвідношення ціна/якість. Ці стратегії враховують різні підходи до допускового проектування, які оцінюються низкою нормованих параметрів для кожної стратегії. Добуток нормованих параметрів визначає узагальнений коефіцієнт стратегії, який використовується для оцінювання їх привабливості.

У розглянутих схемах фільтрів нижніх частот найпривабливішою є стратегія ціна/якість, яка має найбільший коефіцієнт стратегій у будь-якій схемі фільтра. Відмінність цих коефіцієнтів була незначною тільки у V - та P/V -стратегіях неінвертуючого фільтра нижніх частот.

Вибір схеми фільтра проводився за допомогою коефіцієнта допускового проектування. Цей параметр для неінвертуючого фільтра нижніх частот значно перевищував такий самий показник інвертуючого фільтра. Більша привабливість неінвертуючого фільтра пов'язана з меншою чутливістю вихідної функції до зміни параметрів елементів та меншою кількістю елементів.

Запропоновані методи вибору стратегії проектування і схем можуть використовуватись для інших радіоелектронних пристроїв.

6.3 Вибір елементів з урахуванням дії зовнішніх чинників

Вибір елементів є кінцевим етапом в задачах проектування електронних схем. Результат вибору елементів безпосередньо відбивається на стабільності параметрів пристрою та його собівартості. Існуючі методики не дозволяють враховувати особливостей всієї множини параметрів елементів, які формують

параметри пристрою. У більшості випадків обчислення допусків відбувається без врахування зовнішніх впливів і цінових факторів [19, 25].

Зручним математичним апаратом для вирішення цих задач є апарат інтервальної математики [42]. Врахування дії зовнішніх чинників в інтервальних моделях здійснюється за допомогою інтервальних структур, які можуть відобразитися в область інтервальних величин [20, 244, 248]. Нижня інтервальна границя вихідної функції в цьому випадку записується у вигляді:

$$\underline{y} = \underline{a}_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ a_i > 0}}^n \underline{a}_i \cdot \underline{x}_i + \sum_{\substack{i=1 \\ a_i < 0}}^n \bar{a}_i \cdot \bar{x}_i, \quad (6.46)$$

де $\underline{y} = [\underline{y}_m; \underline{y}_p]$; $\underline{x}_i = [\underline{x}_{mi}; \underline{x}_{pi}]$; $\bar{x}_i = [\bar{x}_{mi}; \bar{x}_{pi}]$ – нижні та верхні інтервальні границі вихідної функції і параметрів елементів;

$\underline{y}_m, \underline{x}_m, \underline{y}_p$ і \underline{x}_p – границі вихідної функції і параметрів елементів при нижній і верхній границях зовнішніх впливів.

При виборі елементів будемо вважати, що встановлені допустимі експлуатаційні відхилення і рівень компенсації вихідної функції, що дозволяє визначити номінальні відхилення вихідної функції за допомогою співвідношення:

$$w_n = \lambda \cdot w_e, \quad (6.47)$$

де w_n і w_e – ширини номінального и експлуатаційного допусків відповідно; λ – рівень компенсації вихідної функції [255].

Це дозволяє при лінійній залежності параметрів елементів від зовнішніх впливів виділити з (3.1) рівняння для оптимізації номінальних допусків:

$$\underline{y}_n = \underline{a}_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ a_i > 0}}^n \underline{a}_i \underline{x}_{ni} + \sum_{\substack{i=1 \\ a_i < 0}}^n \overline{a}_i \overline{x}_{ni}, \quad (6.48)$$

де $\underline{y}_n, \underline{x}_n$ и \overline{x}_n – нижні та верхні номінальні границі вихідної функції і параметрів елементів.

При оптимізації номінальних допусків можуть бути використані алгоритми, що були розроблені для експлуатаційних допусків [239]. Для формування множини параметрів, що використовуються при виборі елементів, необхідно також визначити коефіцієнти зовнішніх впливів, які можуть задаватися обмеженнями:

$$\alpha_{xi \min} \leq \alpha_{xi} \leq \alpha_{xi \max}, \quad (6.49)$$

де $\alpha_{xi \min}$ і $\alpha_{xi \max}$ – мінімально и максимально можливі коефіцієнти зовнішніх впливів.

При вирішенні цієї задачі можна виділити основні види стратегій, що забезпечують: максимальні коефіцієнти зовнішніх впливів, максимальні номінальні допуски, мінімальну вартість або оптимальне співвідношення ціна / якість. Всі стратегії мають враховувати компенсаційні режими роботи апаратури, що дозволить підвищити стабільність параметрів пристрою і розширити поля допусків параметрів елементів.

Для врахування впливу зовнішніх впливів визначимо з (3.1) складову, до якої входять коефіцієнти зовнішніх впливів:

$$\underline{y}_n \alpha_{ym} = \sum_{\substack{i=1 \\ a_i > 0}}^n \underline{a}_i \underline{x}_{ni} \alpha_{xmi} + \sum_{\substack{i=1 \\ a_i < 0}}^n \overline{a}_i \overline{x}_{ni} \alpha_{xmi}, \quad (6.50)$$

де α_{ym} і α_{xm} – коефіцієнти зовнішніх впливів вихідної функції і елементів в нижньому діапазоні зовнішніх впливів.

Використовуючи поняття фактору компенсації [255-257] рівняння (3.5) можна представити у вигляді:

$$s_y = \sum_{i=1}^p s_i^+ + \sum_{j=1}^m s_j^-, \quad (6.51)$$

де $s_y = y_n \cdot \alpha_y$ – фактор компенсації вихідної функції;

$s = a \cdot x_n \cdot \alpha_x$ – фактор компенсації елемента.

Фактори компенсації елементів можуть бути додатними або від'ємними, що вказується відповідним символом. У відповідності до виразу (3.6) обмеження (3.4) на параметри елементів переписуються у вигляді:

$$s_{i \min} \leq s_i \leq s_{i \max}. \quad (6.52)$$

В стратегії максимальних коефіцієнтів зовнішніх впливів вибір одного із множини факторів компенсації здійснюється за допомогою критерію:

$$S_c = \sum_{i=1}^p s_{i \max}^+ + \sum_{j=1}^m s_{j \min}^- - s_y, \quad (6.53)$$

де p и m – кількість елементів з додатними і від'ємними значеннями фактора компенсації відповідно.

Обчислення критерію S_c проводиться для кожної з меж функції вихідного параметру. Граничні елементи $s_{i \max}^+$ і $s_{j \min}^-$ забезпечують необхідний

рівень компенсації зовнішніх впливів, якщо $S_c = 0$. В цьому випадку приймається, що:

$$s_j^- = s_{j \min}^-; \quad s_i^+ = s_{i \max}^+, \quad (S_c = 0). \quad (6.54)$$

При додатних значеннях критерію s_c об'єм факторів компенсації елементів обмежується множиною від'ємних факторів. Це призводить до співвідношень:

$$s_j^- = s_{j \min}^-; \quad p \cdot s^+ = s_y - \sum_{j=1}^m s_{j \min}^-, \quad (S_c > 0). \quad (6.55)$$

Якщо оптимальні значення факторів компенсації для деяких елементів не реалізуються, то для них приймається:

$$s_i^+ = s_{i \max}^+, \quad (s_{i \max}^+ < s^+). \quad (6.56)$$

Додатні фактори компенсації, що залишилися, використовують оптимальні співвідношення:

$$(p - k) \cdot s_{p-k}^+ = s_y - \sum_{j=1}^m s_{j \min}^- - \sum_{\substack{i=1 \\ s_{i \max}^+ < s^+}}^p s_{i \max}^+, \quad (3.57)$$

де k – кількість елементів з обмеженнями $s_{i \max}^+ < s^+$;

s_{p-k}^+ – оптимальні фактори компенсації для $p-k$ елементів, що залишилися.

Від’ємним значенням критерію s_c відповідають обмеження за множиною додатних факторів компенсації елементів. Цей випадок приводить до виразів:

$$s_i^+ = s_{i \max}^+; \quad m \cdot s^- = s_y - \sum_{i=1}^p s_{i \max}^+, \quad (S_c < 0). \quad (6.58)$$

Для факторів компенсації, що не реалізуються, приймається:

$$s_j^- = s_{j \min}^-; \quad (s_{j \min}^- > s^-). \quad (6.59)$$

Від’ємні фактори, що залишилися, використовують оптимальний розподіл:

$$(m-l) \cdot s_{m-l}^- = s_y - \sum_{j=1}^m s_{j \min}^- - \sum_{i=1}^p s_{i \max}^+, \quad (6.60)$$

де l – кількість елементів з обмеженнями $s_{j \min}^- > s^-$;

s_{m-l}^- – оптимальні фактори компенсації для $m-l$ елементів що залишилися.

У зв’язку з нелінійністю вихідної функції обрані фактори компенсації елементів, як правило, не забезпечують заданий рівень компенсації вихідної функції. Тому необхідна перевірка належності області працездатності межових точок допускової області при максимальних амплітудах зовнішніх впливів. Така перевірка виконується за допомогою критерію:

$$W = \frac{w_t}{w_e} = \frac{y_t - y_e}{y_e - y_n}, \quad (6.61)$$

де y_t – межові значення вихідної функції при обраних факторах компенсації елементів і максимальних амплітудах зовнішніх впливів.

При від’ємних значеннях критерію w допускова область знаходиться в області працездатності. Це означає, що первинний рівень компенсації може бути збільшений. Додатним значенням критерію w відповідає вихід граничних точок допускової області за межі області працездатності. В цьому випадку необхідно зменшити первинний рівень компенсації. Перевірка за допомогою критерію w здійснюється в межах точках допускової області. З отриманого набору обирається найбільший критерій:

$$W_c = \max \{ \underline{W}_m; \overline{W}_m; \underline{W}_p; \overline{W}_p \}, \quad (6.62)$$

де $\underline{W}_m, \overline{W}_m, \underline{W}_p$ і \overline{W}_p – значення критеріїв W , що відповідають нижньому і верхньому значенням вихідної функції при нижній і верхній амплітудах зовнішніх впливів.

Зміна рівня компенсації відбувається в ітераційному процесі:

$$\lambda^{(i)} = \lambda^{(i-1)} - W_c^{(i-1)}. \quad (6.63)$$

Процес обчислення закінчується, якщо виконується одна з умов:

$$\lambda^{(i)} < \lambda_{\min}; \quad (6.64)$$

$$|W_c^{(i)}| \leq \varepsilon, \quad (6.65)$$

де λ_{\min} – мінімально допустимий рівень компенсації;

ε – точність обчислень.

Умова (6.65) виконується, коли ступінь нелінійності вихідної функції така висока, що стратегія максимальних коефіцієнтів зовнішніх впливів не реалізується при заданих обмеженнях. Необхідно посилити вимоги до стабільності елементів. За умовою (6.65) ітераційний процес завершується з межовими значеннями факторів компенсації. Обчислення завершуються визначенням коефіцієнтів зовнішніх впливів і номінальних допусків для всіх елементів. Стратегія максимальних коефіцієнтів зовнішніх впливів забезпечує вибір елементів з максимальними коефіцієнтами зовнішніх впливів із заданої номенклатури при мінімально допустимому рівні компенсації.

В стратегії максимальних номінальних допусків вибір факторів компенсації здійснюється за допомогою критерію:

$$S_t = \sum_{j=1}^m s_{j \max}^- + \sum_{i=1}^p s_{i \min}^+ - s_y. \quad (6.66)$$

Якщо $S_t = 0$, то межові фактори $s_{i \min}^+$ і $s_{j \max}^-$ забезпечують необхідний рівень компенсації. При додатних значеннях критерію S_t об'єм факторів компенсації визначається множиною додатних факторів і вибір елементів здійснюється за наступними співвідношеннями:

$$s_i^+ = s_{i \min}^+; \quad m \cdot s^- = s_y - \sum_{i=1}^p s_{i \min}^+, \quad (S_t > 0). \quad (6.67)$$

Від'ємним значенням критерію S_t відповідають вирази:

$$s_j^- = s_{j\max}^-; \quad p \cdot s^+ = s_y - \sum_{j=1}^m s_{j\max}^-, \quad (S_t < 0). \quad (6.68)$$

Якщо який-небудь з зазначених факторів s^- або s^+ не реалізуються, то використовують корегування подібне до корегувань в стратегії максимальних коефіцієнтів зовнішніх впливів. Аналогічно здійснюється перевірка належності області працездатності граничних точок допускових областей та ітераційний процес обчислення. Стратегія максимальних номінальних допусків забезпечує найбільші значення номінальних допусків при мінімальних значеннях коефіцієнтів зовнішніх впливів.

Серед стратегій, що враховують цінові характеристики пристрою, що проектується, можна виділити дві основні, яких дотримуються виробники при виробництві електронної техніки:

- стратегія мінімальної вартості;
- стратегія максимального співвідношення ціна-якість.

Стратегія мінімальної вартості дозволяє реалізувати такий набір номінальних параметрів елементів, який характеризується мінімальною вартістю і забезпечує виконання обмежень накладених на функцію вихідного параметру.

Для врахування цінових показників при призначенні номінальних допусків і коефіцієнтів зовнішніх впливів використовується поняття цінової привабливості:

ВИЗНАЧЕННЯ 6.6. Ціновою привабливістю називається величина, що обчислюється за співвідношенням:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\min i}}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (6.69)$$

де P і P_{\min} – ціна і мінімальна ціна елементів.

Компенсаційні і цінові характеристики елементів зображені на рис. 6.13. Високим значенням рівня компенсації відповідає зменшення цінової привабливості, що зумовлено ростом ціни матеріалів і технологій виготовлення елементів при забезпеченні високої стабільності параметрів. Витрати на забезпечення номінальних допусків в цьому випадку зменшуються. При зменшенні значення рівня компенсації відбувається збільшення фактору цінової привабливості, що пояснюється збільшенням коефіцієнтів зовнішніх впливів; допуски при цьому звужуються але незначно. Малі значення рівня компенсації не потребують високих витрат на забезпечення стабільності параметрів. Але значно зростають витрати на забезпечення вузьких номінальних допусків. В результаті це призводить до зниження цінової привабливості.

В стратегії мінімальної вартості вибір факторів компенсації здійснюється за максимальним значенням цінової привабливості (точка в, рис. 6.13). Стратегія оптимального співвідношення ціна-якість (точка б, рис. 6.13) визначає фактори компенсації з рішення рівняння:

$$\lambda(s) = \sigma(s). \quad (6.70)$$

Реалізація різних стратегій обчислення номінальних допусків надає можливість обрати відповідну стратегію, що співпадає з прийнятою цільовою групою пристрою, що проектується.

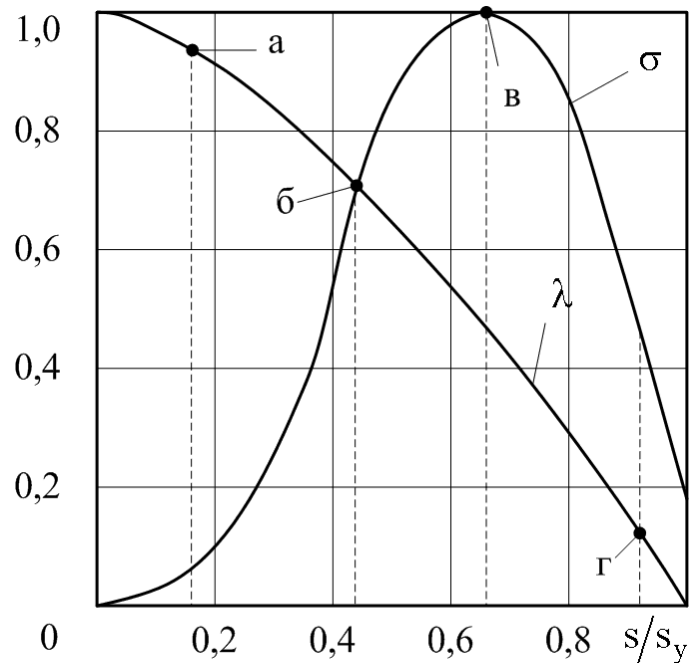


Рисунок 6.14 – Компенсаційна і цінова характеристика

Запропоновано методики, що надають можливість проводити вибір елементів з урахуванням цінових показників і компенсаційних режимів пристрою. При використанні різноманітних стратегій вибору елементів, перевагу слід віддавати тим, що дозволяють враховувати цінові показники пристрою, що проектується.

6.4 Висновки до розділу 6.

1. Запропоновано інтервальні структури із плаваючими інтервалами, з плаваючими межами, зв'язаними інтервалами та гіллясті інтервальні структури, що надають можливість описати процеси, які відбуваються під час дії зовнішніх впливів на радіоелектронні пристрої та призводять до зміни параметрів елементів і вихідних характеристик. Різноманітність структур забезпечує інструментом для проведення різних видів оцінювання властивостей

радіоелектронної апаратури. Застосування гіллястих інтервальних структур є ефективним засобом для врахування не тільки інтервальних значень зовнішніх впливів, але і відображає інтервальний характер взаємодії зовнішніх чинників та параметрів радіоелементів.

2. 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 призначення коефіцієнтів зовнішніх впливів і номінальних відхилень параметрів, забезпечує можливість використовувати при призначенні номінальних та експлуатаційних допусків різні стратегії.

3. Запропонований метод відображень надає можливість призначати інтервальні допуски при найгіршому поєднанні відхилень параметрів елементів та зовнішніх факторів. Це гарантує, що значення вихідних функцій при зовнішніх впливах не будуть виходити за задані обмеження. Метод надає можливість враховувати реальні значення коефіцієнтів зовнішніх впливів з їх відхиленнями та різну інтенсивність зовнішнього впливу на кожний елемент. Дослідження дії коефіцієнтів зовнішніх впливів на вихідні характеристики смугового фільтра показало, що основним фактором, який обмежує точність пристроїв, є старіння елементів.

4. Показано можливості вибору схеми фільтра за допомогою коефіцієнта допускового проектування. Цей параметр для неінвертуючого фільтра нижніх частот значно перевищував такий самий показник інвертуючого фільтра. Більша привабливість неінвертуючого фільтра пов'язана з меншою чутливістю вихідної функції до зміни параметрів елементів та меншою кількістю елементів.

Результати розділу 6 опубліковано у працях:

1. 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).
2. Шило Г.М. Интервальные структуры та їх застосування // Комп'ютинг. 2007. Том 6, Вип. 1. С. 80-87.
3. Шило Г.М., Веснін І.М., Гапоненко М.П. Вибір стратегії призначення інтервальних допусків // *Радиоэлектроника. Информатика. Управління*. 2012. № 2. С. 52-57.
4. Shilo G., Gaponenko N. Interval methods of assigning the nominal tolerances and choosing elements // *Computing*. 2003V.2(2). 2003. P. 110-113.
5. Кришук В.М., Намлинський А.О., Шило Г.М., Гапоненко М.П. Вибір елементів при компенсації зовнішніх впливів // *Радиоэлектроника. Информатика. Управління*. 2004. № 2 (12). С. 36-41.
6. Шило Г.Н., Намлинский А.А., Гапоненко Н.П. Компенсация и оптимизация при назначении номинальных допусков // *Радиоэлектроника и информатика*. 2004. № 2. С. 39-44.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

РОЗДІЛ 7

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОПУСКОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

7.1 Архітектура програмного забезпечення допускового проектування радіоелектронних пристроїв

Автоматизована система допускового проектування і вибору елементів призначена для автоматизації процесу аналізу і синтезу відхилень параметрів радіоелектронних пристроїв та вибору елементів за параметрами, що визначають їх точність з урахуванням вартості, технологічних або експлуатаційних обмежень методами, які базуються на визначенні межових значень вихідних характеристик в точках дотику допускових областей, форма яких визначається законом розподілу параметрів елементів, та межових гіперповерхонь області працездатності [259, 260].

Вимоги до функціональних характеристик автоматизованої системи:

- формування математичних моделей області працездатності радіоелектронного пристрою;
- аналіз відхилень вихідної характеристики за заданими допустимими відхиленнями параметрів елементів від номінальних значень;
- синтез відхилень параметрів елементів із забезпеченням рівних відхилень для заданих обмежень вихідної характеристики;
- синтез відхилень параметрів елементів із забезпеченням максимального об'єму допускової області для заданих обмежень вихідної характеристики;
- вибір параметрів, що визначають точність елементів, із забезпеченням оптимального співвідношенням ціна/якість або з урахуванням дії зовнішніх факторів.

Для візуалізації функціональних вимог до автоматизованої системи та створення її концептуальної моделі [261 - 264] розроблено діаграму варіантів використання (рис. 7.1) за стандартом UML.

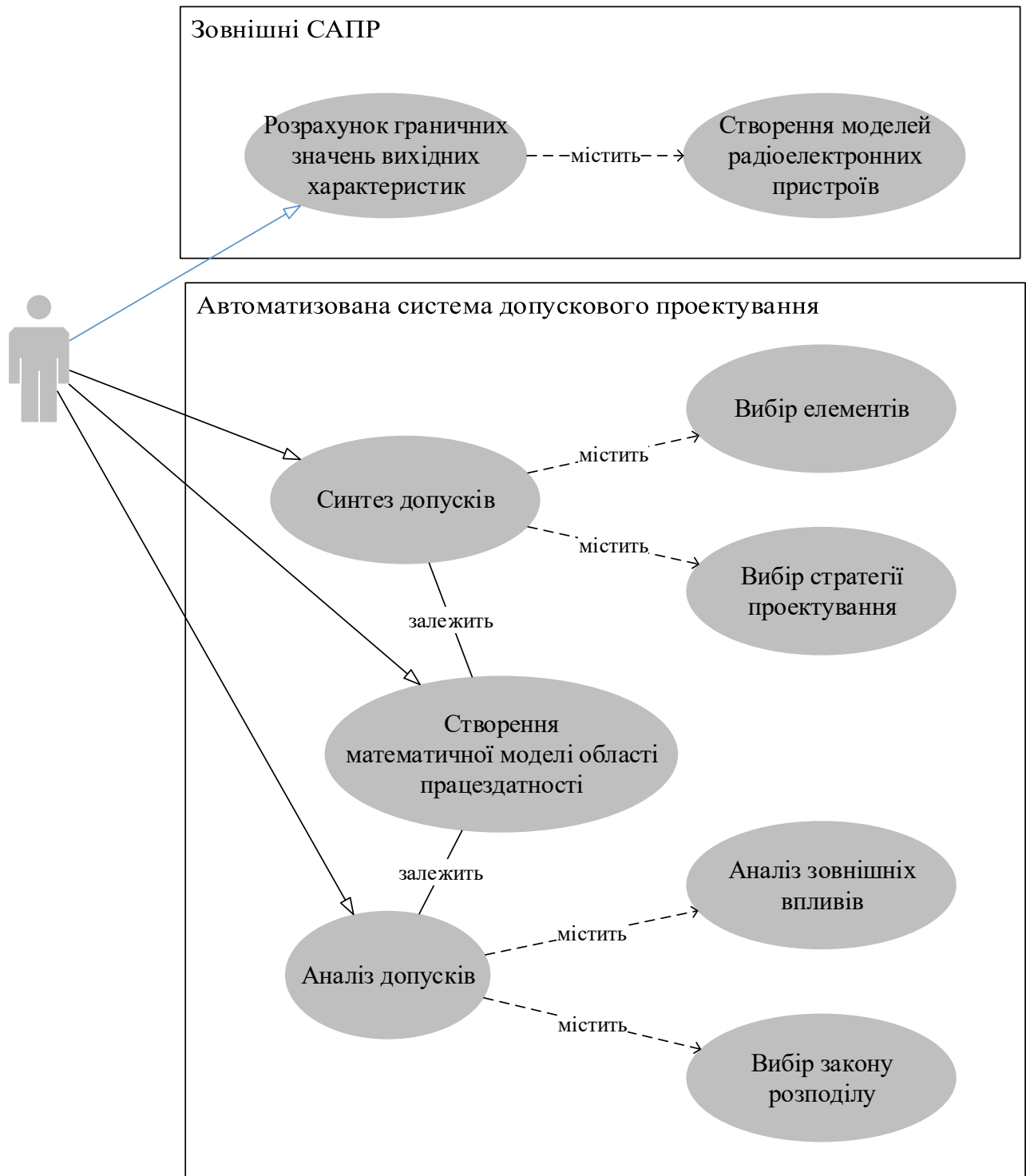


Рисунок 7.1 – Діаграма варіантів використання автоматизованої системи

На діаграмі показано, що автоматизація задач допускового проектування радіоелектронних апаратів потребує розробки технологій створення математичних моделей областей працездатності для радіоелектронної апаратури різного призначення. Оскільки математичні моделі вихідних характеристик можна розглядати на різних рівнях ієрархії та враховувати різні фізичні процеси, що виникають під час функціонування, то виникає необхідність інтеграції з САПР різного функціонального призначення: моделювання схем електричних принципів, електромагнітного та теплового проектування.

Це питання можна також вирішити через забезпечення користувача можливістю задання математичної моделі області працездатності у аналітичному вигляді математичних співвідношень.

Для створення гнучкої та надійної системи з можливістю інтеграції з САПР при проектуванні архітектури необхідно максимально відокремити інтерфейс від реалізації [262-266]. Також потрібно максимально відокремити інтерфейси один від одного. Такому підходу найбільш відповідає MVC-парадигма (Модель / Вид / Контролер) [267 - 268]. Вона явно визначає інтерфейси між специфічними компонентами, які пов'язані з широко поширеною основною проблемою програмування – створенням інтерфейсів користувача та їх зв'язуванням з пакетами прикладних програм, що реалізують процедури допускового проектування, та даними. Розробка програмного забезпечення з використанням MVC- парадигми надає можливість змінювати зовнішній вигляд графічного інтерфейсу користувача, не торкаючись логіки функціонування. Аналогічним чином, якщо потрібно змінити алгоритми обчислення, то це не буде потребувати змінювати інтерфейс. Можна також змінювати формати зберігання даних. В даному випадку передбачається, що інтерфейси між трьома компонентами моделлю, видом та контролером не зміняться.

Для створення автоматизованої системи допускового проектування MVC-модель архітектури необхідно удосконалити введення ще одного компоненту, який буде містити шаблони-інтерфейси для інтеграції з зовнішніми САПР.

Інтеграція розробленої автоматизованої системи з сучасними САПР можлива двома способами:

- 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.

Архітектуру автоматизованої системи наведено на рис. 7.2. Автоматизована система містить пакети прикладних програм, які забезпечують функціональність системи: введення початкових даних, формування вихідних характеристик радіоелектронних пристроїв, розрахунок допустимих відхилень параметрів, генерацію результатів.

Основними компонентами програмного забезпечення допускового проектування є:

- модуль формування початкових даних та обмежень – реалізує отримання початкових даних та обмежень, введених користувачем з допомогою діалогової системи;

- пакет прикладних програм для призначення допусків і вибору елементів – реалізує функціональну частину комп'ютерної програми, містить процедури призначення допусків і вибору елементів з урахуванням закону розподілу параметрів та кореляції між ними, експлуатаційних навантажень та за різними критеріями оптимальності: мінімізація ціни, оптимальне співвідношення ціна/якість, рівні допуски, максимальний об'єм допускової області;

- пакет прикладних програм формування вихідних характеристик – відповідає за отримання значень вихідної характеристики в залежності від параметрів елементів в автоматичному режимі, коли вихідна характеристика

представлена у вигляді функціональної залежності або використовуються спеціальне програмне забезпечення для інтеграції з зовнішньою системою автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв, і в діалоговому режимі, коли користувач в процесі розрахунків має вводити значення вихідної характеристики на кожній ітерації процедури розрахунку;

– модуль генерації результатів – реалізує формування звітів за результатами призначення допусків і вибору елементів.

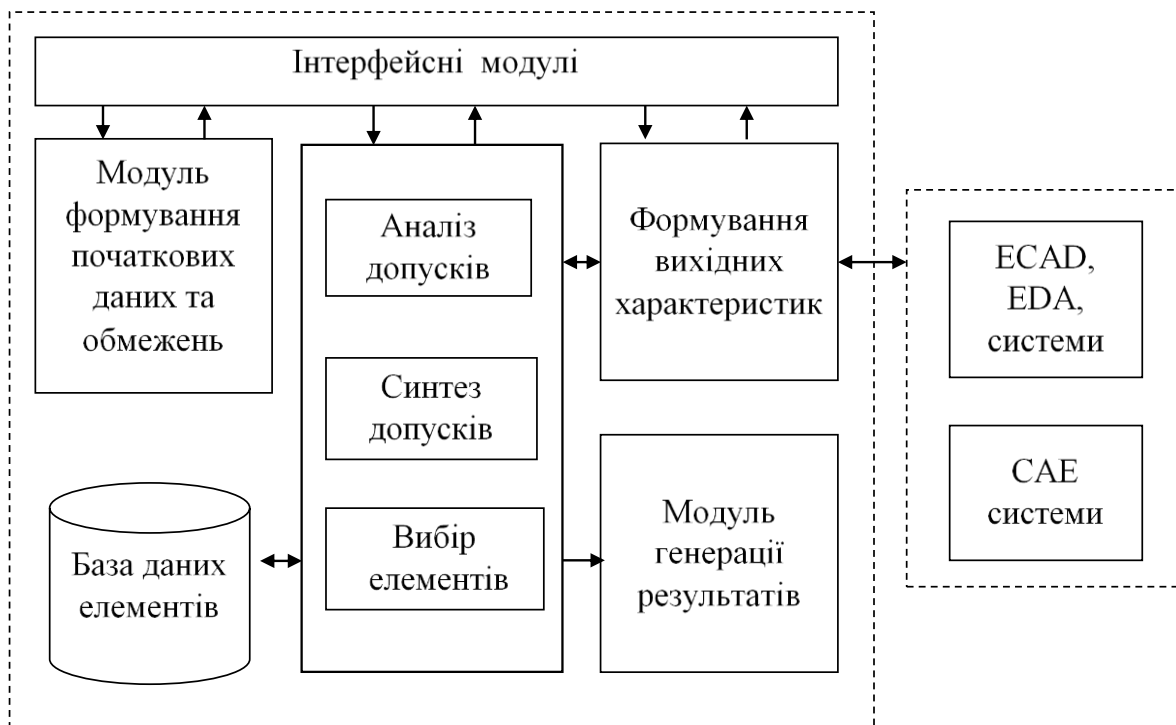


Рисунок 7.2 – Архітектура автоматизованої системи допускового проектування

Для вибору елементів необхідно використовувати зовнішню базу даних, що містить параметри елементів, які можуть використовуватись для розрахунків.

Пакет прикладних програм для призначення допусків і вибору елементів включає в себе:

– процедури аналізу відхилень вихідної характеристики за заданими відхиленнями параметрів елементів від номінальних значень;

– процедури синтезу допустимих відхилень основних параметрів елементів із забезпеченням рівних відхилень для заданого відхилення вихідної характеристики від її значення при номінальних значеннях параметрів елементів;

– процедури синтезу допустимих відхилень основних параметрів елементів із забезпеченням максимального об'єму допускової області для заданого відхилення вихідної характеристики від її значення при номінальних значеннях параметрів елементів;

– процедури синтезу допустимих відхилень основних параметрів елементів за критерієм оптимальності мінімальна вартість для заданого відхилення вихідної характеристики від її значення при номінальних значеннях параметрів елементів;

– процедури синтезу допустимих відхилень основних параметрів елементів мінімального співвідношення ціна/якість для заданого відхилення вихідної характеристики від її значення при номінальних значеннях параметрів елементів;

– процедури синтезу допустимих відхилень основних параметрів елементів з урахуванням одночасної дії зовнішніх факторів для заданого відхилення вихідної характеристики від її значення при номінальних значеннях параметрів елементів;

В усіх процедурах синтезу допусків є можливість задавати зміну значень вихідної характеристики у вигляді верхнього межового відхилення, нижнього межового відхилення або ширини відхилення вихідної характеристики від її значення при номінальних значеннях параметрів елементів. Розмір отриманих допусків суттєво залежить від заданого закону розподілу параметрів елементів та кореляції параметрів. Генетичні алгоритми для реалізації процедур аналізу та синтезу опубліковано у працях, алгоритми методу відображень для нормальних допусків наведено у працях та вибору елементів [269-297]

Діаграма діяльності UML-моделі, на якій зображено процедуру синтезу допусків на параметри радіоелектронних пристроїв, зображено на рис. 7.3.

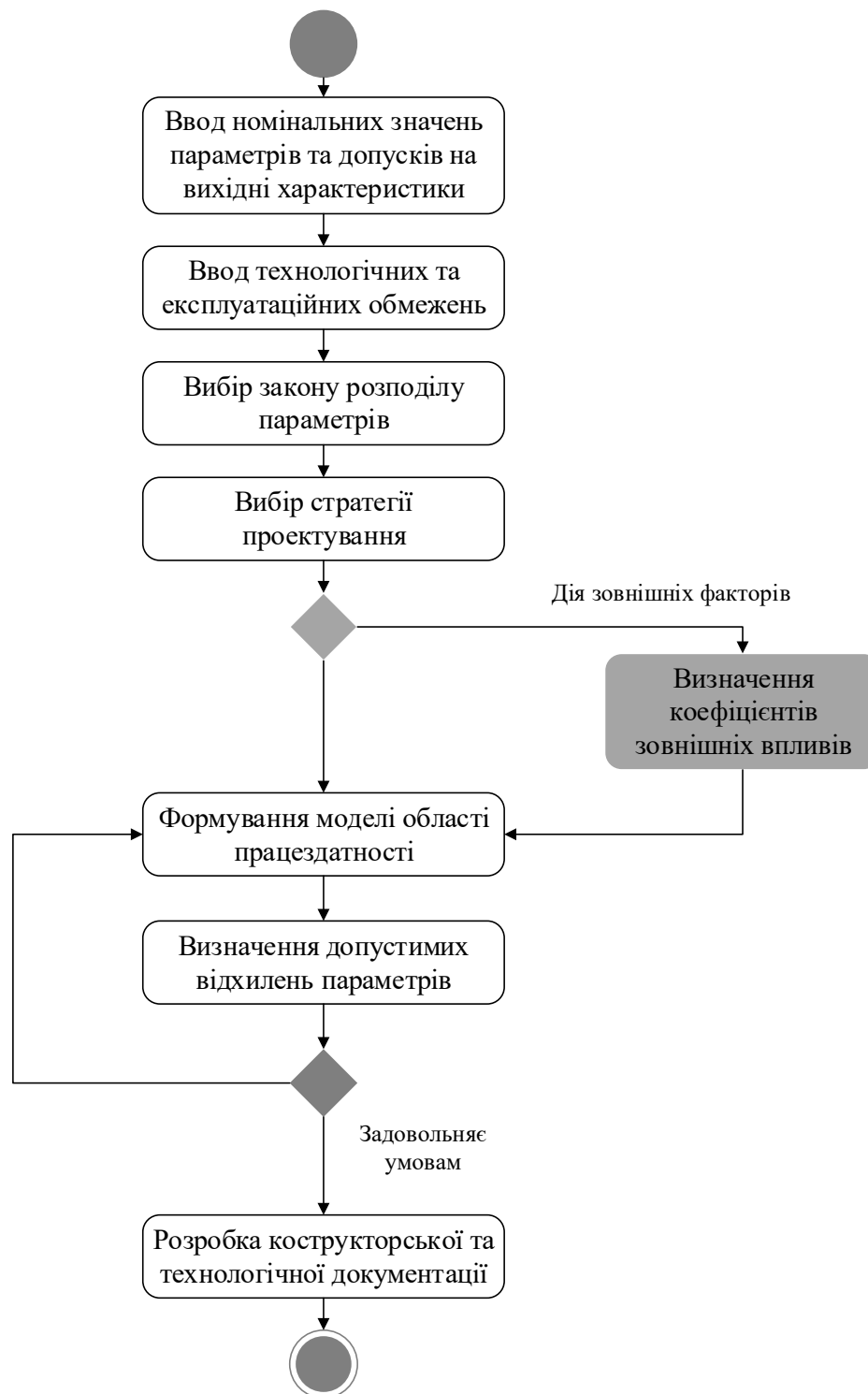


Рисунок 7.3 – Процедура синтезу допускового проектування

Усі компоненти автоматизованої системи мають спільний програмний інтерфейс, що забезпечує можливість користувачу застосовувати даний програмний комплекс для вирішення задач призначення допусків і вибору елементів для вихідної характеристики, що може бути задана як математична

модель у символному виді, таблиця або програмне забезпечення для інтеграції з зовнішньою системою автоматизованого проектування [259, 260].

Вхідними даними для роботи системи є номінальні значення параметрів елементів та коефіцієнтів зовнішніх впливів, умови експлуатації, закон розподілу параметрів елементів, матриця кореляції параметрів, точність обчислень. Для розрахунків необхідно обрати спосіб отримання значень вихідної характеристики: в аналітичному вигляді, тоді програма їх розраховує автоматично; в ручному режимі – у вигляді таблиці; за значеннями, отриманими із зовнішньої системи моделювання радіоелектронних схем. Для процедури аналізу задають значення відхилень параметрів елементів. Для процедур синтезу необхідно встановити спосіб та значення обмежень вихідної характеристики. Для розрахунків з урахуванням оптимального співвідношення ціна/якість необхідно встановити вартість елемента в залежності від його відхилень.

Автоматизована система містить у собі бібліотеку класів. За призначенням їх можна поділити на три групи:

- класи інтерфейсу користувача, які формують головне меню програми, вікна для введення вихідних даних та виведення результатів і реалізують меню для вибору способу розрахунку;
- класи, що виконують процедури аналізу та синтезу відхилень параметрів елементів;
- класи для формування вихідної характеристики;
- класи для обробки початкових даних, генерування звіту, збереження проекту.

Основні методи, що виконують розрахунки містяться в абстрактному класі `calculator`. Використання абстрактного класу дає можливість забезпечити гнучкість комп'ютерної програми і дає можливість подальшого розширення її функціональних характеристик для призначення допусків і вибору елементів при різних законах розподілу параметрів елементів.

В цьому класі містяться віртуальні методи:

- `precalc` – функція отримання початкових даних;
- `check` – функція перевірки досягнення заданої точності;
- `calc_equal` – функція, що реалізує процедуру призначення допусків із забезпеченням рівних відхилень параметрів елементів;
- `calc_volume` – функція, що реалізує процедуру призначення допусків із забезпеченням максимального об'єму допускової області;
- `calc_cost` – функція, що реалізує процедуру призначення допусків із забезпеченням мінімального співвідношення ціна/якість;
- `analyze` – функція, що реалізує процедуру аналізу відхилень вихідної характеристики.

Надалі для процедур обчислення допусків створено класи `calc_normal_low`, `calc_normal_high`, `calc_normal_both`, що є спадковими від класу `calculator`. В цих класах віртуальні методи замінюються функціями, що містять програмний код, який реалізує процедури призначення допусків для заданих нижніх, верхніх та двосторонніх обмежень вихідної характеристики з нормальним законом розподілу параметрів елементів відповідно. Аналогічно реалізуються процедури обчислення допусків при інших законах розподілу.

Таким чином, аналіз предметної області та розроблені моделі системи надали можливість визначити основні функціональні вимоги до автоматизованої системи визначити її структуру та показали необхідність розробки мови опису математичних моделей області працездатності.

7.2 Лінгвістичне забезпечення для допускового проектування

Для реалізації функцій роботи з математичними моделями в аналітичному вигляді було розроблено окремий модуль. Можна виділити два режими функціонування модуля.

Введення математичної моделі. В цьому режимі користувач вводить ім'я математичної моделі, описує вхідні параметри, які будуть використовуватись під час її виклику та математичну модель на мові представлення математичних виразів. Дані передаються модулю формування моделі у вигляді масиву строк. Далі виконується перетворення строк в послідовність лексем за допомогою лексичного аналізатора. Якщо під час перетворення не було виявлено синтаксичних помилок, то з отриманої послідовності лексем створюється побудова внутрішнього представлення моделі у вигляді дерева. Система отримує функцію виклику моделі та інформація про її аргументи.

Виклик математичної моделі. Виконується виклик функції обчислення вихідних значень та введення значень вхідних параметрів математичної моделі.

Для забезпечення зручної перевірки та редагування введених математичних моделей в модулі передбачено перегляд формул в текстовому та графічних зображеннях. Для реалізації засобів візуального редагування математичних формул використовується бібліотека візуального редагування MathML текстів NuGenEQML. NuGenEQML – це програмне забезпечення з відкритим кодом, що надає можливість виконувати візуальне редагування математичних формул в форматі MathML, що розповсюджується за ліцензією GNU. Вихідний код даної бібліотеки розташовано на сайті GitHub та доступний за посиланням: github.com/AnthonyNystrom/NuGenEQML.

Бібліотека містить інструментарій:

- завантаження MathML-текстів;
- редагування та створення математичних конструкцій, що підтримує стандарт MathML;
- відображення MathML-тексту у вигляді графічних формул;
- копіювання та вставка окремих MathML-елементів;
- зберігання отриманих формул в графічні формати: jpg, png або gif;
- налаштування шрифтів та стилів відображення формул.

Архітектура модуля наведена на рис. 7.4. В ній передбачено реалізацію механізмів взаємодію з модулями допускового проектування. Компонент

візуального редагування NuGenEQML взаємодіє з модулем формування математичних моделей використовуючи засоби обміну MathML. Цей компонент використовується в графічному інтерфейсі системи допускового проектування для візуалізації математичних співвідношень в символьному вигляді.

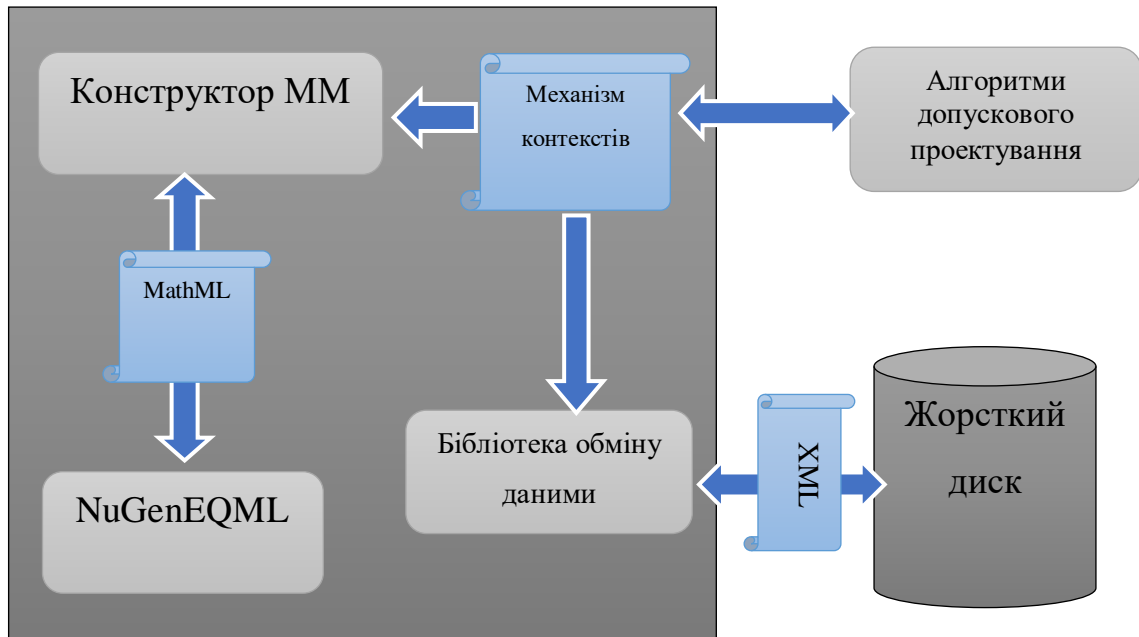


Рисунок 7.4 – Архітектура компонента створення математичних моделей у символьному вигляді

Формат файлу, що зберігає в собі результат трасування математичної моделі, реалізовано у вигляді XML - документа. Даний документ повинен зберігати наступні дані:

- назва математичної моделі;
- дата останнього редагування;
- вхідні параметри;
- вихідні параметри;
- масив даних трасування.

Формат зберігання математичних моделей також реалізовано у вигляді XML - документу. Даний документ має структуру:

- назва математичної моделі;
- дата останнього редагування;
- вхідні параметри;
- змінні;
- вихідні параметри;
- текст математичної моделі;
- додаткова інформація.

Для аналізу предметної області та статичного структури системи розроблено діаграму класів модуля формування математичних моделей (рис. 7.5).

Обмін даними організовано через клас «Context». Даний клас надає можливість створити ієрархію контекстів системи, зберігати та обробляти список змінних, передавати посилання на математичні моделі, константи та змінні.

Для забезпечення можливості вводу користувачем математичних моделей областей працездатності розроблено мову представлення математичних виразів та спеціалізоване програмне забезпечення для інтерпретації текстового опису математичної моделі у послідовність команд для їх подальшої обробки модулем формування математичних моделей.

Порівняно з іншими мовами представлення математичних текстів запропонована мова є достатньо простою, не вимагає від користувача поглиблених знань в програмуванні та має інтуїтивно зрозумілий синтаксис. Її синтаксис базується на основних конструкціях мови системи MatLab.

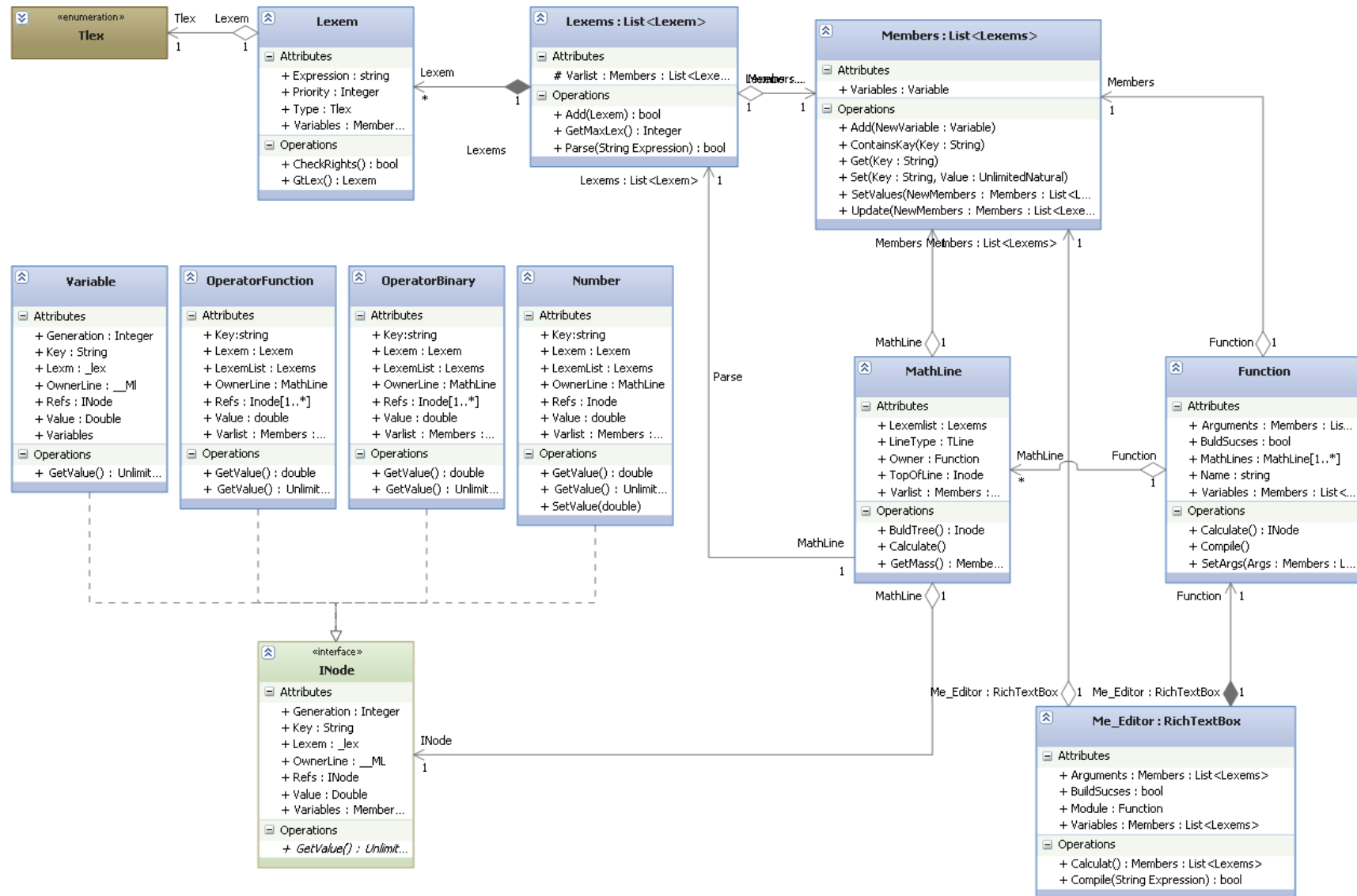


Рисунок 7.5 – Діаграма класів модуля формування математичних моделей

Мова для опису математичних моделей областей працездатності радіоелектронних пристроїв формалізована та описана в формі Бекуса-Наура :

```

<ExprCTRL> ::= <FunctionCTRL>
<ExprRavno> ::= <Variable> '=' <MathExpr> [<Comparison> <MathExpr>]
<Comparison> ::= '=' | '>' | '<' | '>=' | '<=' | '<>'
<MathExpr> ::= <Term> {<Operator1> <Term>}
<Operator1> ::= '+' | '-' | 'or' | 'xor'
<Term> ::= <Factor> {<Operator2> <Factor>}
<Operator2> ::= '*' | '/' | '^' | '%' |
<Factor> ::= <UnaryOp> <Factor> | <Base> ['^' <Factor>]
<UnaryOp> ::= '+' | '-' | '++' | '--'
<Base> ::= <Variable> | <Function> | <Number> | '(' <MathExpr> ')'
<Function> ::= <FuncName> '(' <MathExpr> ') '
<FunctionCTRL> ::= <FuncNameCTRL> ['(' <MathExpr> {',' <MathExpr>} ') ' ]
<FuncName> ::= 'sin' | 'cos' | 'ln'
<FuncNameCTRL> ::= 'for' | 'if'
<Variable> ::= <Letter> {<Letter> | <digit>}
<Letter> ::= 'A' | ... | 'Z' | 'a' | ... | 'z' | '_'
<digit> ::= '0' | ... | '9'
<Number> ::= <digit> {<digit>} ['. ' <digit> {<digit>}]
                [ ('E' | 'e') ['+' | '-'] <digit> {<digit>}]

```

Лексичний аналіз математичних текстів розділено на окремі процедури. У процесі перетворення математичного тексту в список лексем строкова змінна «Expression», що зберігає вхідну строку математичного тексту передається за посиланням в функцію «Add». Функція «Add» реалізує жадібний алгоритм вилучення лексеми з вхідного рядку. Вона повертає в якості результату отриману лексему та видаляє з вхідного рядку «Expression» символічний опис. Також ця функція приймає аргумент типу «Lexem» Previous. Цей аргумент представляє собою лексему та використовується для виявлення синтаксичних помилок.

У випадку успішного вилучення лексеми функція «Add» виконується до тих пір, поки змінна «Expression» не стане пустим рядком.

Алгоритм перетворення списку лексем реалізовано у вигляді рекурсивної функції «BuildTree». Цей алгоритм реалізує побудову дерева, яке складається з математичних операторів та їх операндів (чисел або змінних). В ході роботи алгоритму проводиться пошук за списком лексем у вказаному аргументами «start» та «end» діапазоні індексів.

Якщо отримана лексема є оператором, то відбувається рекурсивний відгук цієї ж функції з аргументами, що вказують індекс отриманої лексеми та аргументами «start» і «end». В результаті будується новий рівень дерева та отримуються посилання на його вузли.

Якщо отримана лексема є числом або змінною, то алгоритм завершує свою роботу та повертає значення на новий об'єкт типу «INode», що містить у собі посилання на вузли.

7.3 Методика застосування системи допускового проектування

Автоматизовану систему “ToleranceCAD” розроблено в середовищі Visual Studio. Вихідний код програми написано мовою C#. Автоматизована система допускового проектування складається з наступних проектів:

- eqml – проект бібліотеки візуального редагування MathML-текстів. Поширюється за ліцензією GNU;
- InterfaceDef – в даному проекті описано інтерфейси взаємодії компонентів системи та структури даних, реалізовано механізм контекстів;
- MathCompiler – містить у собі інструментарій для побудови та обчислення значень математичних моделей (синтаксичний аналізатор, засоби побудови дерева математичних операцій та алгоритмів);
- DataManager – забезпечує зберігання, завантаження та обробку даних математичних моделей і даних отриманих із зовнішніх САПР.
- ToleranceStrategy – реалізує у собі алгоритми допускового проектування;
- ToleranceCAD – об'єднує всі бібліотеки в єдине ціле. Реалізує інтерфейс користувача системи.

Основним інструментом автоматизованої системи, що реалізує інтерфейс із користувачем є функція `Create_Main()` яка виводить на екран головне вікно комп'ютерної програми. В головному вікні з допомогою функції `Create_Menu()` формується головне меню програми. При запуску виводиться вікно `Input` для введення вихідної характеристики. Приклад відображення головного вікна комп'ютерної програми наведений на рис. 7.6 [247].

В головному меню містяться наступні пункти:

- File;
- Edit;
- Analysis;
- Synthesis;
- Project;
- Help.

Пункт меню “File” містить функції створення, збереження та завантаження значень вхідних параметрів. Також в ньому міститься елемент “Exit”, який здійснює вихід з програми.

Пункт меню “Edit” необхідний для редагування тексту у вікні вводу функцій `Input`. В ньому містяться наступні елементи:

- “Undo” дає можливість відмінити останню дію;
- “Cut” дає можливість вирізати виділений текст;
- “Copy” дає можливість скопіювати виділений текст;
- “Paste” дає можливість вставити текст з буферу обміну.

Наступне меню “Analysis” служить для розв’язку задач аналізу допусків. Воно містить наступні пункти:

- “Rule” служить для вибору закону розподілу параметрів елементів (рівномірний, нормальний, статистично-орієнтований);

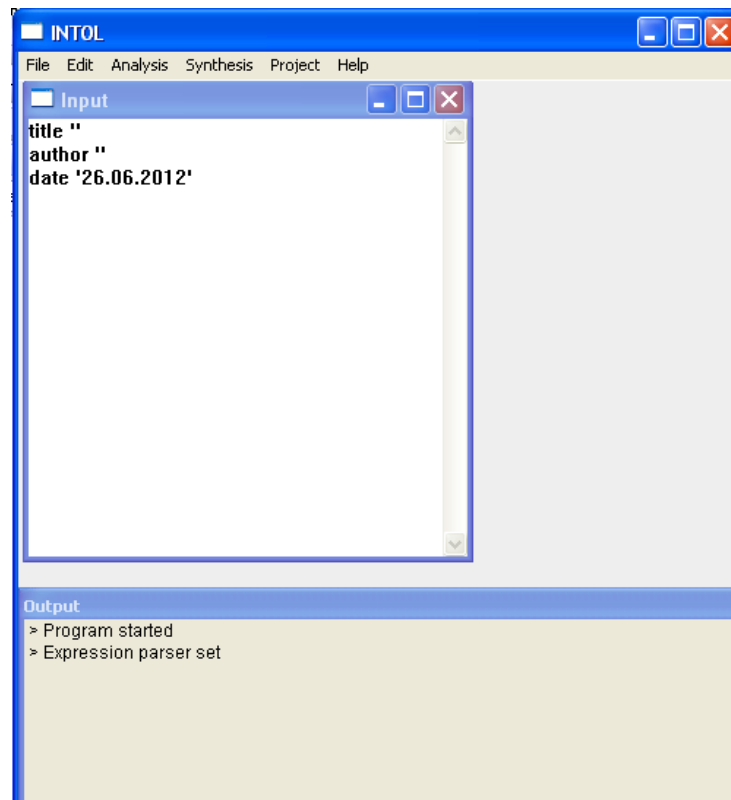


Рисунок 7.6 – Головне вікно комп'ютерної програми.

- “Nominals” викликає вікно введення та редагування номінальних значень параметрів елементів та коефіцієнтів зовнішніх впливів (рис. 7.7);
- “Precision” викликає вікно введення точності розрахунків;
- “Limitations” дає можливість обрати тип обмежень вихідної характеристики (нижня межа, верхня межа, ширина відхилення) та задати її відносне значення.

Пункт меню “Synthesis” дає можливість встановити параметри та умови синтезу відхилень параметрів елементів:

- “Rule” призначений для вибору закону розподілу параметрів елементів – інтервальний, нормальний, або статистично-орієнтований;

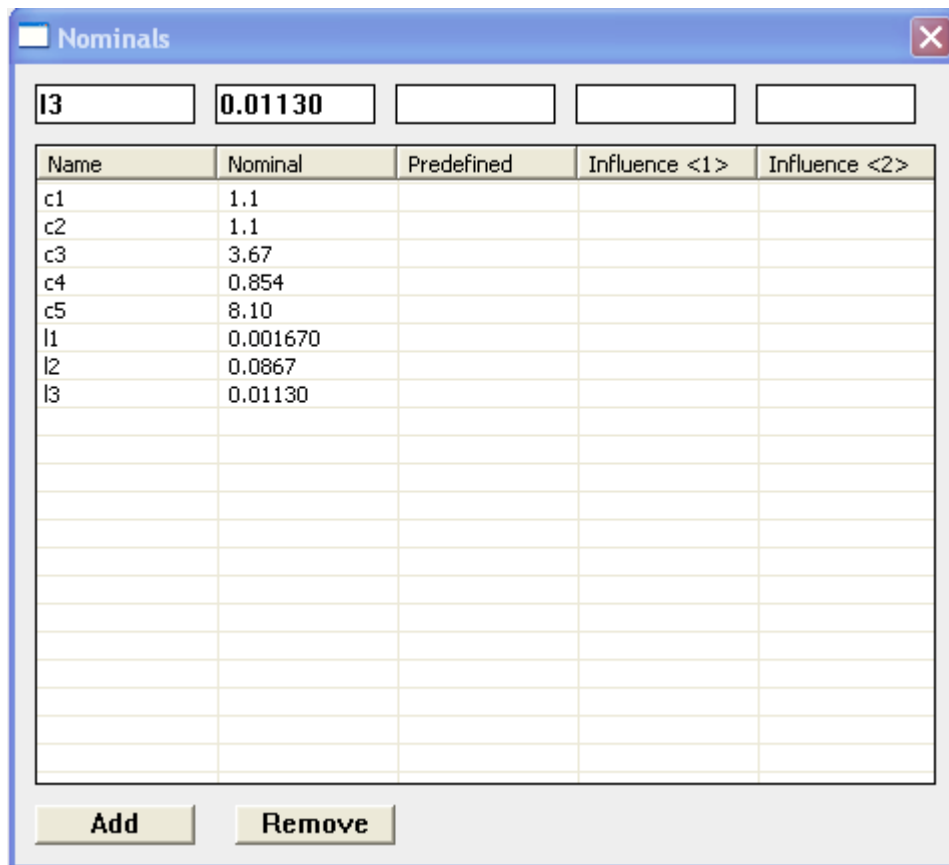


Рисунок 7.7 – Вікно введення та редагування номінальних значень параметрів елементів та коефіцієнтів зовнішніх впливів

- “Nominals” викликає вікно введення та редагування номінальних значень параметрів елементів і коефіцієнтів зовнішніх впливів;
- “Cost” викликає вікно введення та редагування вартості елементів в залежності від їх допустимих відхилень (рис. 7.8);
- “Precision” призначений для введення точності розрахунків;
- “Limitations” дозволяє обрати вид обмежень та задати значення обмежень для функції;
- “Optimization” використовується, щоб вказати критерій оптимізації при розрахунках – рівновеликі допуски, максимальний об’єм допускової області, мінімальне співвідношення ціна/якість;

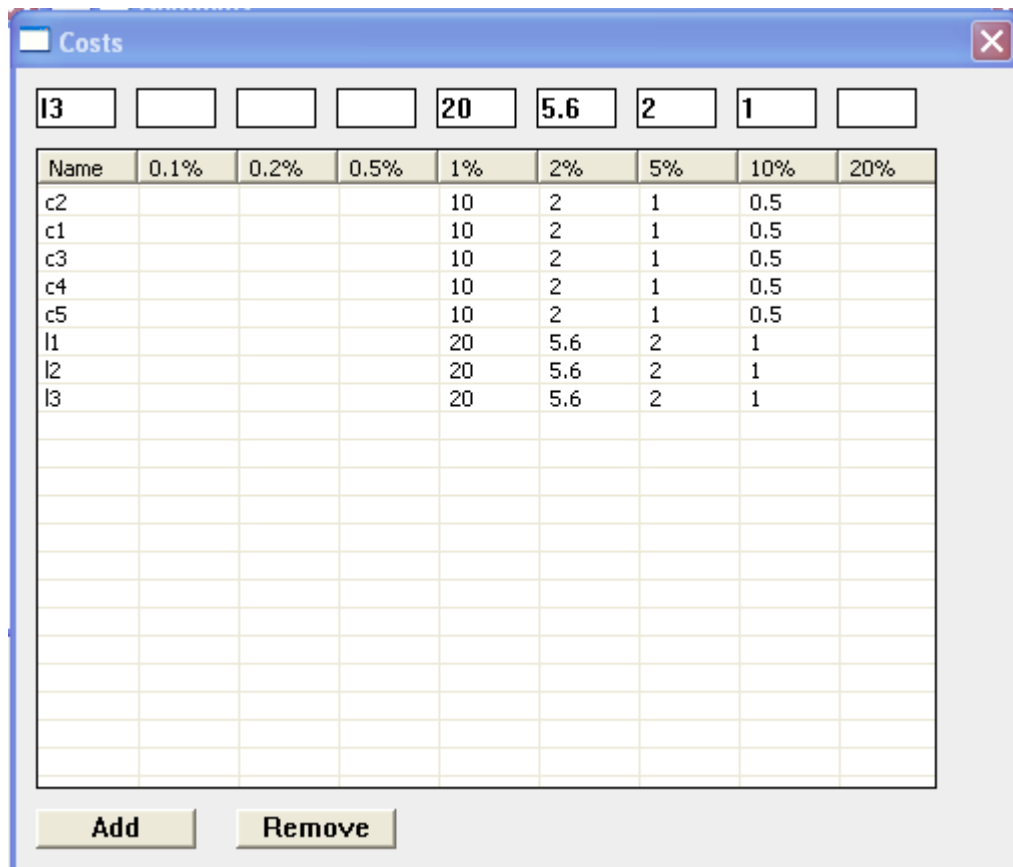


Рисунок 7.8 – Вікно введення та редагування вартості елементів в залежності від їх допустимих відхилень

- “Function” призначене для вибору джерела отримання вихідної характеристики – в автоматичному режимі, коли вихідна характеристика задається в аналітичному вигляді, або в діалогового режимі введення даних, коли значення вихідної характеристики отримують з зовнішньої системи автоматизації проектування і користувач їх вводять в процесі виконання розрахунків комп’ютерною програмою.

Пункт “Project” надає можливість обчислити імовірнісні допуски за вибраними параметрами та зберегти чи завантажити налаштування проекту. В ньому містяться наступні пункти:

“Contents” – призначений для вибору вмісту вікна;

“Values type” – меню вибору типу результатів в абсолютних, відносних значеннях або у відсотках;

“Open project” – відкриває раніше створений проект;

“Save project” – зберігає існуючий проект;

“Analysis results” – проводить аналіз відхилень за заданими вихідними даними;

“Synthesis results” – викликає процедуру створення вихідного файлу процедури синтезу відхилень.

Пункт меню “Help” містить довідкову систему.

Для проведення процедур аналізу і синтезу допусків необхідно задати вихідну характеристику. В програмному забезпеченні передбачена можливість отримання залежностей як в автоматизованому режимі, у вигляді аналітичних виразів, так і в діалоговому режимі у вигляді таблиць даних, що отримані з використанням зовнішніх САПР. Введення вихідної характеристики в аналітичному вигляді здійснюється у діалоговому вікні “Input”. Можна завантажувати функції з існуючих файлів проекту, а також вводити нові. Вікно вводу функцій в діалоговому режимі показано на рис. 7.9. Для виведення поточних результатів розрахунків використовується вікно “Output”, розміщене в нижній частині головного вікна (рис. 7.6). Після завершення процедур розрахунків автоматично генерується файл результатів results.html, який відкривається одразу у встановленій по замовчанню в операційній системі програмі перегляду html-документів. Відображення файлу результату “Синтез імовірнісних допусків” показано на рис. 7.10.

Derivative Y(X)	Derivative [c1] Y(dx)	Derivative [c2] Y(dx)	Derivative [c3] Y(dx)	Derivative [c4] Y(dx)	Derivative [c5] Y(dx)
c1 = 1.1000000000000000	c1 = 1.1000000110000000	c1 = 1.1000000000000000	c1 = 1.1000000000000000	c1 = 1.1000000000000000	c1 = 1.1000000000000000
c2 = 1.1000000000000000	c2 = 1.1000000000000000	c2 = 1.1000000110000000	c2 = 1.1000000000000000	c2 = 1.1000000000000000	c2 = 1.1000000000000000
c3 = 3.6700000000000000	c3 = 3.6700000000000000	c3 = 3.6700000000000000	c3 = 3.6700000367000000	c3 = 3.6700000000000000	c3 = 3.6700000000000000
c4 = 0.8540000000000000	c4 = 0.8540000000000000	c4 = 0.8540000000000000	c4 = 0.8540000000000000	c4 = 0.8540000085400000	c4 = 0.8540000000000000
c5 = 8.1000000000000000	c5 = 8.1000000000000000	c5 = 8.1000000000000000	c5 = 8.1000000000000000	c5 = 8.1000000000000000	c5 = 8.1000000000000000
I1 = 0.0016700000000000	I1 = 0.0016700000000000	I1 = 0.0016700000000000	I1 = 0.0016700000000000	I1 = 0.0016700000000000	I1 = 0.0016700000000000
I2 = 0.0867000000000000	I2 = 0.0867000000000000	I2 = 0.0867000000000000	I2 = 0.0867000000000000	I2 = 0.0867000000000000	I2 = 0.0867000000000000
I3 = 0.0113000000000000	I3 = 0.0113000000000000	I3 = 0.0113000000000000	I3 = 0.0113000000000000	I3 = 0.0113000000000000	I3 = 0.0113000000000000
Result	Result	Result	Result	Result	Result

Рисунок 7.9 – Вікно вводу функції в діалоговому режимі

	c1	c2	c3	c4	c5	I1	I2	I3
Nominal value	1.100000	1.100000	3.670000	0.854000	8.100000	0.001670	0.086700	0.011300
\bar{x}	0.998804	0.997281	0.998207	0.990487	0.990487	0.894763	0.997973	0.984447
\bar{w}	0.001316	0.002991	0.006580	0.008124	0.077052	0.000176	0.000176	0.000176
$\bar{\text{delta}}$	0.001196	0.002719	0.001793	0.009513	0.009513	0.105237	0.002027	0.015553
\underline{x}	1.001196	1.002719	1.001793	1.009513	1.009513	1.105237	1.002027	1.015553
\underline{w}	0.001316	0.002991	0.006580	0.008124	0.077052	0.000176	0.000176	0.000176
$\underline{\text{delta}}$	0.001196	0.002719	0.001793	0.009513	0.009513	0.105237	0.002027	0.015553

Original function: $y = (c1*5 + c2^2 - c3 + c4*c5*0.1) / (I1 + I2 + I3)$

Рисунок 7.10 – Відображення файлу результату “Синтез імовірнісних допусків”

Для формування математичної моделі області працездатності користувач викликає процедуру створення нової математичної моделі. На вкладці «Source» необхідно ввести текстовий командний опис математичної моделі. Приклад

моделі наведено на рис. 7.11. На вкладці «Parameters» необхідно вказати, що дана модель інтерпретується як функція, вказав позначку «is function».

Далі необхідно ввести імена вхідних параметрів моделі та константних значень. Після вводу текстового опису математичної моделі області працездатності та задання вхідних параметрів виконується побудова її внутрішнього представлення. Для цього на панелі інструментів необхідно натиснути кнопку «B».

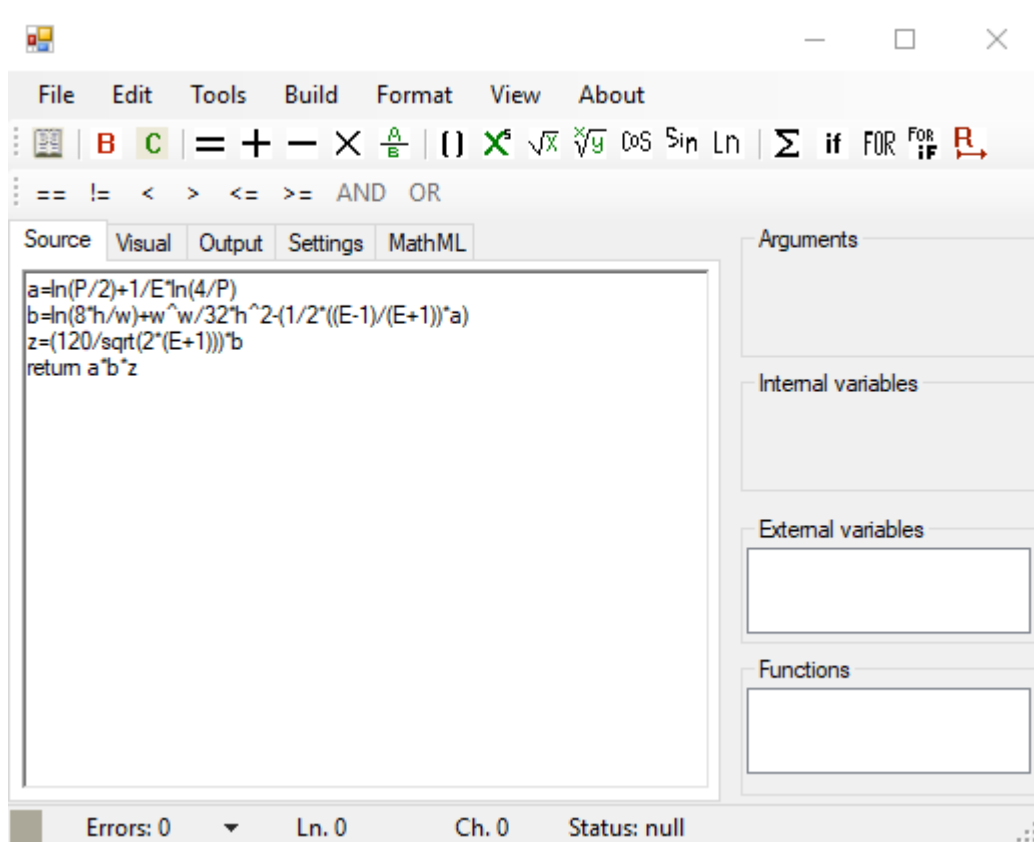


Рисунок 7.11 – Введення математичної моделі у текстовому вигляді

Якщо компіляцію внутрішнього представлення моделі виконано без помилок становиться доступно відображення математичної моделі в графічному режимі (рис. 7.12).

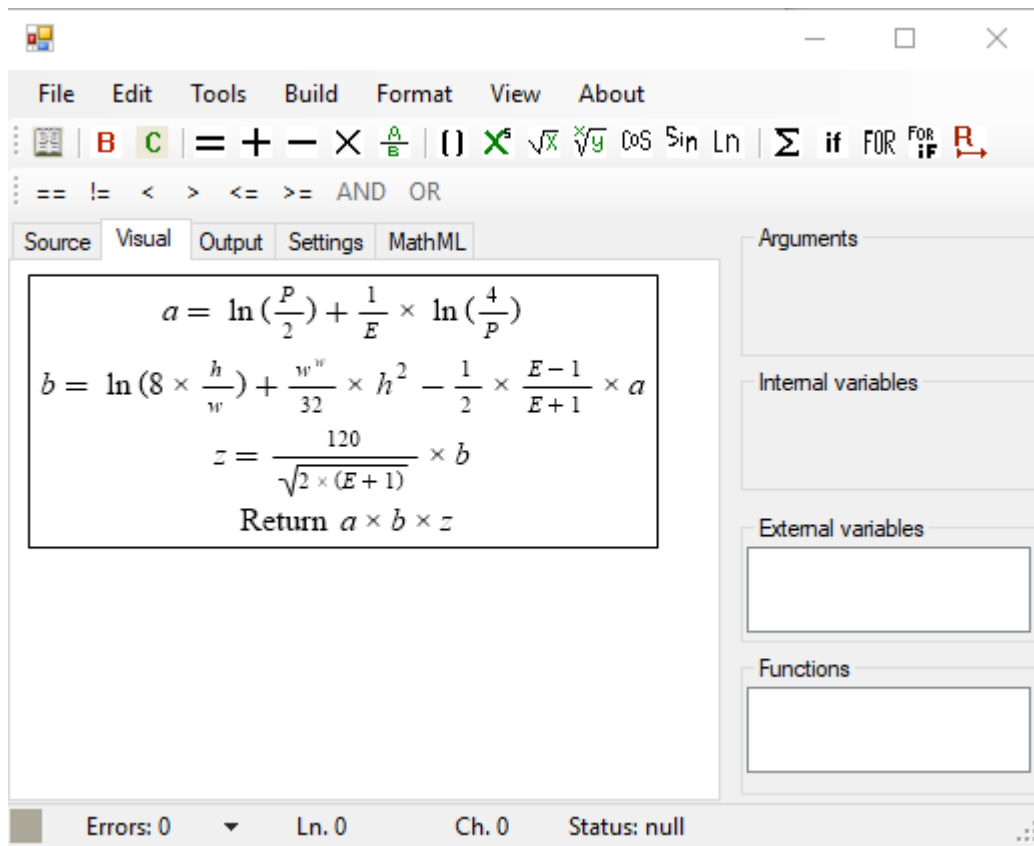


Рисунок 7.12 – Представлення математичної моделі в графічному режимі

Для призначення допусків та вибору радіоелектронних компонентів необхідно в головному меню вибрати «Синтез допусків» або «Анализ допусків». Далі обрати необхідну стратегію проектування, задати номінальну точку, діапазони зміни параметрів або вихідних характеристики.

Приклад застосування системи допускового проектування для синтезу допусків на параметри формувача імпульсу живлення. Функціонування його можна описати з допомогою математичної моделі:

$$U_+ = U_-; \quad U_{PW} \cdot e^{\frac{\tau}{R_3 C_1}} = U_{PW} \cdot (1 - e^{\frac{\tau}{R_2 C_2}})$$

Номинальні значення параметрів: $R_2 = 110$ кОм; $R_3 = 110$ кОм; $C_1 = 0,47$ мкФ; $C_2 = 0,47$ мкФ. Номинальне значення тривалості імпульсу дорівнює $\tau_r = 35,84$ мс.

В результаті розрахунку якщо відхилення тривалості імпульсу дорівнює $\Delta\tau = \pm 1$ мс, тоді інтервальні допуски (або гарантовані чи найгіршого випадку) на параметри елементів дорівнюють $\delta_R = \delta_C = \pm 1,43$ %. Якщо відхилення тривалості імпульсу дорівнює $\Delta\tau = \pm 2$ мс, тоді гарантовані допуски на параметри компонентів дорівнюють $\delta_R = \delta_C = \pm 2,86$ %. Для межових значень часу затримки значення допусків на параметри компонентів схеми наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Граничні значення часу затримки для відхилення

$\Delta\tau$, мс	Час затримки, мс	Граничні відхилення параметрів, %				Відхилення часу затримки, мс
		δ_{C1}	δ_{R3}	δ_{R2}	δ_{C2}	
± 1	$\bar{\tau}$	1,43	1,43	1,43	1,43	1,031
	$\underline{\tau}$	-1,43	-1,43	-1,43	-1,43	-1,017
± 2	$\bar{\tau}$	2,86	2,86	2,86	2,86	2,077
	$\underline{\tau}$	-2,86	-2,86	-2,86	-2,86	-2,019

Якщо параметри компонентів розподілено за нормальним законом розподілу, тоді для випадку $\Delta\tau = \pm 1$ мс; допуски дорівнюють $\delta_R = \delta_C = \pm 2,74$ %. Граничні значення часу затримки становлять $\bar{\tau} = 1,031$ мс; $\underline{\tau} = -1,017$ мс. Якщо $\Delta\tau = \pm 2$ мс, тоді $\delta_R = \delta_C = \pm 5,47$ % та граничні значення часу затримки $\bar{\tau} = 2,077$ мс; $\underline{\tau} = -2,019$ мс.

Таким чином, розроблено автоматизовану систему, що орієнтована на підприємства радіоприладобудівної галузі і може використовуватись для призначення допусків і вибору елементів із забезпеченням заданої точності і зниженням вартості елементів на етапі схемотехнічного проектування.

7.4 Методика інтеграції програмного забезпечення допускового проектування з сучасними САПР радіоелектронних пристроїв

Розробка інтерфейсного модуля для інтеграції з зовнішньою САПР системи показано на прикладі ANSYS Academic Research HF. Інтерфейсний модуль використовує скрипт для проектування конструкції коаксіального фільтра нижніх частот. Фільтр призначений для зниження рівня побічних випромінювань в спектрі зондуючих сигналів і придушення позасмугових випромінювань в спектрі вихідних сигналів підсилювальних модулів розподіленого передавального пристрою у складі антени. Технічні вимоги:

- кількість ланок 19;
- частота зрізу ФНЧ ~ 3300 МГц;
- смуга пропускання від 2800 до 3100 МГц;
- максимальні втрати в смузі пропускання не більше 0,3 дБ;
- коефіцієнт стоячої хвилі за напругою в смузі пропускання $K_{ств} \leq 1,2$;
- ефективне загасання в смузі загородження (в смузі 2-ий і 3-ій гармоніки) не менше 60 дБ: Від 5600 до 6200 МГц; від 8400 до 9300 МГц.

Тривимірний модель фільтра зображена на рис.7.13, де 1 – ступінчастий перехід, 2 – високоомна лінія (стрижень), 3-4 – низькоомна лінія (3 – латунний диск, 4 – кільце з фторопласта), 5 – повітря, 6-корпус.

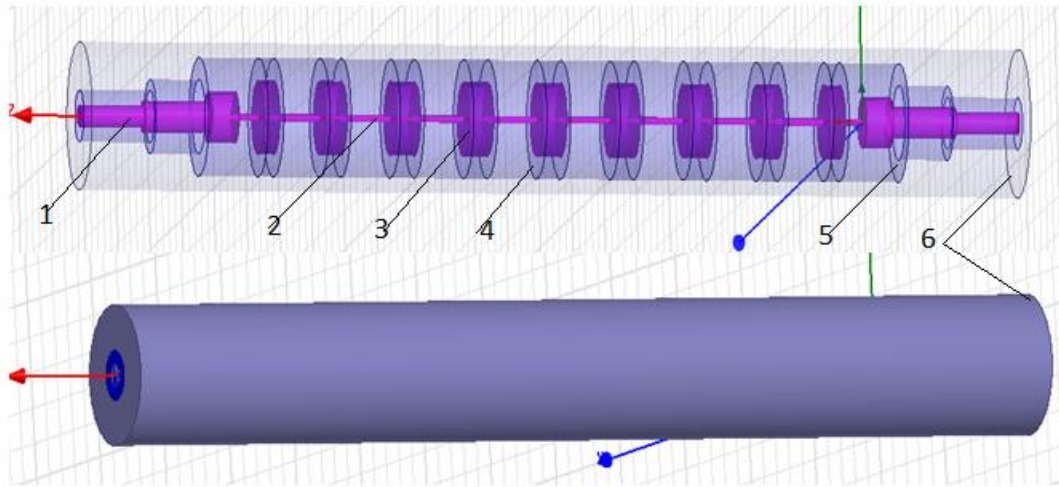


Рисунок 7.13 – Тривимірна модель конструкції коаксіального фільтра

Корпус, низькоомна лінія та стрижень коаксіального фільтра виготовлено із сплаву ЛС 59-1, діелектриком для низькоомної лінії є фторопласт – 4.

Для спрощення розробки програмного забезпечення поставлену задачу можна розбити на декілька незалежних підзадач. В цьому випадку зручно використовувати модульне програмування, що надає можливість розробити окремі програмні модулі, які призначені для: зберігання даних моделі пристрою, трансляції, об'єднання з програмними модулями системи допускового проектування. Це надає можливість зменшити обсяг текстів програм, прискорити написання і тестування програмного забезпечення, зменшити витрати на супровід програм.

Програмне забезпечення для автоматизації допускового проектування коаксіальних фільтрів нижніх частот призначено для реалізації інформаційного обміну і діалогової взаємодії з користувачем, завантаження і збереження параметрів проектування, отримання даних від зовнішньої САПР.

Структурна схема програмного забезпечення допускового проектування фільтрів нижніх частот наведена на рис. 7.14. Воно містить інтерфейсний модуль, що забезпечує введення початкових даних від користувача, інтерфейс з

автоматизованою системою призначення допусків та завантаження скриптів на виконання.

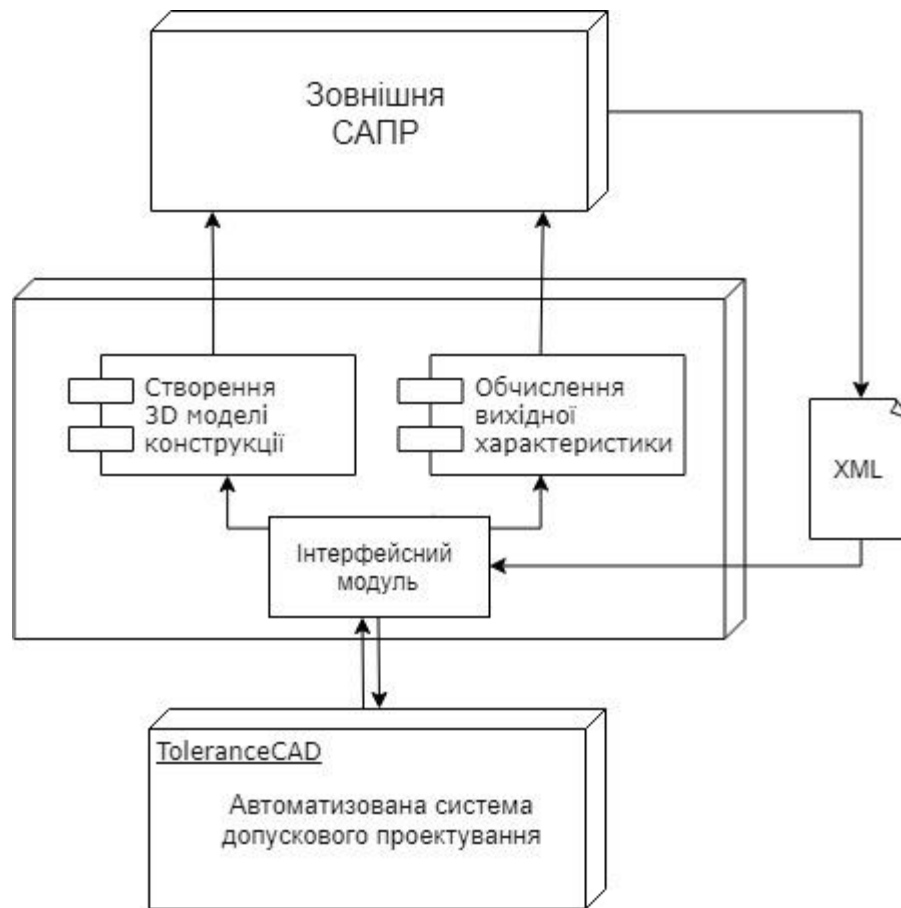


Рисунок 7.14 – Структурна схема програмного забезпечення допускового проектування фільтрів нижніх частот

Початкові дані:

- номінальні значення геометричних параметрів конструкції;
- номінальні значення параметрів матеріалів;
- параметри обчислення вихідної характеристики;
- допустиме відхилення вихідної.

За отриманими від користувача даними автоматизована система допускового

проектування виконує розрахунки та формує набори вхідних параметрів для побудови множини тривимірних моделей конструкцій фільтра. З допомогою скриптів в зовнішній САПР генеруються тривимірні моделі та проводиться аналіз, зберігаються результати у файл. Інтерфейсний модуль виконує побудову моделі вихідної характеристики в табличній формі.

За отриманою моделлю автоматизованою системою допускового проектування проводиться обчислення допусків.

Зовнішня САПР, що обрана для моделювання фільтрів підтримує дві мови створення скриптів: Visual basic script та Python [74].

Взаємодія програми з зовнішньою САПР виконується за допомогою шаблонів скриптів. Для цього використано Microsoft Visual Basic Scripting Edition (VBScript) – скриптову мову для запису макросів. VBScript базується на мові програмування Microsoft Visual Basic. Скрипт можна написати, використовуючи будь-який текстовий редактор.

Скрипт надає можливість створювати і управляти проектами, виконувати всі необхідні операції побудови моделі, такі як, наприклад, додавання елементів, завдання параметрів і матеріалів. За допомогою скрипта можна виконувати аналіз моделі, а також формувати різні звіти і зберігати їх.

У даній реалізації програмного забезпечення автоматизації допускового проектування коаксіальних фільтрів файли шаблонів скриптів не вшиті в програму, це дозволяє при необхідності редагувати їх і створювати бібліотеки шаблонів для побудови й аналізу різних типів коаксіальних фільтрів без зміни самого програмного продукту.

Скрипти формуються під час виконання програми, шляхом передачі параметрів отриманих від користувача шаблону скрипта. Скрипт запускається автоматично без участі користувача.

Кожен скрипт починається з оголошення змінних, як користувальницьких так і змінних необхідних для коректної роботи скрипта в системі.

Обов'язковими змінними є:

- oAnsoftApp – забезпечує VBScript доступ до системи;
- oDesktop – використовується для виконання операцій desktop-рівня, в тому числі управління проектами;
- oProject – відповідає проекту відкритому в продукті. Він використовується для управління проектом і його даними. Дані включають в себе змінні, визначення матеріалів і один або більше дизайн;
- oDesign – відповідає екземпляру дизайну в проекті. Цей об'єкт використовується для управління дизайном і його даними. Дані включають в себе змінні, модулі і редактори;
- oEditor – відповідає редактору, наприклад, 3D-моделювання. Цей об'єкт використовується для додавання і зміни даних в редакторі.

Розроблена бібліотека шаблонів скриптів складається з шести окремих файлів, кожен з яких відповідає за певну функцію.

При виконанні першого скрипта створюється новий проект, до нього додається дизайн і визначається тип рішення. У першому, другому і третьому скрипті формується тривимірна геометрична модель фільтра за заданими користувачем конструкторськими параметрами. Функції, що використовуються для побудови моделі :

- CreateCylinder – створює примітив циліндр;
- Subtract – вирізає вказані об'єкти;
- Unite – об'єднує вказані об'єкти;
- AssignMaterial – призначає матеріал для вказаних об'єктів;
- GetFaceByPosition – повертає ідентифікатор площини, відповідно позиції.

Основним примітивом для побудови фільтра є циліндр. Для побудови циліндра використовується команда CreateCylinder з параметрами: координати

центру, радіус, висота, вісь. Таким чином будується високоомна лінія, що представляє собою циліндричний стержень. Стержень позиціонується в початковій точці координат, у напрямку осі Z. Радіус і висоту встановлюємо відповідно до заданих користувачем значень. Далі створюються відрізки низькоомної лінії - металеві диски з кільцями із діелектрика (фторопласту). Оскільки кількість дисків може задаватись користувачем, то для їх побудови використовується цикл. Радіус і висота визначається користувачем, а координати центру розраховуються як сума висот попередніх дисків і відстані між ними.

Кільця з діелектрика створюються за тим же принципом, що і металеві диски. Координати центру і ширина відповідних диска і кільця однакові. З об'ємів діелектричних кілець шляхом вирахування (команда Subtract) мідних дисків отримуємо кільця з необхідним внутрішнім діаметром.

Наступним кроком є створення ступінчастого переходу. Геометрично перехід складається з трьох циліндрів. Окремо задаються параметри циліндрів - довжина та радіус. Позиціонування здійснюється з урахуванням попередньої геометрії. Стержень, низькоомна лінія і ступінчасті переходи об'єднуються за допомогою команди Unit.

Далі будується повітряна оболонка. Повітряна оболонка імітується за допомогою конструкції, що має вид набірних циліндрів (6 штук). Коли циліндри створені і коректно позиціоновані, вони об'єднуються командою Unit. З обсягу повітряної оболонки, за допомогою команди Subtract віднімається стержень з низькоомною лінією та ступінчастими переходами.

Останній крок – побудова корпусу. Корпус являє собою суцільний циліндр. З його об'єму віднімається повітряна оболонка, стержень з низькоомною лінією та ступінчастими переходами. Після того, як 3D-модель створена, необхідно задати матеріали конструктивних елементів. Для корпусу, стержня і дисків обирається

мідь, для циліндра, що імітує повітряну оболонку - повітря, для діелектричних кілець – фторопласт.

Наступний скрипт на вже готовій моделі визначає два порти («вхід» і «вихід») і задає їхні параметри. Потім виконуються налаштування аналізу моделі – частота і точність аналізу встановлюються відповідно до отриманих від користувача значень. Після налаштування запускається симуляція і виконується аналіз.

П'ятий і шостий скрипт призначені для формування і відображення вихідних даних. При виконанні п'ятого скрипта генерується графік вихідної функції. Також за бажанням користувача отриманий графік може бути збережено у файл. Шостий скрипт формує таблицю значень вихідної функції при заданому значенні частоти.

В таблиці 7.2 наведено візуальні компоненти інтерфейсу, що використано при розробці програмного продукту.

При проектуванні програмного продукту було використано компоненти середовища програмування Microsoft Visual C#, як візуальні (відображуються при роботі з програмою), так і невізуальні (користувач не бачить при роботі з програмою).

Інтерфейс програмного забезпечення складається з трьох основних форм і двох додаткових. До основних відносяться:

- головне вікно, що відображається при запуску програми (рис.7.15);
- вікно налаштувань аналізу технологічних допусків;
- вікно налаштувань аналізу методом найгіршого випадку.

Додаткові форми – вікно результатів аналізу і вікно «About».

Таблиця 7.2 – Компоненти Microsoft Visual C# використані при проектуванні інтерфейсу

Назва	Характеристика компоненту
Label	використовується для виводу у вікні тексту, який користувач не може редагувати під час виконання програми
TextBox	використовується для відображення тексту, дозволяє користувачу вводити та редагувати текст під час виконання програми
Button	компонент, який забезпечує функції кнопки
ComboBox	компонент, який забезпечує функції випадаючого списку
DataGridView	використовується для відображення даних у вигляді таблиці, при цьому дані беруться з бази даних
MenuStrip	невізуальний компонент, призначений для створення головного меню
TableLayoutPanel	панель, в якій вміст динамічно розташовується у вигляді сітки, що складається з рядків і стовпців
TabControl	управляє пов'язаним набором сторінок вкладок
NumericUpDown	регулятор Windows (також відомий як елемент управління "вгору-вниз"), що відображає числові значення
GroupBox	елемент управління Windows, який відображає рамку навколо групи елементів управління і, необов'язково, заголовок над нею
CheckBox	позначка Windows CheckBox
PictureBox	елемент управління графічним вікном Windows для відображення малюнка
StatusStrip	елемент управління Windows "Рядок стану"
SaveFileDialog	запитує у користувача розташування для збереження файлу
OpenFileDialog	запитує користувача про відкриття файлу
FolderBrowserDialog	видає запрошення користувачеві для вибору папки

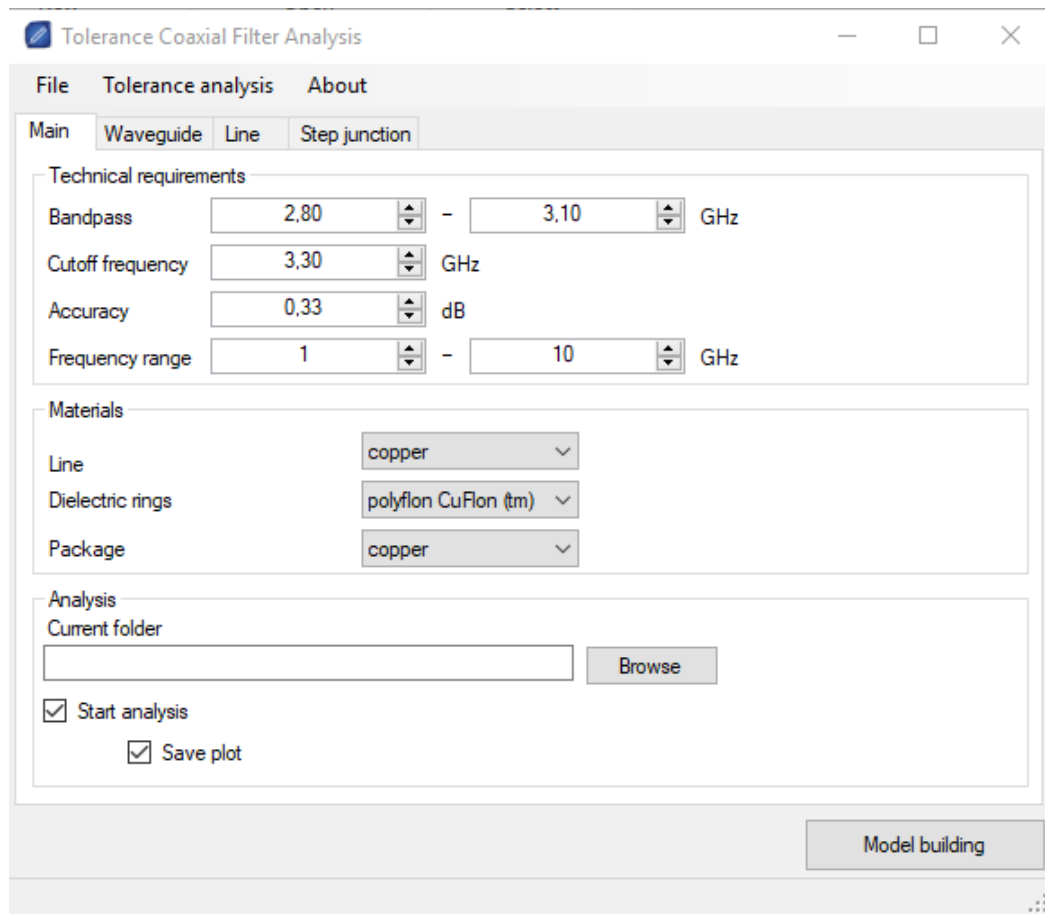


Рисунок 7.15 – Головне вікно програмного забезпечення допускового проектування фільтрів нижніх частот

Головне вікно програми має меню, що дозволяє користувачеві завантажити і зберегти значення параметрів, вийти з програми, увійти до налаштувань аналізу, дізнатись про програму. Основна частина головного вікна виконана компонентом TabControl у вигляді набору вкладок. Кожна вкладка представляє окрему групу налаштувань побудови і аналізу моделі. Вкладки «Waveguide», «Line», «Step junction» містять поля налаштувань конструктивних параметрів тривимірної моделі коаксіального фільтру: хвилеводу, коаксіальної лінії (7.16), ступінчатого переходу.

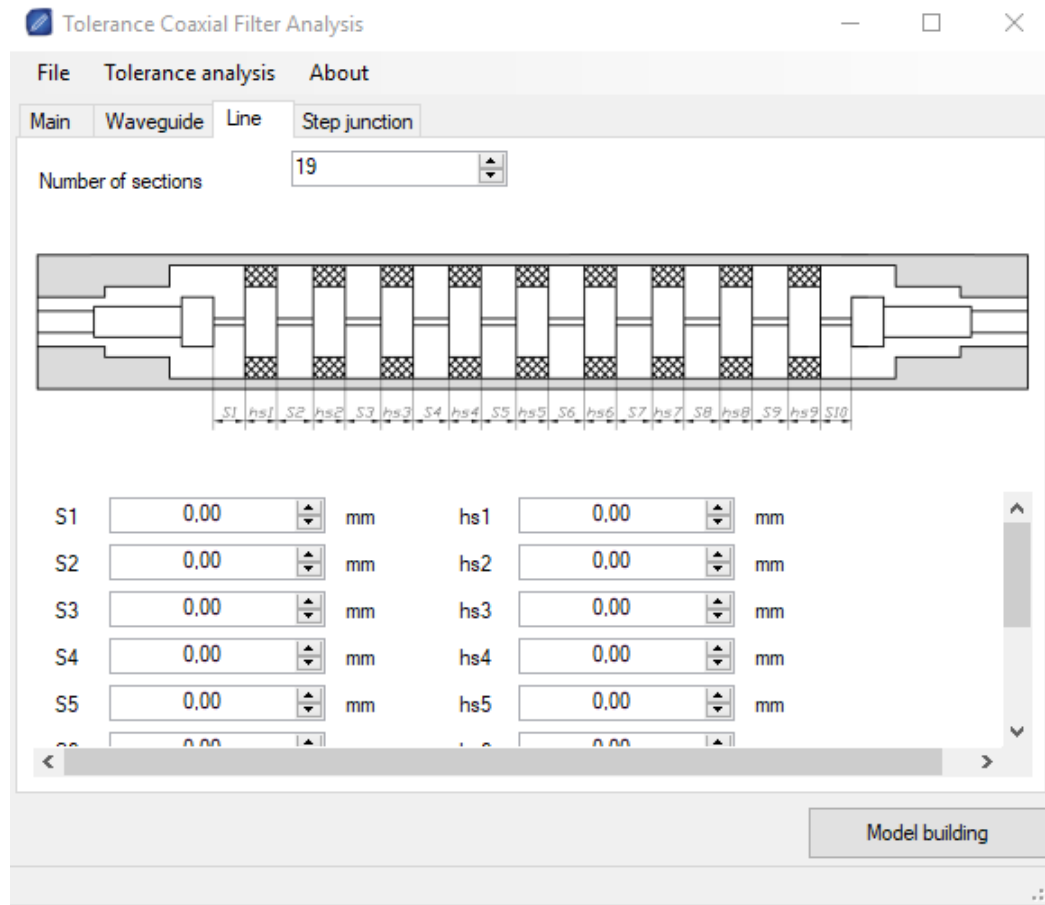


Рисунок 7.16 – Вкладка зміни параметрів лінії

У вкладці «Main» користувачеві пропонується задати параметри розрахунку, обрати матеріали для компонентів моделі, вказати папку для збереження результатів аналізу. В залежності від типу параметру використано такі компоненти як NumericUpDown, CheckBox, ComboBox. Для простоти використання у всіх основних вікнах продубльовано розміщення і структуру вкладок. Через досить велику кількість параметрів, які необхідно вводити користувачу було вирішено використовувати схематичне зображення кожної частини фільтру з вказаним розташуванням параметру. Ці зображення зберігаються у ресурсах проекту. Всі основні форми програми мають рядок стану у нижній частині. У ньому відображуються підказки щодо елементів управління при наведенні на них. У нижній частині вікна розміщена кнопка для запуску

побудови моделі. За допомогою меню користувач може відкрити вікно налаштувань аналізу технологічних допусків (рис. 7.17).

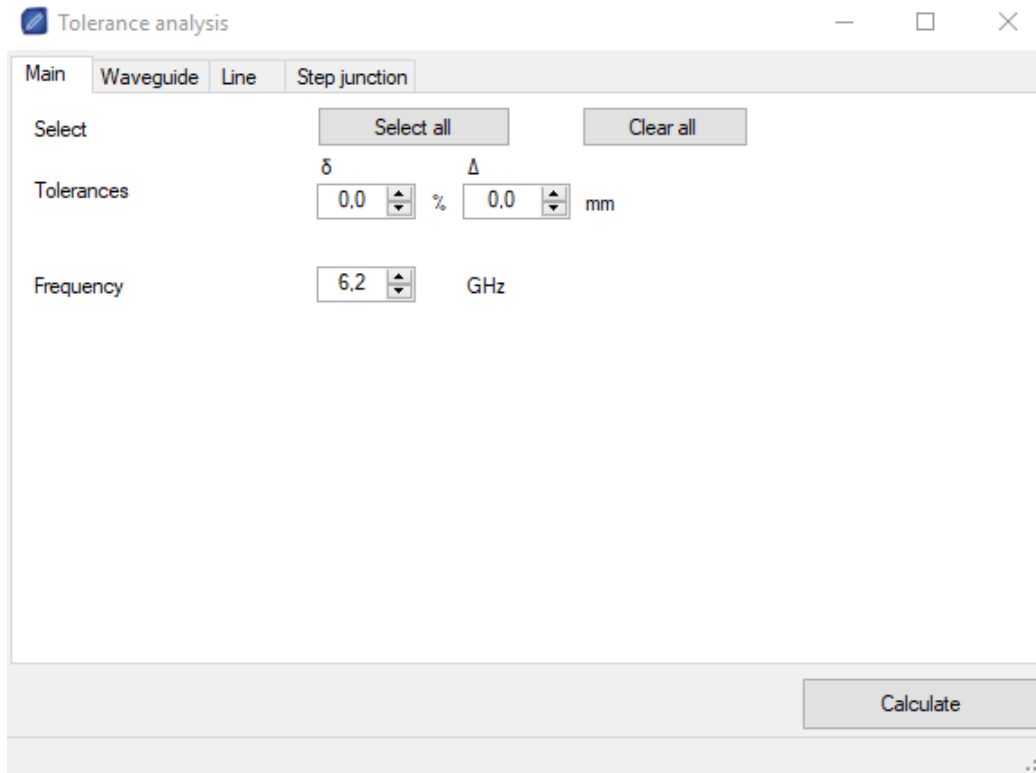


Рисунок 7.17 – Вікно налаштувань аналізу технологічних допусків

При формуванні форми налаштувань вона визначається як дочірня головної форми. Після запуску вікна налаштувань головне вікно програми залишається доступним користувачеві. Вікно налаштувань аналізу технологічних допусків містить кнопку запуску побудови і аналізу моделі, результатом якого є графік вихідної функції, що можна зберегти у файл.

У вкладках «Waveguide», «Line» та «Step junction» користувач обирає множину вхідних параметрів, вплив зміни яких на вихідну характеристику потрібно дослідити. Вибір конструктивних параметрів хвилеводу зображено на рис.7.18.

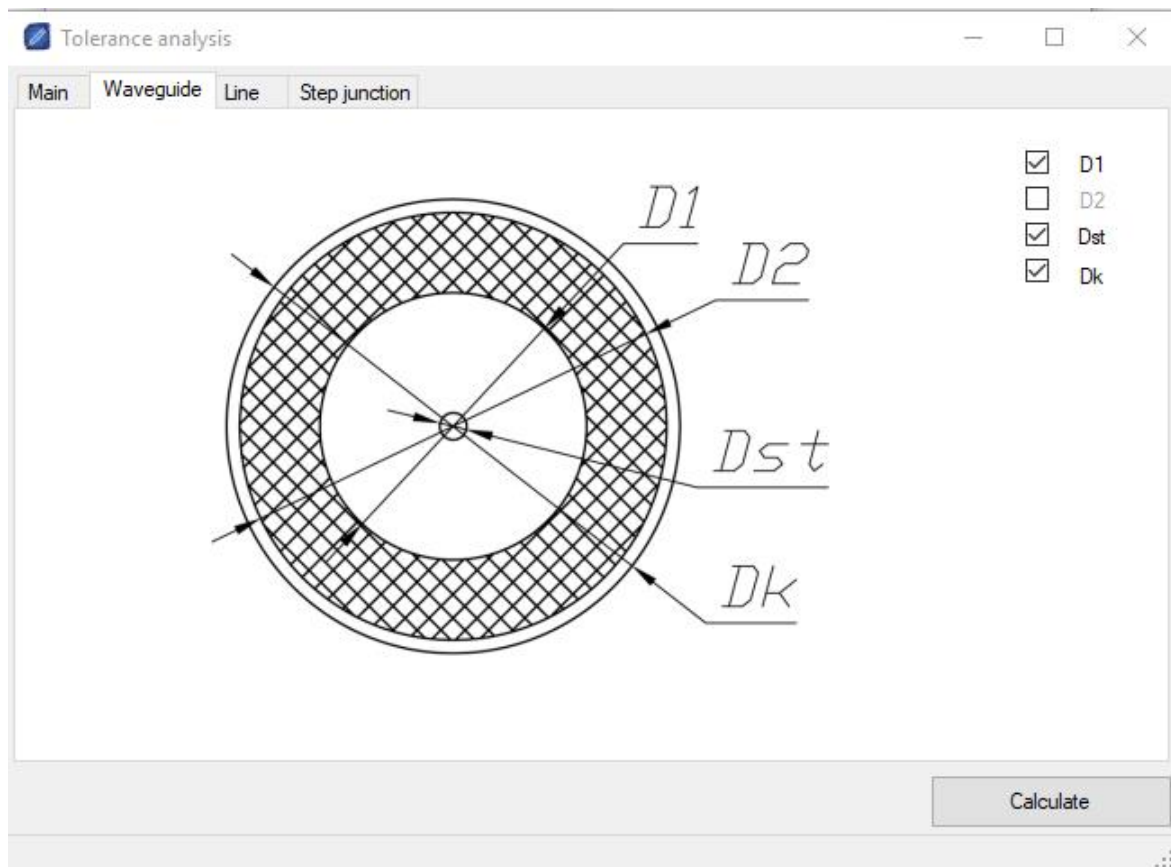


Рисунок 7.18 – Вибір конструктивних параметрів хвилеводу

Введення номінальних геометричних розмірів ступінчастого переходу та вибір конструктивних параметрів для допускового проектування (вкладка «Step junction») зображено на рис.7.19.

На рис. 7.20 наведено приклад впливу зміни конструктивних параметрів ступінчастого переходу коаксіального фільтру на АЧХ. Незначна зміна геометричних розмірів переходу приводить до суттєвого збільшення паразитної смуги пропускання. Тому дуже важливо провести обчислення допустимих відхилень на параметри ступінчастого переходу на етапі проектування конструкції фільтру.

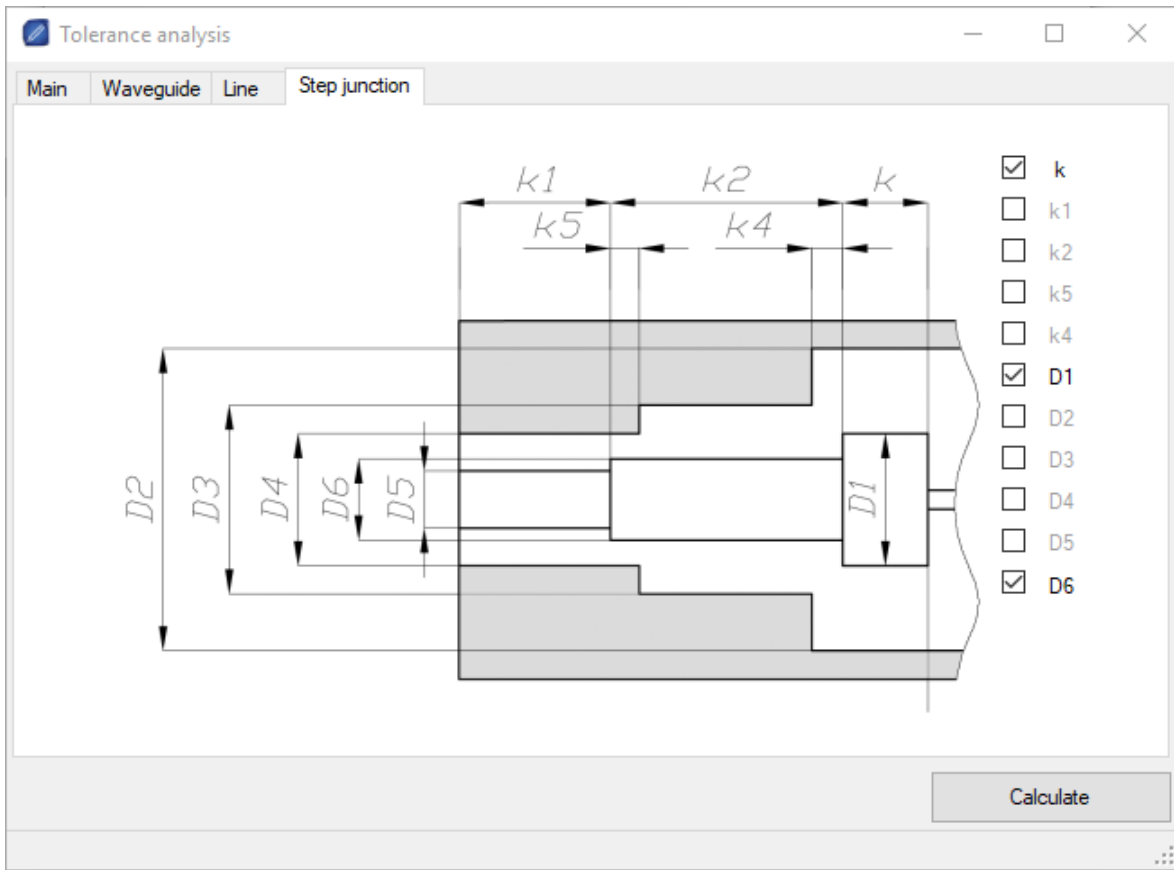


Рисунок 7.19 – Вибір конструктивних параметрів ступінчастого переходу

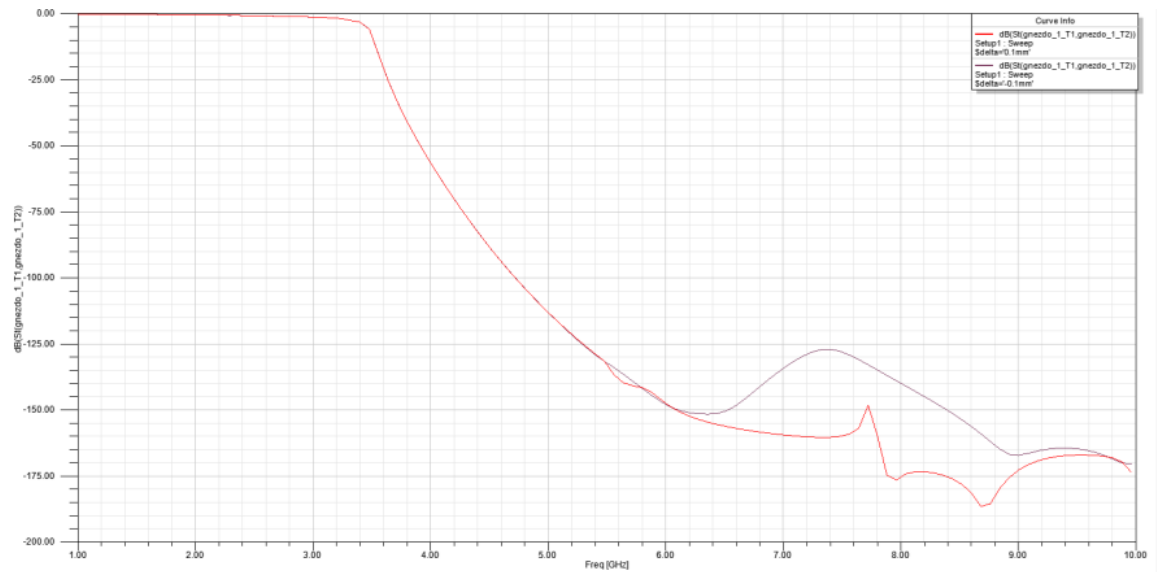
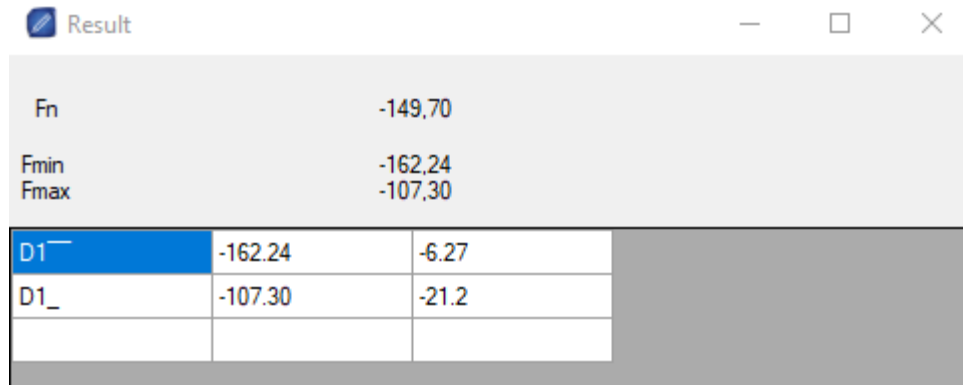


Рисунок 7.20 – Вплив зміни параметрів на АЧХ фільтра

Після виконання аналізу допусків на екрані з'являється вікно результатів (рис. 7.21). Результати містять основну інформацію розрахунку: значення функції при номінальних значеннях параметрів, мінімум і максимум функції, таблицю значень функції для кожного обраного параметра і коефіцієнт його впливу на вихідну характеристику.



Fn	-149,70	
Fmin	-162,24	
Fmax	-107,30	
D1	-162,24	-6,27
D1_	-107,30	-21,2

Рисунок 7.21 – Вікно результатів аналізу допусків

7.5 Висновки до розділу 7.

1. 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. Наведено UML діаграми моделі автоматизованої системи допускового проектування. Показано, як удосконалення MVC моделі для цього класу програмного забезпечення надає можливість створити спеціалізований каркас для створення інтерфейсу з зовнішніми САПР.

2. Розроблено лінгвістичне та програмне забезпечення допускового проектування, яке надає можливість проводити аналіз та синтез допусків за математичними моделями. Математичні моделі вводяться у символному вигляді та зберігаються в форматі XML. Показано приклад застосування такого підходу на прикладі урахування закону розподілу параметрів компонентів, кореляційних зв'язків між параметрами або дії зовнішніх чинників на етапі експлуатації. Надається можливість обчислювати допуски за різними стратегіями проектування, що відповідають або забезпеченню максимальної якості або мінімізації вартості або враховують особливості технологічного процесу (стратегія рівних допусків).

3. Інтеграція розробленої автоматизованої системи з сучасними САПР можлива трьома способами: 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, що обчислено за допомогою спеціалізованої САПР.

Результати розділу 7 опубліковано у працях:

1. 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.

2. 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.

3. 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–Slavske (Ukraine), 2012. P. 95.

4. 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.

5. 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.

ВИСНОВКИ

Отримані у дисертації наукові результати у сукупності вирішують 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.

При цьому отримані такі основні теоретичні та практичні результати, що перевищують аналоги за точністю розрахунків.

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. Обчислення допусків на параметри пристрою за запропонованими стратегіями 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) підвищує ефективність прийняття рішень з вибору елементів та електричних схем.

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 еліпсоїд, та який дає можливість значно підвищити точність призначення допусків при нормальному та рівномірному законах розподілу. Врахування закону розподілу при призначенні допусків призводить до суттєвого розширення допусків за рахунок урахування ймовірності виготовлення радіоелектронних пристроїв із параметрами, значення яких виходять за межі допустимих.

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 уможливорює обчислення допусків за математичними моделями вихідних характеристик або на основі таблично заданих функцій, отриманих за результатами роботи зовнішніх програм моделювання схем електричних принципів або інших САПР.

8. Розроблено алгоритми призначення допусків з урахуванням законів розподілу параметрів, дії зовнішніх чинників та для різних стратегій проектування. Алгоритми мають ітеративний характер, що надає можливість підвищити точність побудови математичних моделей областей працездатності для нелінійних вихідних характеристик радіоелектронних пристроїв.

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 із допомогою API функцій; в діалоговому режимі, коли користувач вводить значення вихідної характеристики, яке обчислено за допомогою спеціалізованої САПР. Такий підхід надав можливість розширити область застосування програмного забезпечення для радіоелектронних пристроїв, математичні моделі вихідних характеристик яких складно, або не можливо отримати в аналітичному вигляді.

Ефективність запропонованого математичного та програмного забезпечення для допускового проектування підтверджено результатами обчислювальних експериментів та впровадженням на підприємствах радіоприладобудівної галузі. Результати дисертаційної роботи впроваджено при проектуванні коаксіального фільтра нижніх частот на КП НВК «Іскра» та на ТОВ «Хартрон-Юком». Розроблені методи та автоматизована система допускового проектування використовується в навчальному процесі кафедри інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету при викладанні дисциплін «Автоматизація конструкторсько-технологічного проектування радіоелектронних апаратів» та «Математичне моделювання в САПР» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», що підтверджено актами впровадження.

Застосування статистично-орієнтованих підходів до створення моделей області працездатності надає можливість розширити ці методи на інші процедури проектування, наприклад, було проведено оптимізацію тепловідвідних і несучих конструкцій за масогабаритними показниками.

Розроблені методи допускового проектування можуть отримати подальший розвиток в задачах підвищення точності проектування технічних об'єктів, якщо область працездатності таких пристроїв можна описати у вигляді функцій, заданих аналітичними формулами, або таблицями значень, наприклад, в галузі машинобудування для аналізу можливості складання конструкцій або в робототехніці та мехатроніці для забезпечення точності позиціювання технічного об'єкту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобало Ю.Я., Волочій Б.Ю., Лозинський О.Ю., Мандзій Б.А., Озірковський Л.Д., Федасюк Д.В., Щербовських С.В., Яковина В.С. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 300 с.
2. Бобало Ю.Я., Недоступ Л.А., Кіселичник М.Д. Якість, надійність радіоелектронної апаратури. Елементи теорії і методи забезпечення: монографія / за ред. Л.А. Недоступа. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 196 с.
3. Lobur M., Shcherbovskykh S. V., Stefanovych T. Reliability modeling of bridge structure system with load-sharing taking into account // Proc. of int. conf. perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH'2016). 2016. Polyana P. 87–89.
4. Пиза Д.М., Звягинцев Е.А. Анализ влияния переменной базы на качество подавления помех при время-пространственной обработке сигналов // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2014. №2 С.52-56.
5. Пиза Д.М., Мороз Г.В. Метод компенсации активной составляющей комбинированной помехи в когерентно-импульсной РЛС. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2016. №6. С. 23-29.
6. Головков А., Пивоваров И., Кузнецов И. Компьютерное моделирование и проектирование радиоэлектронных средств. СПб.: Питер. 2015. 200 с.
7. Spence R., Soin R.S. Tolerance Design of Electronic Circuits // World Scientific, 2002. 232 p.
8. Бескорвайный В.В., Имангулова З.А., Петров С.В., Кошель А.В., Москаленко А.С. Синтез логической схемы системного проектирования систем

контроля крупномасштабных объектов // Наука і техніка повітряних сил збройних сил України. 2016. № 4 (49). С. 70–74.

9. Бескорвайний В.В., Евсеев В.В., Ульянова О.С. Системологический анализ проблемы автоматизированного проектирования распределенных баз данных // Вестник Херсонского национального технического университета. 2010. №2 (38). С. 120–125.

10. Бескорвайный В.В. Формирование и выбор решений задачи системного проектирования территориально распределенных систем обработки информации // Системи обробки інформації. 2002. Вип. 6 (22). С. 243–247.

11. Бескорвайный В.В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. 2002. №3. С. 94–96.

12. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М. Радио и связь. 1990. 554 с.

13. Тимченко А.А. Системний аналіз процесів та моделей взаємозв'язків і взаємодій. Лінійні динамічні системи // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2017. № 3, С. 65–71.

14. Тимченко А.А. Системний аналіз математичної задачі. Задачі побудови моделей // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2017. № 4. С. 74–81.

15. Тимченко А.А. Основи системного проектування та аналізу складних об'єктів: Основи САПР та системного проектування складних об'єктів / за ред. В.І.Бикова. Київ: Либідь, 2000. 272 с.

16. Тимченко А.А. Основи системного проектування та аналізу складних об'єктів: Основи системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки / за ред. Ю.Г. Леги. Київ: Либідь, 2004. 288 с.

17. Путятин В.Г., Валетчик В.А., Додонов В.А. Системный подход к проектированию автоматизированных систем обработки информации и

управления // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2007. № 1(9). С. 56–72.

18. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск. 2018. 626 с.
19. Михайлов А.В., Савин К.С. Точность радиоэлектронных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 214 с.
20. Шило Г.М. Формування інтервальних моделей для обчислення допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2002. №1. С. 90–95.
21. Grimbleby J.V. Computer-aided analysis and design of electronic networks. London: Pitman, 1990. 289 p.
22. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М.: Сов. радио, 1973. 200 с.
23. Zhai G., Zhou Y. and Ye X. A tolerance design method for electronic circuits based on performance degradation // Quality and reliability engineering international, 2015. Vol. 31, 635 p.
24. Бруевич Н.Г., Правоторова Е.А., Сергеев В.И. Основы теории точности механизмов. М.: Наука, 1988. 23 с.
25. Фридлиндер И.Г. Расчеты точности машин при проектировании. Киев-Донецк: Высшая школа, 1980. 184 с.
26. Львович Я.Е., Фролов В.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 192 с.
27. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1991. 360 с.
28. Цветков А.Ф. Методы расчета допусков в радиоэлектронной аппаратуре. Рязань: РРТИ, 1970. 131 с.
29. Кривошейкин А.В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей. М.: Радио и связь, 1983. 136 с.
30. Савин С.К. Точность и работоспособность радиоэлектронных систем

летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 192 с.

31. Абрамов О.В. Допуски и номиналы систем управления. М.: Наука, 1976. 187 с.
32. Абрамов О.В., Катусева Я.В. Параллельные алгоритмы анализа и оптимизации параметрической надежности // Надежность. 2005. № 4. С. 18–22.
33. Brian A. Lenertz electrical design worst-case circuit analysis: guidelines and draft standard (REV A), TOR-2013-00297. The aerospace corporation, 2013. 109 p.
34. Hayes M.J., Tadeo F. and Salazar J. Evaluation of the worst-case performance of active filters, using robust control ideas // International journal of sciences and techniques of automatic control & computer engineering IJ-STA, 2010. Vol. 4. № 2. P. 1338–1353.
35. Trinchero R., Manfredi P., Ding T., Stievano I.S. Combined parametric and worst case circuit analysis via taylor models. // IEEE Transactions on circuits and systems I: Regular papers. 2016. Vol. 63. Is. 7, P. 1067-1078.
36. Tian W., Xie-Ting, Ling Ruey-Wen Liu Novel methods for circuit worst-case tolerance analysis // IEEE trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1996. Vol. 43. P. 272–278.
37. Tian M.W., Shi R.C.-J. Worst case tolerance analysis of linear analog circuits using sensitivity bands // IEEE trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 2000. Vol. 47. P. 1138–1145.
38. Moore R.E. Methods and applications of interval analysis. Philadelphia: SIAM, 1979. 190 p.
39. Moore R.E. Interval analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1966. 145 p.
40. Шокин Ю.И. Интервальный анализ. Новосибирск: Наука, 1981. 112 с.
41. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука. 1986. 224 с.
42. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир., 1987. 360 с.

43. Фидлер М., Недома Й., Рамик Я, Рон И., Циммерманн К. Задачи линейной оптимизации с неточными данными. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008. 288 с.
44. Кулиш У., Рац Д., Хаммер Р., Хокс М. Достоверные вычисления. Базовые численные методы / пер. с англ. – Москва - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 496 с.
45. Menshikov G.G., Zelenina V.P. On interval approach to problems of radio engineering and telecommunications // Nucl. Instr. and Methods in Physics Research. 2003. V. 502. P. 742-744.
46. Kolev L.V. Interval methods for circuit analysis. Singapore: World Scientific, 1993. 307 p.
47. Kolev L.V. Worst-case tolerance analysis of linear DC and AC electric circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 2002. Vol. 49. P. 1693–1701.
48. Kolev L.V. Approximate solution of a transient tolerance problem for linear circuits // IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1992. Vol. 39. P. 666–673.
49. Spagnuolo G., Vitelli M. Worst-case tolerance design by genetic algorithms // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE-2002, 2002. Vol.4. P. 1178–1183.
50. Spagnuolo G. Worst-case tolerance design of magnetic devices by evolutionary algorithms // IEEE trans. on Magnetics. 2003. Vol. 39. P. 2170–2178.
51. Femia N., Spagnuolo G. Reliable worst-case tolerance design of feedback regulated DC-DC converters by evolutionary algorithms and interval arithmetic // IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002. Vol. 4. P. 1728–1733.
52. De Vivo B., Spagnuolo G., Vitelli M. Worst-case tolerance analysis of non-linear systems using evolutionary algorithms // Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03. 2003. Vol. 4. P. 576–579.

53. Yang C.C., Marefat M.M., Ciarallo F.W. Tolerance analysis and synthesis by interval constraint networks // Proceedings of the 1997 IEEE International conference on robotics and automation albuquerque. (New Mexico – April 1997). New Mexico, 1997. P. 2522–2527.

54. Киншт Н.В., Кац М.А. Интервальный анализ в задачах теории электрических цепей // Электричество. 1999. № 10. С. 45-57.

55. Leenaerts D.M. Application of interval analysis for circuit design // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1990. Vol. 37, Is. 6. P. 803-807.

56. Hu N., Duan B., Xu W., Zhou J. A new interval pattern analysis method of array antennas based on Taylor expansion. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, Is. 11. P. 6151-6156.

57. P. Li, W. Xu and S. Li-Wei, "Power pattern tolerance analysis of radome with the material property error based on interval arithmetic," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 1321-1324, 2017.

58. Poli L., Rocca P., Anselmi N., Massa A. Dealing with uncertainties on phase weighting of linear antenna arrays by means of interval-based tolerance analysis.// IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, Is. 7. P. 3229-3234.

59. Claudio M., Rocco S. Variability analysis of electronic systems: classical and interval methods // Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium., 1997. P. 188–193.

60. Gajda J. and Sidor T. Using Monte Carlo analysis for practical investigation of sensitivity of electronic converters in respect to component tolerances // Electrical and electronic engineering, 2012. Vol. 2 (5). P. 297–302.

61. Yan H., Wu X. and Yang J. Application of Monte Carlo method in tolerance analysis // Proceeding of the 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing (CAT 2014), Hangzhou, China, 2014. Vol. 27. P. 281–285.

62. Ripoll-Solano L.; Torres-Herrera L.; Sierra-Pérez M. Monte Carlo-based tolerance study of an end-fed resonant slotted waveguide linear array antenna

CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). 2017. P. 1–6.

63. Шарый С.П. Интервальный анализ или методы Монте-Карло? // Материалы девятой региональной конференции по математике "МАК-2006", Барнаул, 2006 С. 31–33.

64. Шарый С.П. Интервальный анализ или методы Монте-Карло? // Вычислительные технологии, 2007. Т. 12. № 1. С. 103–115.

65. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 312 с.

66. Мелник М. Основы прикладной статистики: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.

67. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.

68. Sun W., Chen R.M.M., Jiang Yao-Lin. Tolerance analysis for electronic circuit design using the method of moments // ISCAS 2002. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2002. Vol. 1. P. 565–568.

69. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М., Численные методы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 624 с.

70. Горошко А.В., Ройзман В.П. Параметричний синтез допусків як множинна обернена задача забезпечення працездатності складних технічних систем // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17, № 4. С. 43-50.

71. Royzman V., Goroshko A. Multiple inverse problem // J. Vibroengineering. 2012. Vol. 14, № 3. P. 1417–1424.

72. Goroshko A.V., Royzman V.P., Bubulis A., Juzėnas K. Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics // J. Vibroengineering. 2014. Vol. 16, № 5. P. 2178–2187.

73. Назаров Д.А. Алгоритм построения области работоспособности с детализированным квантованием области поиска // Надежность и качество: Тр. междунар. симп. 2009. Т. 2. С. 18–22.

74. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. М.: Наука, 1992. 176 с.
75. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем М.: Наука, 1989. 89 с.
76. Абрамов О.В. Катуева Я.В., Назаров Д.А. Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности // Пробл. управления. 2007. №. 6. С. 64–69.
77. Диго Г.Б., Диго Н.Б. Поиск оптимальных значений внутренних параметров технической системы по критерию запаса работоспособности // Надежность и качество: Тр. междунар. симп. 2009. С. 52–54.
78. Диго Г.Б., Диго Н.Б. Использование эллипсоидов для описания области работоспособности // Информатика и системы управления. 2008. № 1 (15). С. 22–28.
79. Алексеев О.В., Головков А.А., Пивоваров И.Ю. Автоматизация проектирования радиоэлектронных устройств / под ред. Алексеева О.В. М.: Высш. шк., 2000. 479 с.
80. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
81. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошевский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1973. 108 с.
82. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. М.: «Сов.радио», 1970. 215 с.
83. Хоч Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций. М.: Мир, 1988. 128 с.
84. Воробьев Е.А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. Л.: Судостроение, 1980. 148 с.
85. Недоступ Л.А., Удовиченко Е.Т., Шевцов Г.А. Технологические методы управления качеством радиоэлектронных измерительных устройств. М.:

Издательство стандартов, 1976. 124 с.

86. Лазько О., Недоступ Л., Бобало Ю. Оцінка безвідмовності сумісної роботи компонентів радіоелектронних пристроїв // Вісник НУ "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2001. № 415. С. 204–209.

87. Недоступ Л.А., Кіселичник М.Д., Бобало Ю.Я. Основи надійності радіоелектронних пристроїв. Львів: Львівська політехніка, 1998. 219 с.

88. Недоступ Л.А. Оптимизация контроля, регулировки и технологической приработки приборов. Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1987. 152 с.

89. Бобало Ю.Я., Бондарев А.П., Недоступ Л.А., Кіселичник М.Д., Заярнюк П.М. Прогнозування параметричної надійності радіоелектронної апаратури при двосторонньому обмеженні дрейфу визначального параметра // Технологический аудит и резервы производства. Полтавская государственная аграрная академия. 2015. Вип. 3 (2). С. 79–83.

90. Бобало Ю.Я., Бондарев А.П., Максимів І.П. Визначення області допустимих параметрів фільтрів у модифікованому детекторі сигналів із квадратурною модуляцією // Вісник Національного університету Львівська політехніка. Радіоелектроніка та телекомунікації. 2015. Випуск 818. С. 5–10.

91. Шарый С.П. О разрешимости линейной задачи о допусках // Interval Computations. 1991. № 1. С. 92–97.

92. Шарый С.П. Решение интервальной линейной задачи о допусках // Автоматика и телемеханика. 2004. № 10. С. 147–162.

93. E. Kaucher. Interval Analysis in the Extended Interval Space \mathbb{IR} . // Computing Suppl. — 1980. — №2. — P. 65-79.

94. Лакеев А.В. Существование и единственность алгебраических решений интервальных систем в полной арифметике Каухера // Вычислительные технологии. 1999. Т. 4. № 4. С. 33–44.

95. Воцинин А.П., Сотиров Г.Р. Оптимизация в условиях

неопределенности. М.: МЭИ София: Техника, 1989. 224 с.

96. Bobalo Y., Dyvak M., Krepych S., Stakhiv P. Evaluation of functional device suitability considering both random technological deviations of its parameters from their nominal values and the process of components' aging // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014. № 4 (90). P. 224–228.

97. Дивак М.П. Оцінка точності параметрів радіоелектронних кіл методами аналізу інтервальних даних // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка*'2001. Київ: ІЕД НАНУ, 2001. С. 29–31.

98. Дивак М.П., Франко Ю.П. Методи аналізу інтервальних даних стосовно оцінки технологічних процесів виготовлення інтегральних схем // *Теоретична електротехніка*. 2000. Вып. 55. С. 167–173.

99. Стахів П.Г., Дивак М.П., Крепич С.Я. Синтез радіоелектронних кіл при заданих обмеженнях на вихідні характеристики та за умов заданих допусків на параметри елементів // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2014. № 3. С. 39-47.

100. Neumaier A. Tolerance analysis with interval arithmetic // *Freiburger Intervall-Berichte*. 1986. No. 9/86. P. 5–19.

101. Neumaier A. Interval methods for systems of equations. – Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 255 p.

102. Бочков А.Ф., Евтушенко Т.В. Оптимизация режимов технологических процессов по интервальным моделям // *Вопросы кибернетики. Устройства и системы* / Сб. научн. трудов под ред. Евтихиева Н.Н. Москва: Моск. ин-т радиотехники, электроники и автоматики, 1989. С. 10–17.

103. Beaumont O., Philippe B. Linear interval tolerance problem and linear programming techniques // *Reliable Computing*. 2001. Vol. 7, No. 6. P. 433–447.

104. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. Москва: Радио и связь, 1991.

105. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических

систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988. 320 с.

106. Bobalo Y., Stakhiv P., Krepych S. Estimation of functional usability of radio electronic circuits by applying the method of confidence ellipsoids // Computational problems of electrical engineering. Lviv Polytechnic National University, 2012. № 2. P. 1–6.

107. Дивак М.П., Козак О.Л. Еліпсоїдне оцінювання допусків параметрів радіоелектронних кіл // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2009. Т. 11. № 1. С. 93–104.

108. Дивак М.П. Допустиме оцінювання області параметрів радіоелектронних кіл в класі еліпсоїдів // Теоретична електротехніка. 2002. № 56. С. 113–122.

109. Дивак М.П., Козак О.Л. Еліпсоїдне оцінювання допусків параметрів радіоелектронних кіл // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2009. Т. 11. № 1. С. 93–104.

110. Дивак М.П. Допустиме оцінювання множини параметрів статичної системи в класі багатомірних еліпсоїдів // Комп'ютинг. 2002. Т. 1. № 1. С. 108–114.

111. Дивак М.П., Козак О.Л. Оцінювання допусків параметрів статичних систем еліпсоїдними множинами на основі аналізу інтервальних даних // Екон. мат. моделювання соц.–екон. систем. 2008. Вип. 13. С. 67–78.

112. Mandziy B., Volochiy B., Ozirkovsky L. Program models for interactive design of fault-tolerant system with mixed structural redundancy taking account maintenance service strategies // Computing, 2008. Vol. 7. Issue 1. P. 161–163.

113. Жаднов В.В., Левов А.В. Повышение точности расчетов допусков комбинированным методом // Информатика-машиностроение. 1999. №1(23). С. 50–51.

114. Ермолаев Ю.П., Саттаров И.К., Харитонов М.В., Овечкин Р.М. Оценка полей допусков на выходные параметры электронных устройств с учетом

возникновения критических дефектов // Электрон. приборостр.: Приложение к журналу «Вестник КГТУ (КАИ)». 2000. № 4. С. 34–50.

115. Hofer V., Leitner J., Lewitschnig H., Nowak T., Determination of tolerance limits for the reliability of semiconductor devices using longitudinal data // Quality and reliability engineering international. Vol. 33, Is. 8, P. 2673-2683, 2017.

116. Шайко-Шайковский А.Г. Определение допустимых значений характеристик материалов при проектировании РЭА // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1998. № 2. С. 12–13.

117. Turner J.U. New methods for tolerance analysis in solid modeling // International conference on computer integrated manufacturing. 1988. P. 306–314.

118. Plante R. Multivariate tolerance design for a quadratic design parameter model // IIE Transactions. 2002. № 34. P. 565–571.

119. Neilson J.M., Ives R.L. Computer optimization and statistical tolerancing analysis of waveguide windows // Vacuum electronics conference. 2000. P. 2.

120. Koshinen T., Cheung P.Y.K. Hierarchical tolerance analysis using statistical behavioral models // IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. 1997. Vol. 15. No. 5. P. 506–516.

121. Zhang Y., Yang M.A. Quality-Oriented Statistical Tolerance Model for Improving Fit Quality // WiCOM '08. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008. P. 1–4.

122. Li M., Zou Ya., Zhang J., Zhou Q., Hu J. A statistical method for building macromodels of circuits in tolerance design // Proceedings Conference on Computer, Communication, Control and Power Engineering. 1993 TENCN '93. (19-21 Oct. 1993). Vol. 3. P. 20–23.

123. Rocha F.S.; Biajo V.H.; Mota H.O.; Maia C.A.; Vasconcelos F.H. Design and analysis of analog filters by statistical methods // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC): 2018. P. 1–6.

124. Zhang Y., Zhao D., Zhao H. Tolerance analysis of antenna array pattern in

the presence of array weights and element position errors // Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). 2016. P 1885–1888.

125. Singhal K., Pintel J.F. Statistical design centering and tolerancing using parametric sampling // IEEE Transaction on circuit and systems CAS-28. 1981. № 7. P. 692–702.

126. Bundler J.W., Abdel-Malek H.L. Optimal centering, tolerancing, and yield determination via updated approximations and cuts // IEEE Transaction on circuit and systems. CAS-25 – 1978. № 10. P. 853–871.

127. Ozev S., Orailoglu A. Boosting the accuracy of analog test coverage computation through statistical tolerance analysis // VLSI Test Symposium, 2002. P. 213–219.

128. Lee S., Yi S., Lee C. Statistical tolerance and clearance analysis for assembly // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, 1996. Vol. 2. P. 688–695.

129. Thorbjornsen A., Director S. Computer-aided tolerance assignment for linear circuits with correlated elements // IEEE trans. on Circuits and Systems. 1979. Vol. 26. № 9. P. 763–767.

130. Chen R.M.M., Lai Y.M., Lee Y.S. A CAD technique for tolerance design and yield maximization of feedback loops in switching regulators // Proceedings., 1992 IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS '92. 1992. Vol. 2. P. 746–749.

131. Foo S.W., Lin Y. Hybrid method of tolerance design // Proceedings of ICECS '99. The 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 1999. Vol. 1. P. 557–560.

132. Лычак М.М., Евтушок В.П. Расчет электронных устройств технических систем управления с использованием множественного подхода // Проблемы управления и информатики. 2000. № 1. С. 105–111.

133. Shujuan W., Hongliang G., Zhiping W. The research of parameter

optimization design method for analog circuit // Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 04. 2004. Vol. 2. P. 1515–1518.

134. Huang W.-H., Resh J.A., Wey C.-L. On synthesis of manufacturable and testable analog integrated circuits // Proceedings. 1998 Midwest Symposium on Circuits and Systems. 1998. P. 340–343.

135. Ciarallo F.W., Yang C.C. Optimization of propagation in interval constraint networks for tolerance design // IEEE International Conference on 'Computational Cybernetics and Simulation'. 1997. Vol. 2. P. 1924–1929.

136. Иншаков А.Н., Иншаков С.А. Допусковый анализ при проектировании сложных технических систем // Информационные технологии. 1997. № 1. С. 34–39.

137. Иншаков А.Н., Иншаков С.А. Решение проектных задач допускового анализа с помощью комплекса ДОПАН // Информационные технологии. 1999. № 3. С. 33–38.

138. Liu P.C.K., Li K.C. A circuit design methodology based on statistical tolerance optimization // China 1991 international conference on circuits and systems. China, Shenzhen, 1991. P. 753–756.

139. Huang M.F., Zhong Y.R., Xu Z.G. Concurrent process tolerance design based on minimum product manufacturing cost and quality loss // IEEE. 2003. P. 714–722.

140. Jing Z., Meifa H., Yanru Z., Yang H. Concurrent tolerancing based on process factors and signal-noise ratio quality loss // CAIDCD '06. 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, 2006. P. 1–5.

141. Zhang Z., Bai X., He Z. Construction of six sigma tolerance design model based on dual response surface methodology // 7th World congress on intelligent control and automation, WCICA-2008, 2008. P. 960–964.

142. Gadallah M.H., Maraghy H.A. A new algorithm for discrete tolerance

optimization // IEEE. 1994. P. 292–297.

143. Williams R.H., Hawkins C.F. Economic considerations in tolerance design // IEEE. 1996. P. 73–79.

144. Ермолаев Ю.П., Овечкин Р.М. Выбор комплектующих компонентов электронной аппаратуры по критериям стоимости компонентов и точности выходного параметра устройства // Электрон. приборостр.: Приложение к журналу “Вестник КГТУ (КАИ)”. 2001. № 3. С. 82–93.

145. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 432 с.

146. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. 369 с.

147. Chen R.M.M., Chan W.W. An efficient tolerance design procedure for yield maximization using optimization techniques and neural network // IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS '93. 1993. Vol. 3. P. 1793–1796.

148. Zielinski L., Rutkowski J. Design tolerancing with utilization of gene expression programming and genetic algorithm // In Proceedings of the international conference on signals and electronic systems, ICSES 2004 , Poznan, Poland. 2004. P. 381–384.

149. Prabhakaran G., Asokan P., Rajendran S. Sensitivity-based conceptual design and tolerance allocation using the continuous ants colony algorithm (CACO) // The international journal of advanced manufacturing technology. 2005. № 25. P. 516–526.

150. Abderrahman A., Cerny E., Kaminska B. Worst case tolerance analysis and CLP-based multifrequency test generation for analog circuits // IEEE Trans. on computer-aided design of integrated circuits and systems. 1999. Vol. 18, №. 3. P. 332–345.

151. Prabhakaran G., Asokan P., Ramesh P., Rajendran S. Genetic-algorithm-based optimal tolerance allocation using a least-cost model // Int J Adv Manuf Technol.

2004. № 24. P. 647–660.

152. Chirdchid S.A., Mazouz A.K. Genetic algorithm for combined parameter and tolerance design optimization // IEEE ICIT'02, Bangkok Thailand. 2002. P. 1223–1228.

153. Zhong F.; Li B.; Yuan B. Circuit tolerance design by differential evolution with hybrid analysis method // Eighth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI). 2016. P: 74–78.

154. Шило Г.М. Інтервальні методи обчислення допусків при проектуванні електронних апаратів: дис. канд. наук: 05.13.12 /ЗНТУ. Запоріжжя. 2003. 174 с.

155. Фарафонов О.Ю. Математичне забезпечення автоматизованого проектування мікросмужкових НВЧ фільтрів з допусковими обмеженнями: Дис. канд. техн. наук: 05.13.12 / ЗНТУ. Запоріжжя, 2006. 224 с.

156. Міщенко М.В. Математичне та програмне забезпечення автоматизованого проектування пристроїв на мікросмужкових лініях: дис. .. канд. техн. наук: 05.13.12 / НУ «ЛП». Львів, 2015. 190 с.

157. Воропай О.Ю. Математичне забезпечення призначення допусків з урахуванням особливостей електронних апаратів: дис. ... канд.техн.наук: 05.13.12 / ЗНТУ. Запоріжжя, 2008. 171 с.

158. Артюшенко Б.А. Вдосконалення генетичного алгоритму автоматизованого призначення допусків на параметри елементів радіоелектронних пристроїв: дис. ... канд.техн.наук: 05.13.12 / ЗНТУ. Запоріжжя, 2009. 199 с.

159. Коваленко Д.А. Методи призначення допусків і вибору елементів радіоапаратури з урахуванням дії зовнішніх впливів та цінових показників: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / ЗНТУ. Запоріжжя, 2010. 151 с.

160. Огренич Є.В. Вдосконалення методів автоматизованого проектування тепловідвідних елементів радіоелектронних апаратів: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / НУ «ЛП». Львів, 2016. 133 с.

161. Малюх В.Н. Введение в современные САПР. М.: ДМК Пресс, 2010.

192 с.

162. Малюх В., Левин Д., Ушаков Д. Энциклопедия PLM. Новосибирск: Азия, 2008. 445 с.

163. Павлов С. Системы электронного и электротехнического проектирования в 2016 году: обзор достижений и анализ рынка, CAD/CAM/CAE Observer. 2017. №3 (11). С. 23–36.

164. Стешенко В.Б. EDA. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств. М.: Нолидж, 2002. 768 с.

165. Суханов Ю., Ефанов О., Береза Ю. О «новом взгляде» на классификацию САПР. CAD/CAM/CAE Observer. 2007. Часть 1. №5 (35). С. 18–24.

166. Краснов М., Чигишев Ю. NX для профессионалов. М.: «ЛОРИ», 2004. 320 с.

167. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.

168. Каленкович Н.И. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования. Минск: БГУИР. 2008. 200 с.

169. Масловський Б.Г. Технології проектування комп'ютерних систем: навч. посіб. К.: НАУ, 2015. 500 с.

170. Джонс Дж.К. Методы проектирования / пер.с англ., 2-е изд., доп. М.: Мир, 1986. 326 с.

171. Саликаев Ю.Р. Математические модели и САПР электронных приборов и устройств: учеб. пособие. Томск: ТМЦДО, 2003. 129 с.

172. Лузин С.Ю. Лячек Ю.Т., Петросян Г.С., Полубасов О.Б. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.-224 с.

173. Мироненко И.Г., Суходольский В.Ю., Холуянов К.К. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР. / под ред. И.Г. Мироненко. М.: Высш. шк., 2002. 391 с.

174. Бобало Ю.Я., Желяк Р.І., Кіселичник М.Д., Колодій З.О., Мандзій Б.А.,

Якубенко В.М. Математичні моделі та методи аналізу електронних кіл. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 320 с.

175. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высш. шк., 1990. 432 с.

176. Шалумов А.С., Малютин Н.В., Кофанов Ю.Н., Способ Д.А., Жаднов В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. / под. ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. Т. 1. 368 с.

177. Суходольский В.Ю. Altium Designer: сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах (2-е издание): учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 560 с.

178. Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в Altium Designer (2-е издание). М.: ДМК Пресс, 2017. 554 с.

179. Дмитриев Е.Е. Основы моделирования в MicrowaveOffice, 2011. 177 с.

180. NI AWR MicrowaveOffice. URL: <https://www.awrcorp.com/products/ni-awr-design-environment/microwave-office-software> (дата звернення 06.04.2018).

181. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью MicrowaveOffice. М.: Солон-Пресс, 2003. 493 с.

182. Романюк В.А., Бахвалова С.А. Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office. М.: Солон-пресс, 2016. 152 с.

183. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. Москва, 2009. 246 с.

184. ANSYS HFSS. URL: www.ansys.com/Products. (дата звернення 06.04.2018).

185. Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М.: Оркада, 2012.

186. Буторов Е., Ларионов А. Обзор возможностей ANSYS HFSS для трехмерного моделирования СВЧ-устройств произвольной геометрии // САПР и графика. 2012. № 1. С. 62–65.

187. Сальникова Н.А., Астафурова О.А. Методы моделирования в системах автоматизированного проектирования СВЧ-устройств // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т.20. № 6 (133). С.14–17.

188. Собенин Н.П., Лалаян М.В., Гусарова М.А. Практикум по курсу Техника СВЧ. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 128 с.

189. Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST MicrowaveStudio. МЭИ, 2012. 152 с.

190. Алексеев О.В., Головков А.А., Приходько В.Ю. Проектирование и расчет устройств СВЧ в системе MICROWAVE HARMONICA. Спб.: СПбГЭТУ, 1997. 298 с.

191. PSpice: User's Guide includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice, Cadence Design Systems, Inc., 2005. 806 p.

192. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSPICE). М., 1996. 337 с.

193. Simulation Models and Analyses References, Technical References TR0113, Altium Limited, Version, Apr. 21. 2008. Vol. 16. 327 p.

194. Галас В.П. Моделирование и анализ электрических схем в среде Electronics Workbench. Владимир, 2003. 55 с.

195. Хернитер М.Е. Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. М.: ДМК Пресс, 2013. 488 с.

196. Шестеркин А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. М.: ДМК Пресс, 2015. 360 с.

197. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М.: Горячая линия. Телеком, 2003. 368 с.

198. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCad 9.2. М.: Солон-Р. 2001. 520 с.
199. Fitzpatrick D. Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice Newnes, 2011. 344 p.
200. PolarPlot V3 Contents / «PolarPlot» – URL: <http://www.g4hfq.co.uk/plphelp/plphelp.htm> (дата звернення 06.04.2018).
201. Описание базовой MMANA-GAL / «MMANA-GAL» – URL: <http://gal-ana.de/basicmm/ru> (дата звернення 06.04.2018).
202. Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 504 с.
203. Дорожовець М.М., Івахів О.В., Мокрицький В.О. Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення мехатронних систем. Львів: НУ «ЛП», 2009. 304 с.
204. Ефименко А.А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях. Одесса: Политехперіодика. 2013. 280 с.
205. Раскин А. Мировой рынок пассивных электронных компонентов // Электронные компоненты. 2006. № 3. С. 4–9.
206. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. М.: Радио и связь, 1989. 352 с.
207. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры (конденсаторы, резисторы). Справочник. М.: Радио и связь, 1995. 272с.
208. Скрипников А. Продукция Yageo: пассивные электронные компоненты обзор и особенности применения // Компоненты и технологии. 2002. № 8. С. 12–15/
209. Резисторы постоянные проволочные и непроволочные, переменные проволочные. СПб.: Электронстандарт, 1992. 292 с.
210. Крюков М. Высокостабильные тонкопленочные чип-резисторы фирмы

Physcomp // Компоненты и технологии. 2003. № 4. С. 16–18.

211. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.

212. Шило Г.Н. Геометрические методы назначения допусков // Проблемы управления и информатики. 2007. № 2. С. 118–126.

213. Shilo G. Geometric Method of Assigning Tolerances // Proceedings of the Workshop “Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems”. (Sofia, Bulgaria, 5-7 September, 2005). 2005. P. 512–516.

214. Shilo G. Geometric Methods of Tolerances Setting // Journal of Automation and information sciences. 2007. Vol. 39. № 3. P. 51–60.

215. Шило Г.Н., Воропай А.Ю., Гапоненко Н.П. Расчет и назначение допусков методом касательных // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2006. № 2. С. 43–53.

216. Shilo G.M. Strategies for Assigning Interval Tolerances. Cybernetics and Systems Analysis, 2015. Vol. 51. Issue 4. P. 657–666.

217. Шило Г.Н. Стратегии назначения интервальных допусков // Кибернетика и системный анализ. 2015. Т. 51. № 4. С. 176–186.

218. Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа. М: «Радио и связь», 1987. 398 с.

219. Фролов В.А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС: учеб. пособие. К.: Выща шк., 1991. 310 с.

220. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгстел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. / пер. с англ. М.: Мир, 1986. Кн. 1. 352 с.

221. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгстел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. / пер. с англ. М.: Мир, 1986. Кн. 2. 320 с.

222. 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.

223. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.

224. Знаменский А.Е., Теплюк И.Н. Активные RC-фильтры. М.: Связь, 1970. 280 с.

225. Шило Г.Н. Назначения нормальных допусков с учетом ценовых характеристик электрорадиоэлементов // Радиоэлектроника (Известия вузов). 2012. Т. 55, № 3. С. 48–56.

226. 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.

227. Shilo G. Assigning tolerances by method of smoothed vertices // Journal of automation and information sciences, Begell House, Inc, 2013. Vol. 45. Issue 10. P. 36–48.

228. Шило Г.Н. Назначение допусков методом сглаженных вершин // Проблемы управления и информатики. 2013. № 5. С. 84–95.

229. Шило Г.Н. Допусковое проектирование радиоэлектронных устройств методом сглаженных вершин // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VI Міжнародна науково-практична конференція. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 274–276.

230. Shilo G. Assigning tolerances by normalization method // The 7th IEEE International conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications. Berlin, Germany, 2013. P. 149–152.

231. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 1983. 536 с.

232. Шило Г.Н. Назначение нормальных допусков методом касательных при корреляционной связи // Науковий журнал “Прикладная радиоэлектроника. 2007.

Т. 6. № 4. С. 573–577.

233. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Расчет допусков методом касательных при корреляционной связи // Радиоэлектроника. Информатика. Управління. 2006. № 1. С. 29–32.

234. Shilo G., Kovalenko D. and Gaponenko M. Calculating tolerances by correlation tangent method. Proceedings of the International conference TSCET'2006 "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science", Lviv-Slavsko, Ukraine, 2006. P. 588–590.

235. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Расчет и назначение допусков методом касательных при корреляционной связи // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні проблеми досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій". Запоріжжя. 2006. С. 196–197.

236. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Calculating tolerances by correlation tangent method // Proceedings of the International conference TCSET'2006 "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science". Lviv. 2006. P. 588–590.

237. Shilo G. Assigning normal tolerances for correlated parameters // Proc. of IEEE Int. workshop on intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and application, Dortmund (Germany). Ternopil, 2007. P. 281–285.

238. Воропай А.Ю., Гапоненко Н.П., Шило Г.Н. Назначение интервальных допусков с учетом особенностей элементной базы // Электроника и связь. 2006. №2. С. 11–15.

239. Шило Г.М., Воропай О.Ю., Гапоненко М.П. Інтервальні методи призначення експлуатаційних допусків // Радиоэлектроника. Информатика. Управління. 2003. № 2. С. 78–82.

240. 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). 2005. Lviv-Slavsko. P. 116–118.

241. Maloratsky L.G. Passive RF & microwave integrated circuits: monograph. Newnes, 2004. 368 p.

242. Крищук В.М., Фарафонов О.Ю., Шило Г.М., Гапоненко М.П. Оптимізація допусків мікросмужкових фільтрів // Вісн. НУ «Львівська політехніка». 2003. № 470. С. 173–178.

243. 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.

244. Шило Г.М. Інтервали і інтервальні структури // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2001. № 2. С. 121–125.

245. Крищук В.М., Шило Г.М., Намлинський А.О., Гапоненко М.П. Вибір елементів при компенсації зовнішніх впливів // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2004. № 2. С. 36–41.

246. Шило Г.Н., Намлинский А.А., Гапоненко Н.П. Компенсация и оптимизация при назначении номинальных допусков // Радиоэлектроника и информатика. 2004. № 2. С. 39–43.

247. 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.

248. Шило Г.М. Інтервальні структури та їх застосування // Int. J. of Computing. 2007. V. 6 (1). С. 80–86.

249. Gardenes E., Trepas A. Fundamentals of SIGLA, an interval computing system over the completed set of intervals // Computing 24 (1980). P. 161–179.

250. Nesterov V.M. Interval and twin arithmetics // Reliable Computing. 3 (1997). P. 369–380.

251. Шило Г.Н. Назначение интервальных допусков методом отображений // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 24–33.
252. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Призначення нормальних допусків методом відображень // Науковий журнал "Радіоелектроніка. Інформатика. Управління". 2008. №1. С.37–41.
253. Воропай А.Ю., Гапоненко Н.П., Шило Г.Н. Назначение интервальных допусков с учетом особенностей элементной базы // Электроника и связь. 2006. № 1. С. 21–28.
254. 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.
255. 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.
256. Shilo G., Gaponenko N. Interval methods of assigning the nominal tolerances and choosing elements // Computing. V.2(2). 2003, P. 110–113.
257. 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". Lviv-Slavsko. 2004. P. 557–559.
258. Шило Г.М., Веснін І.М., Гапоненко М.П. Вибір стратегії призначення інтервальних допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2012. № 2. С. 52–57.
259. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Комп'ютерна програма «Автоматизована система призначення допусків і вибору елементів» // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір 46205 України / заявник Запорізькій

національний технічний університет. – опубл. 05.09.2010. 7 с.

260. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Software for tolerance design // Proceedings of the XII th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” (TCSET’2012). Lviv – Slavske, Ukraine, 2012. P. 95.

261. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 430 с.

262. Соммервилл И. Инженерия программного обеспечения. 6-е издание. / пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. 624 с.

263. Макконнелл С. Совершенный код. Мастер-класс / пер. с англ. М.: Издательство-торговый дом «Русская редакция»; СПб.: Питер, 2005. 896 с.

264. Вольфсон Б. Гибкое управление проектами и продуктами. – СПб.: Питер, 2015. – 144 с.

265. Петренко А.И. Процессно-ориентированное проектирование программных комплексов как систем сервисов // Системні дослідження та інформаційні технології. 2016. № 4, С. 46–56.

266. Петренко О.О. Особливості реалізації сервіс-орієнтованих додатків у хмарі // Системні дослідження та інформаційні технології, 2017. № 3. С. 29-42.

267. Гамма Є., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер. 2003. 368 с.

268. Вайсфельд М. Объектно-ориентированное мышление. СПб.: Питер, 2014. 304 с.

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

270. Крищук 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". 2007. № 591. С.76-81.

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

272. Крищук В.Н., Карпуков Л.М., Шило .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.

273. 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". Lviv-Slavsko. 2004. P. 575–577.

274. 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). 2005. Lviv-Slavsko. P. 86–88.

275. 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). 2005. Lviv-Slavsko. P. 93–98.

276. 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.

277. Krischuk V., Shilo G., Artyushenko B. Tolerable area creation with genetic algorithm // Proceedings of the International Conference TSCET'2006 "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science". Lviv. 2006. P. 121–124.

278. Крищук В.Н., Шило Г.Н., Артющенко Б.А. Генетический алгоритм назначения нормальных допусков // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні проблеми досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”. Запоріжжя. 2006. С. 150–151.

279. Krischuk V., Shilo G., Artushenko B. Tolerable linear antenna array design with genetic algorithm // Proceedings of the IXth International Conference CADSM 2007. Lviv-Polyana. 2007. P. 167–169.

280. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Peculiarities of the external influences compensation in specification of the normal tolerances // Proceedings of the IXth International Conference CADSM 2007. Lviv-Polyana. 2007. P. 311–314.

281. Шило Г.Н., Артющенко Б.А. Предельное оценивание характеристик направленности антенной решетки // Материалы 3-ей междунар. молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ–2007"». Севастополь: Издательство СевНТУ, 2007. С. 112.

282. Крищук В.Н., Шило Г.Н., Артющенко Б.А. Назначение гарантированных допусков с учетом производственных ограничений при помощи генетического алгоритма // Труды международной научно-практической конференции СИЭТ–2007. Одесса, 2007. С. 210.

283. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Расчет нормальных допусков и выбор элементов при внешних воздействиях // Труды международная научно-практическая конференция СИЭТ–2007. Одесса, 2007. С. 278.

284. Шило Г.Н., Артющенко Б.А., Крищук В.Н., Романенко С.Н. Допусковый анализ фракталоподобной антенны с применением метода моментов // Сборник трудов 17-й международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". К., 2007. С. 402–403.

285. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Tolerance assignment by mapping method // Proceedings of the international conference TCSET 2008. Lviv, 2008. P. 509–512.

286. Шило Г.Н., Гапоненко Н.П., Коваленко Д.А. Назначение нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий // Труды девятой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2008. С. 96.

287. Шило Г.М., Коваленко Д.А., Гапоненко М.П. Обчислення нормальних допусків з урахуванням відхилень коефіцієнтів зовнішніх впливів // Тези доповідей IV міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіоелектроніки, телекомунікацій та інформаційних технологій". Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. С. 184–186.

288. Shilo G., Kovalenko D., Gaponenko M. Selection of accuracy elements parameters under normal distribution law // Proceedings of the Xth International conference CADSM'2009. Lviv, 2009. P. 155–157.

289. Шило Г.Н., Коваленко Д.А., Гапоненко Н.П. Выбор элементов при нормальном законе распределения и внешних воздействиях // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ – 2009): труды десятой международной конференции. Одесса, Украина. 2009. Т. 2. С. 67.

290. 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.

291. 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 – Slavske, Ukraine. 2010. P. 367.

292. 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 доповідей Міжнародної науково-практичної

конференції / під заг. ред. Д. М. Пізи. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. С. 200–202.

293. 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: VI Міжнародна науково-практична конференція. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 270–272.

294. Крищук 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.

295. Shilo G., Artyushenko B., Krischuk V. CHC Algorithm for antenna array with failed elements optimization // Computing. 2008. V. 7. № 3. P. 79–85.

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

297. 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.

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
КП «ІВК» Укрпра
Ю.О. Лащенко
« 03 » 11. 2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
«Статистично-орієнтовані методи допускового проектування
радіоелектронних пристроїв»
Шило Галини Миколаївни

« 03 » 11. 2017 р. м. Запоріжжя

- Складено комісією:
- Голова – директор департаменту з конструювання та досліджень Хара Олександр Леонтійович;
 - члени комісії – начальник НДВ-2 НТЦ Бортюк Леонід Володимирович;
 - начальник КВ-4 НТЦ Ржавин Сергій Львович.

Комісія провела роботу з визначення фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи Шило Г.М. - методу згладжених вершин та програмного забезпечення для призначення допусків на конструктивні параметри та параметри матеріалів коаксіального фільтру нижніх частот.

Використання запропонованого програмного забезпечення при проектуванні фільтру надало можливість виключити появу паразитних полос пропускання

Голова комісії		О.Л.Хара
Члени комісії		Л.В.Бортюк
		С.Л.Ржавин

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ТОВ «НВП «ХАРТРОН-ІОКОМ»


Т.А. Коновальчук

« 12 » 10. 2017 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
«Статистично-орієнтовані методи допускового проектування
радіоелектронних пристроїв»
Шило Галини Миколаївни

« 12 » 10. 2017 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голови начальника лабораторії 41 Ю.М.Финогорова
посада, ПІБ
членів комісії начальника групи С.А.Якименко; начальника групи
І.Є.Козаченко; провідного інженера Ю.В.Ветхова
посада, ПІБ

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи Шило Г.М. - методу згладжених вершин для призначення допусків на електричні параметри фільтрів блоків живлення та формувача імпульсів живлення для бортових приладів ракетно-космічної техніки. Метод надав можливість визначити допустимі відхилення параметрів елементів радіоелектронних приладів на основі вписування в область працездатності багатовимірного геометричного об'єкта, форма якого залежить від закону розподілу параметрів. Було проведено обчислення допусків для нормального та рівномірного закону розподілу параметрів.

Використання запропонованого метода при проектуванні бортової апаратури надало можливість підвищити точність та надійність функціонування приладів.

Голова комісії



Ю.М.Финогенов

Члени комісії



С.А.Якименко

І.Є.Козаченко

Ю.В.Ветхов

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
та міжнародної діяльності
Запорізького національного
технічного університету



В.В.Наумик

« 14 » 09. 2017 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
«Статистично-орієнтовані методи допускового проектування
радіоелектронних пристроїв»
Шило Галини Миколаївни

« 14 » 09. 2017 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голова - декан факультету радіоелектроніки та телекомунікацій
Кабак Владислав Семенович

члени комісії доцент кафедри електронних засобів Фурманова Наталія
Іванівна та старший викладач кафедри інформаційних технологій
електронних засобів Куляба-Харитоновна Тетяна Іванівна

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи завідувача кафедри інформаційних технологій Шило Г.М. - метод згладжених вершин, метод відображень та автоматизована система допускового проектування радіоелектронних пристроїв в навчальний процес кафедри інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету. Це математичне та програмне забезпечення використовується в лекційному курсі та лабораторному практикумі з дисциплін «Автоматизація конструкторсько-технологічного проектування радіоелектронних апаратів» та «Математичне моделювання в САПР», а також при виконанні випускних кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії

В.С. Кабак

Члени комісії

Н.І. Фурманова

Т.І. Куляба-Харитоновна

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів

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 M. 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. Интервальные методы 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. Крищук 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. Крищук 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. Крищук 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. Крищук 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. Крищук 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 // Proc. 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–

Slavske (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'20004). 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-Slavske, 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. Автоматизация процедур назначения допусков и выбора элементов с учетом внешних влияний и стоимости // 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. Програмный комплекс допускового проектирования 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.

Апробація основних результатів досліджень на міжнародних конференціях

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’2007 (Львів-Славське, 2003, 2005; Львів-Поляна, 2007, 2009, 2005 та 2007р.); “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 проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ-2007"» (Севастополь); «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ-2007, (Одесса, 2007, 2008, 2009); "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", (Севастополь, 2007).