

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет "Львівська політехніка"**

**МІЩЕНКО МАРИНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 004.942, 621.372.62

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЇВ  
НА МІКРОСМУЖКОВИХ ЛІНІЯХ**

05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2015

**Дисертацією є рукопис**

**Роботу виконано** у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Фарафонов Олексій Юрійович,**  
Запорізький національний технічний університет,  
доцент кафедри "Інформаційні технології  
електронних засобів"

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Лобур Михайло Васильович,**  
Національний університет "Львівська політехніка",  
завідувач кафедри "Системи автоматизованого  
проекування";

кандидат технічних наук, доцент  
**Мілютіна Світлана Святославівна,**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, доцент кафедри "Технологія та  
автоматизація виробництва радіоелектронних та  
електронно-обчислювальних засобів "

**Захист дисертації відбудеться** "19" березня 2015 р. О 16<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

**Автореферат розісланий** "17" лютого 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор

Р.А.Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Задачі розвитку та удосконалення сучасної електронної техніки характеризуються зменшенням масогабаритних показників і собівартості, а також підвищенням якості, надійності та швидкості виробництва. У зв'язку з цим пристрої на мікросмужкових лініях (МСЛ) все впевненіше входять у сферу дровових і бездротових пристроїв, займають стійкі позиції в галузі проектування пасивних компонентів різних систем, які виконуються в інтегральному виконанні, наприклад, НВЧ фільтрів, ліній затримки, спрямованих відгалужувачів, фазообертачів.

У процесі проектування мікросмужкових ліній виникають значні труднощі при аналізі та синтезі пристроїв на їх основі. Це пов'язано з особливостями розповсюдження електромагнітних хвиль у цих пристроях. Тому, починаючи з 60-их років і по сьогоднішній день, значна кількість авторів займаються проблематикою дослідження мікросмужкових ліній та пристроїв на їх основі. Вагомий внесок у розвиток методів моделювання і проектування пристроїв на мікросмужкових лініях внесли українські та зарубіжні вчені В. О. Неганов, Б. А. Беляєв, Д. Л. Маттей, М. Д. Малютін, В. В. Конін, А. Л. Мацепура, І. Н. Прудіус, В. І. Оборжицький, В. В. Гоблик, К. С. Gupta, R. Garg, I. Bahl, R. Mitra, A. W. Glisson, R. P. Mogeria та ін.

Значна кількість робіт присвячена проектуванню та розробці методів квазістатичного, квазідинамічного й електродинамічного моделювання мікросмужкових ліній. Квазістатичні методи апіорі є менш точними ніж електродинамічні, оскільки тільки у межах низьких частот вони можуть достатньо точно описати квазі Т-хвилю, яка є основним типом хвилі в МСЛ. Електродинамічне моделювання дає повніший опис електромагнітних явищ, що протікають у мікросмужкових пристроях, проте є дуже трудомісткою операцією. Квазідинамічні методи представляють собою електродинамічні поправки до квазістатичних методів та дають достатню для інженерної практики точність при порівняно невеликих обчислювальних витратах.

Ці методи використовуються в сучасних системах автоматизованого проектування (САПР) пристроїв на МСЛ. Однак САПР обмежені слабкою увагою до того, що параметри МСЛ чутливі до змін геометричних розмірів. Іншими словами, на етапі проектування пристроїв на МСЛ з використанням сучасних САПР, розробник не має можливості оцінити ступінь відповідності його вихідних характеристик заданим при певній технології виготовлення.

Для забезпечення точності в процесі проектування необхідно проводити аналіз впливу відхилень розмірів топології від номінальних значень на вихідні характеристики мікросмужкових пристроїв або синтез допусків. Для підвищення ступеня адекватності результатів аналізу та синтезу допусків необхідно підвищувати ступінь адекватності моделювання пристроїв на МСЛ. Тому розробка програмного забезпечення проектування пристроїв на мікросмужкових лініях, основою якого будуть квазідинамічні методи моделювання МСЛ з урахуванням особливостей топології та з можливістю проведення аналізу і синтезу допусків на параметри МСЛ, є дуже актуальною.

У цій роботі було уточнено методи проектування пристроїв на МСЛ; розглянуто найпоширеніші типи неоднорідностей мікросмужкових ліній; визначено та удосконалено методи моделювання пристроїв на МСЛ у квазідинамічному наближенні; розроблено методу визначення значень емностей неоднорідностей МСЛ, що мають складну топологію; удосконалено алгоритм синтезу допускових відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв у квазідинамічному наближенні залежно від вимог технології виготовлення.

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

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт, що виконувались на кафедрі "Інформаційні технології електронних засобів" Запорізького національного технічного університету, зокрема:

- НДР "Розробка методів врахування невизначеності параметрів елементів при проектуванні і виробництві електронних апаратів" (2006-2008, підстава для виконання: рішення Науково-технічної ради Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, прот. №2 від 06.06.06). Участь автора полягала в дослідженні методів аналізу пристроїв на мікросмужкових лініях та оцінюванні їх точності.

- НДР "Розробка методів проектування радіоелектронних апаратів з урахуванням функціональних, конструктивних і технологічних обмежень" (2011-2012, підстава для виконання: рішення Науково-технічної ради Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, прот. № 2 від 18.06.09). Результати дисертаційної роботи використано при розробці математичного і програмного забезпечення синтезу й аналізу допускних відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв, що дало можливість врахувати вплив неоднорідностей мікросмужкових ліній.

- НДР "Інформаційні технології проектування тепловантажених радіоелектронних апаратів" (наказ МОН України №977 від 27.10.2012 р., № держ. реєстр. 0113U001096). Автором удосконалено алгоритм аналізу допускних відхилень, обумовлених особливостями технологічного процесу.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка математичного та програмного забезпечення підсистеми проектування пристроїв на мікросмужкових лініях з можливістю аналізу і синтезу допускних відхилень на їх геометричні параметри з урахуванням особливостей топології, використовуючи методи квазідинаміки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасні САПР мікросмужкових пристроїв та дослідити можливості цих САПР в області впливу відхилень топології та неоднорідностей на характеристики МСЛ. Провести аналіз і вибір методу аналізу та синтезу допускних відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв.

2. Розробити нові та удосконалити існуючі методи проведення квазістатичного та квазідинамічного розрахунку параметрів пристроїв на МСЛ з урахуванням особливостей топології. Для виконання цієї задачі необхідно:

- дослідити різні варіанти неоднорідностей МСЛ для врахування внесених ними змін у вихідні характеристики;
- розробити уточнені методи аналізу координатних та некоординатних топологій МСЛ для врахування взаємозв'язку елементів топології;
- дослідити методи розрахунку параметрів пристроїв на МСЛ з метою підвищення ступеня адекватності результатів.

3. Розробити вирази для визначення функції чутливості основних характеристик МСЛ у квазідинамічному наближенні з урахуванням товщини смужки, що дасть можливість на попередньому етапі синтезу та аналізу допускових відхилень визначити параметри, які призводять до найбільшої зміни вихідних характеристик.

4. Розробити методику визначення виходу придатних мікросмужкових пристроїв при їх виготовленні за певною технологією, що дасть можливість оцінити економічну доцільність виробництва.

5. Розробити програмне забезпечення для проектування мікросмужкових пристроїв у квазідинамічному наближенні з урахуванням особливостей топології МСЛ.

Об'єктом дослідження є процес проектування і виготовлення мікросмужкових пристроїв на МСЛ.

Предметом дослідження є методи проектування МСЛ, що враховують вплив похибок виготовлення на параметри мікросмужкових пристроїв.

Методи дослідження. У процесі вирішення поставлених задач застосовувались методи аналізу пристроїв на мікросмужкових лініях у квазістатичному та квазідинамічному наближеннях, розрахунки на ЕОМ з використанням наближених методів на основі апроксимаційних формул, числових методів моделювання, які використовують квазістатичний та квазідинамічний підходи, і експериментальних даних.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Вперше розроблено метод визначення значень ємностей неоднорідностей МСЛ, який, на відміну від відомих методів, дає можливість враховувати взаємний вплив усіх координатних та некоординатних елементів топології МСЛ кінцевої товщини, реалізованої на багат шаровій підложці з отворами чи без отворів в екрануючому шарі, а також дає можливість досліджувати топологічні неоднорідності складної геометрії.

2. Удосконалено метод визначення власних та взаємних ємностей елементів топології МСЛ, реалізованої на багат шаровій підложці з отворами чи без отворів в екрануючому шарі, шляхом урахування товщини металізації провідникового шару та взаємного впливу всіх елементів топології МСЛ. Це дало можливість провести уточнення при визначенні основних характеристик МСЛ у квазістатичному наближенні.

3. Удосконалено метод квазідинамічного розрахунку параметрів одно- та багатопровідних МСЛ, який відрізняється врахуванням товщини смужок та фактору травлення. Це дало можливість підвищити ступінь адекватності моделювання пристроїв на мікросмужкових лініях у квазідинамічному наближенні.

4. Вперше розроблено, на основі удосконалених формул, аналітичні вирази для визначення функцій чутливості основних характеристик МСЛ у квазідинамічному наближенні з урахуванням товщини смужок. Використання цих виразів дає можливість виявити найбільш вагомі дестабілізуючі фактори.

5. Вперше розроблено методику визначення виходу придатних пристроїв на МСЛ при їх виготовленні за допомогою певної технології, яка відрізняється можливістю врахування всіх етапів технологічного процесу виготовлення МСЛ та застосуванням теорії Ляпунова. Це дає можливість ще на етапі підготовки оцінити економічну доцільність виробництва.

#### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Використання розробленого методу розрахунку значень ємностей топологічних неоднорідностей, удосконаленого методу визначення власних та взаємних ємностей елементів топології МСЛ та удосконаленого методу квазідинамічного розрахунку основних параметрів одно- та багатопровідних МСЛ дає можливість проводити проектування багатопровідних мікросмужкових пристроїв з урахуванням товщини металізації (тобто товщини смужок) провідникового шару за умови розташування смужок струмопропускаючого шару в одній площині.

Використання зазначених методів забезпечує співрозмірну з результатами електродинамічного моделювання в системах HFSS та MWO точність розрахунків, а також забезпечує необхідну гнучкість при врахуванні топологічних неоднорідностей та допускових відхилень на геометричні параметри МСЛ.

2. Використання удосконаленого методу визначення однакових допускових відхилень на параметри МСЛ дає можливість призначати однакові допускові відхилення в межах нижніх границь та однакові допускові відхилення в межах верхніх границь. Введення вагових коефіцієнтів на кожній ітерації обчислювального процесу дає можливість збільшити об'єм допусків на 8-10 % ніж при їх введенні по завершенні обчислень.

3. На базі запропонованих методів розроблено програмне забезпечення для проектування пристроїв на мікросмужкових лініях з можливістю аналізу і синтезу допускових відхилень на їх геометричні параметри залежно від технології виготовлення. Проектування проводиться з урахуванням особливостей топології, з використанням методів квазідинаміки.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено в практику проектування модулів інтегральних НВЧ КП НВК «Іскра» (м. Запоріжжя).

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для студентів Запорізького національного технічного університету з дисциплін “Математичне моделювання в САПР”, “Радіотехнічні пристрої” напряму 6.050902. Результати досліджень використовуються в дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні положення, що становлять суть дисертації, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, які написано у співавторстві, здобувачеві належить: удосконалення методу проектування пристроїв на МСЛ, врахування особливостей технології виготовлення МСЛ при синтезі допускових відхилень [1]; розробка методу розрахунку значень ємностей топологічних неоднорідностей МСЛ на багатошаровій підложці [2, 8]; удосконалення методу розрахунку значень ємностей топологічних неоднорідностей мікросмужкових ліній, реалізованих на підложці з отвором в екрануючому шарі, врахування впливу особливостей топології МСЛ на вихідні характеристики НВЧ-пристроїв [3]; удосконалення алгоритму синтезу допускових відхилень та проведення розширення допускових відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв [4, 7]; удосконалення методу моделювання пристроїв на мікросмужкових лініях [5, 9]; синтез допускових відхилень на геометричні параметри мікросмужкового фільтру нижніх частот при врахуванні особливостей топології [6].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях:

- 9-й міжнародній науково-технічній конференції “Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці” CADSM’2007 (Львів – Поляна, 2007р.);

- V та VI міжнародних науково-практичних конференціях “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” (Запоріжжя, 2010, 2012 рр.);

- міжнародних конференціях "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії" TCSET'2012 та TCSET'2014 (Львів – Славське, 2012, 2014 рр.);

- 23-й міжнародній конференції "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" CтiMiCo (Севастопіль, 2013 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, опубліковано 11 наукових праць, у тому числі 5 статей у фахових наукових виданнях України [1-5], у тому числі 2 статті у періодичних виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах [1, 2], 6 публікацій у матеріалах та тезах доповідей конференцій [6-11].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел (163 найменування). Загальний обсяг роботи становить 190 сторінку, з них 154 основного тексту. Робота містить 66 рисунків, 17 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми та сформульовано мету і задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність роботи. Подано структуру роботи, відомості про публікації, апробацію та впровадження результатів роботи.

*Перший розділ* присвячено аналізу найбільш поширених сучасних САПР НВЧ-пристроїв, дослідженню методів аналізу пристроїв на мікросмужкових лініях та методів аналізу і синтезу допускових відхилень.

Проведено аналіз методів квазістатичного та електродинамічного аналізу мікросмужкових ліній. Квазістатичний підхід до дослідження МСЛ зводиться до визначення матриць погонних ємностей, які використовуються для розрахунку коефіцієнтів зв'язку по напрузі та струму. Електродинамічний аналіз полягає у розрахунку значень електромагнітного поля та дає можливість отримувати строгі розв'язки задач при моделюванні МСЛ. Однак, при цьому доводиться стикатися з великою розмірністю задач, які передбачають тривимірність визначення систем рівнянь у частинних похідних. Тому в роботі запропоновано проектування мікросмужкових пристроїв на основі квазідинамічного наближення, яке забезпечує електродинамічну поправку до квазістатичного наближення та дає достатню для інженерної практики точність при порівняно невеликій обчислювальній складності.

Проаналізовано методи чисельного моделювання пристроїв на МСЛ з точки зору рівня складності та області застосування цих методів. Порівняння методів моментів, кінцевих різниць та кінцевих елементів дозволило зробити висновок, що метод кінцевих елементів має більшу універсальність. У методі моментів проблема складних середовищ завжди пов'язана з пошуком відповідного подання функції Гріна. В той же час, використання функції Гріна значно зменшує розмірність вирішення задачі.

Проведено аналіз сучасних САПР НВЧ-пристроїв з точки зору методів моделювання та точності аналізу топологій класичних конструкцій МСЛ. Показано, що одним з найбільш застосованим та легкореалізованим методом моделювання у сучасних САПР є метод моментів. Тому в дисертаційній роботі обґрунтовано використання цього методу. Також, встановлено, що високу точність результатів моделювання пристроїв на МСЛ забезпечує система HFSS, однак, для більшої достовірності результатів доцільно користуватися водночас декількома системами. Аналіз сучасних САПР НВЧ-пристроїв показав наявність у їх складі інструментів оптимізації топологій МСЛ, проте відсутня можливість аналізу чутливості вихідних характеристик НВЧ-пристроїв до параметрів МСЛ та синтезу допусків залежно від технології виготовлення.

У розділі проаналізовано особливості методів аналізу і синтезу допускових відхилень на параметри МСЛ, що можуть використовуватись для



проектування пристроїв в умовах дрібносерійного та серійного виробництва. Виявлено переваги інтервальних методів розрахунку відхилень вихідної функції. При аналізі методів моделювання пристроїв на МСЛ та методів аналізу і синтезу допускових відхилень виявлено шляхи підвищення ступеня адекватності результатів проектування пристроїв на МСЛ.

Перший розділ закінчується формулюванням мети дисертаційної роботи і задач дослідження.

**Другий розділ** присвячено проектуванню пристроїв на МСЛ з використанням методів квазістатистики.

Для проектування пристроїв на МСЛ використано метод декомпозиції, оскільки цей метод дає можливість враховувати всі топологічні особливості МСЛ, а саме: можливе використання багатошарових діелектричних підложок з отворами чи без отворів в екрануючому шарі, наявність топологічних неоднорідностей МСЛ, конфігурацію струмонесучого шару. Також цей метод полегшує процес автоматизації проектування мікросмушкових пристроїв.

Для врахування топологічних неоднорідностей МСЛ розроблено метод розрахунку значень ємностей неоднорідностей, який дає можливість аналізувати координатні та некоординатні топології мікросмушкових ліній з отворами чи без отворів в екрануючому шарі на  $n$ -шаровій підложці.

Метод визначення значень ємностей топологічних неоднорідностей полягає у наступному:

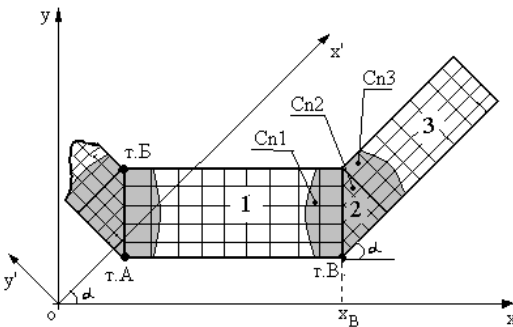


Рис. 1. Частина топології МСЛ

цьому стає можливим аналізувати області, форма яких відмінна від прямокутної, наприклад трикутна.

2. Для врахування товщини металізації провідникового шару МСЛ задається як дві МСЛ нульової товщини, що рознесені одна від одної на відстань  $t$  (рис. 2). Завдяки цьому стає можливим врахувати зміну профілю МСЛ внаслідок, наприклад, травлення (рис. 3). При цьому ефективна ширина смужки дорівнює:

$$w' = w - t / \operatorname{tg}(\arctg(t/b)). \quad (1)$$

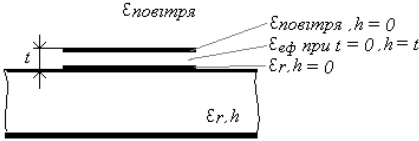


Рис. 2. Формування товщини МСЛ

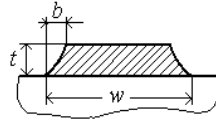
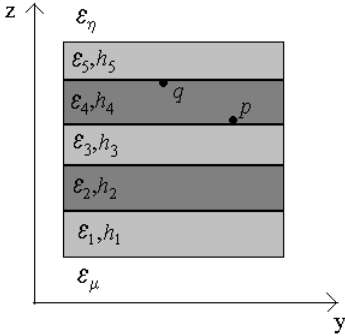


Рис. 3. Класичний вид хімічного травлення МСЛ

Рис. 4. Діелектрична структура при розташуванні точки спостереження  $p$  та точки збудження  $q$  в шарі  $\epsilon_4$ 

3. Задаються параметри діелектричних шарів. У дисертаційній роботі досліджено узагальнені п'ятишарові структури, як, наприклад, на рис.4. Якщо пристрій на МСЛ має меншу кількість шарів, то “зайві” шари необхідно задати нульовою товщиною зі значенням відносної діелектричної проникності, що дорівнює  $\epsilon_r$  найближчого шару.

4. Визначається розподілення поверхневих зарядів на провідниках:

$$\varphi(r_p) = \int_{S_n} G(r_p, r_q) \sigma(r_q) ds_q, \quad (2)$$

де  $\sigma(r_q)$  – розподілення щільності заряду на поверхні  $S_n$  провідників із заданим значенням потенціалу;

$G(r_p, r_q)$  – функція Гріна, яку для п'ятишарової структури (рис. 4) побудовано в дисертаційній роботі і вона має вигляд:

$$\begin{aligned} G(y, z+H) = & (1-\Gamma_3)(1+\Gamma_4) \left[ U_q^+(y, z+h_4+H) + \Gamma_\mu U_q^+(y, z+2h_3+2h_2+2h_1+h_4+H) \right. \\ & \left. + \Gamma_\mu \Gamma_\eta U_q^+(y, z+2h_1+2h_2+2h_3+h_4+2h_5+H) + \Gamma_\eta U_q^+(y, z+2h_5+h_4) \right] \\ & + \Gamma_\mu \Gamma_1 G(y, z+2h_1) - \Gamma_1 \Gamma_2 G(y, z+2h_2) - \Gamma_2 \Gamma_3 G(y, z+2h_3) - \Gamma_3 \Gamma_4 G(y, z+2h_4) - \\ & - \Gamma_4 \Gamma_\eta G(y, z+2h_5) + \Gamma_\mu \Gamma_2 G(y, z+2h_1+2h_2) + \Gamma_\mu \Gamma_3 G(y, z+2h_1+2h_2+2h_3) + \\ & + \Gamma_\mu \Gamma_4 G(y, z+2h_1+2h_2+2h_3+2h_4) + \Gamma_\mu \Gamma_\eta G(y, z+2h_1+2h_2+2h_3+2h_4+2h_5) - \\ & - \Gamma_1 \Gamma_3 G(y, z+2h_2+2h_3) - \Gamma_1 \Gamma_4 G(y, z+2h_2+2h_3+2h_4) - \Gamma_1 \Gamma_\eta \times \\ & \times G(y, z+2h_2+2h_3+2h_4+2h_5) - \Gamma_2 \Gamma_4 G(y, z+2h_3+2h_4) - \Gamma_3 \Gamma_\eta G(y, z+2h_4+2h_5) \\ & - \Gamma_2 \Gamma_\eta G(y, z+2h_3+2h_4+2h_5) + \Gamma_\mu \Gamma_\eta \Gamma_1 \Gamma_2 G(y, z+2h_1+2h_2+2h_3+2h_5), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\Gamma$  – коефіцієнт відбиття на границях відповідних середовищ;  $U_q^+$  – функція джерела збудження.

5. Розраховується значення ємностей топологічних неоднорідностей (рис. 1) за формулами:

$$C_H = Cn1 + Cn2 + Cn3, \quad (4)$$

де  $Cn1$ ,  $Cn3$  розраховуються за формулою

$$Cn = \frac{1}{\Phi_i} \sum_{n=1}^{Nx} \sum_{m=1}^{My} \left( \sigma_{nm} - \sigma_{0nm} \right) S_{nm}, \quad (5)$$

а  $Cn2$  за формулою

$$Cn = \frac{1}{\Phi_i} \sum_{n=1}^{Nx} \sum_{m=1}^{My} \sigma_{nm} S_{nm}, \quad (6)$$

де  $\Phi_i$  – потенціал  $i$ -ої смужки;  $Nx$  – кількість ділянок, на які поділена смужка вздовж;  $My$  – кількість ділянок, на які поділена смужка впоперек;  $S_{nm}$  – площа  $nm$ -ої ділянки;  $\sigma_{nm}$  – поверхневий заряд у центрі  $nm$ -ої ділянки;  $\sigma_{0nm}$  – поверхневий заряд у центрі  $nm$ -ої ділянки, рівновіддаленої від кінців смужки.

Такий підхід до визначення значень ємностей топологічних неоднорідностей МСЛ дозволяє з легкістю автоматизувати представлений метод. Це в подальшому полегшило процес автоматизації проектування мікросмужкових пристроїв з урахуванням особливостей топології МСЛ.

Наведені методи моделювання пристроїв на мікросмужкових лініях використано для автоматизованого синтезу допускових відхилень на параметри МСЛ за методикою, що поєднує інтервальний метод розрахунку допускових відхилень і метод аналізу немонотонних вихідних функцій. Для отримання однакових допускових відхилень у межах нижніх границь та однакових допускових відхилень у межах верхніх границь при урахуванні технологічних обмежень виготовлення МСЛ в роботі удосконалено алгоритм синтезу допускових відхилень на параметри МСЛ у такий спосіб:

– на підставі даних внутрішньої або зовнішньої інтерполяції з передатних коефіцієнтів моделі, що відповідають мінімуму або максимуму функції, визначаються найбільші передатні коефіцієнти  $\underline{AX} = \max(|a_i|)$  та  $\overline{AX} = \max(|a_i|)$ ;

– визначаються відношення передатних коефіцієнтів моделі до найбільшого коефіцієнта  $\underline{\vartheta}_i = \frac{|a_i|}{\underline{AX}}$  та  $\overline{\vartheta}_i = \frac{|a_i|}{\overline{AX}}$ ;

– розраховується сума  $\sum \underline{\vartheta}_i$  та  $\sum \overline{\vartheta}_i$ ;

– обчислюються вагові коефіцієнти параметрів моделі, що дорівнюють  $\underline{P}_i' = \frac{\vartheta_i}{\sum \vartheta_i}$  та  $\overline{P}_i' = \frac{\overline{\vartheta}_i}{\sum \overline{\vartheta}_i}$ .

Запропоновано врахування вагових коефіцієнтів параметрів моделей на кожній ітерації обчислювального процесу допускових відхилень. При цьому об'єм допусків на 8-10 % більший ніж при використанні цих коефіцієнтів по завершенні обчислень.

**Третій розділ** присвячено удосконаленню методів проектування пристроїв на МСЛ з використанням методів квазідинаміки.

Удосконалено методи аналізу багатозв'язаних та одиночних МСЛ у квазідинамічному наближенні, які було розроблено співробітником Запорізького національного технічного університету, д.т.н. Карпуковим Л.М. Суть цього методу полягає у визначенні дисперсії основних характеристик МСЛ у квазідинамічному наближенні.

Ефективна діелектрична проникність *багатозв'язаних* МСЛ у квазідинамічному наближенні визначається за допомогою виразів:

– якщо алгебраїчна сума струмів ліній не дорівнює нулю ( $I_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n I_{k_i} \neq 0$ ), то

$$\varepsilon_{efi}(f) \approx \frac{2\varepsilon_{efi}(f) \left( 1 + (k_0 h)^2 \frac{I_{\Sigma}}{2V_{0i}} \varepsilon_r \right)}{1 + (k_0 h)^2 \frac{I_{\Sigma} \varepsilon_{efi}(f) (\varepsilon_r + 1) + D(f)}{2V_{0i} \varepsilon_r}}, \quad (7)$$

– якщо алгебраїчна сума струму лінії дорівнює нулю ( $I_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n I_{k_i} = 0$ ), то

$$\varepsilon_{efi}(f) \approx \frac{2\varepsilon_{efi}(f) \left[ 1 + (k_0 h)^4 \varepsilon_r^2 T_i / V_{0i} \right]}{1 - \varepsilon_{efi}(f) \left[ \varepsilon_r^2 + 2(k_0 h)^4 \varepsilon_{efi}(f) \varepsilon_r T_i / V_{0i} + D_1(f) \right]}, \quad (8)$$

де  $i$  – номер моди;  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність матеріалу підложки товщиною  $h$ ;  $k_0$  – хвильове число вільного простору;  $T$ ,  $V_0$  – функції, які зв'язують геометричні параметри МСЛ;  $D(f)$ ,  $D_1(f)$  – функції, які зв'язують геометричні параметри МСЛ та параметри підложки;  $\varepsilon_{efi}(f)$  – квазістатична оцінка ефективної діелектричної проникності на нульовій частоті:

$$\varepsilon_{efi}(f) \approx \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \cdot \frac{V_{0i}}{\sum_{m=0}^{\infty} \Gamma^m V_{mi}}. \quad (9)$$

Провідність багатозв'язаних МСЛ визначається за допомогою виразу:

$$Y_i(f) = c \cdot C_0 \cdot V \cdot \sqrt{\varepsilon_{efi}(f)} \cdot V^{-1}, \quad (10)$$

де  $V$  – власний вектор  $[C \cdot C_0^{-1}]$ ;  $C$ ,  $C_0$  – матриці взаємних та власних погонних ємностей з урахуванням та без урахування діелектричного заповнення лінії, відповідно;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Співвідношення для визначення хвильового опору *одиночної* МСЛ у квазідинамічному наближенні має вигляд:

$$Zv(f) = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{ef}(f)}{\varepsilon_{ef}(0)}} \frac{\varepsilon_{ef}(f) - 1}{\varepsilon_{ef}(f) + 1}, \quad (11)$$

де  $Z_0$  – значення хвильового опору одиночної МСЛ, розрахованого у квазістатичному наближенні;

$$\varepsilon_{ef}(f) = \varepsilon_{ef}(0) \cdot \frac{2 \left[ 1 - \varepsilon_0 h \frac{\varepsilon_{ef}(f)}{a_0} \right]}{1 - \varepsilon_0 h \frac{\varepsilon_{ef}(f)}{a_0} (1 + \varepsilon_r) + D_2(f)}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ef}(0) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \cdot \frac{a_0}{a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^n a_n}, \quad (13)$$

де  $a_0, a_n$  – функції, які зв'язують геометричні параметри МСЛ;  $\Gamma$  – коефіцієнт відбиття;  $D_2(f)$  – функція, яка зв'язує геометричні параметри МСЛ та параметри підложки.

Для врахування товщини смужки  $t$  при визначенні  $\varepsilon_{ef}(f)$  введено поправку. Для *одиночної* лінії визначення дисперсії ефективної діелектричної проникності, що має вигляд електродинамічної поправки до квазістатичного значення  $\varepsilon_{ef}(0)$ , вираз (13) приймає наступний вигляд:

$$\varepsilon_{ef,t}(0) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \cdot \frac{a_0}{a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^n a_n} - \frac{\varepsilon_r - 1}{4.6} \cdot \frac{t/h}{\sqrt{w/h}}. \quad (14)$$

При обчисленні хвильового опору одиночної МСЛ  $Zv(f)$  (11) товщина смужки може бути врахована шляхом збільшення номінального значення ширини смужки за відомими з літератури формулами. Зміну профілю смужки запропоновано враховувати аналогічно формулі (1).

При аналізі *багатозв'язаних* МСЛ кінцеву товщину смужки враховано шляхом розрахунку ємностей з використанням ефективної ширини, яка розраховується за відомими з літератури формулами, та фактора травлення, аналогічно формулі (1). Однак виявлено, що використання ефективної ширини безпосередньо у формулах (7) та (8) веде до того, що значення ефективних діелектричних проникностей, а відповідно до (10) і значення провідностей МСЛ, збільшаться, що суперечить дійсності. Тому запропоновано визначати дисперсію ефективної діелектричної проникності  $i$ -ої моди лінії за формулою:

$$\varepsilon_{ef,i}(f) = \varepsilon_{ef,i}(0) \cdot M_i, \quad (15)$$

де  $M_i$  – вектор власних значень матриці  $[C_t \cdot C_{0t}^{-1}] \cdot [C \cdot C_0^{-1}]^{-1}$ ;  $C, C_0^{-1}$  – матриці ємностей МСЛ при діелектричному та повітряному заповненні, відповідно,

розраховані при нульовій товщині ліній;  $C_t, C_{0t}$  – матриці ємностей МСЛ при діелектричному та повітряному заповненні, відповідно, розраховані при товщині металізації лінії  $t$ .

На рис. 6 наведено результати моделювання мікросмушкового спрямованого відгалужувача. На рисунку використано позначення: 1 – квазістатичний розрахунок, 2 – квазидинамічний розрахунок без урахування ємностей неоднорідностей, 3 – квазидинамічний розрахунок з урахуванням ємностей неоднорідностей, 4 – моделювання в HFSS. За результатами обчислень встановлено, що урахування товщини металізації МСЛ, використання розробленого методу розрахунку значень ємностей неоднорідностей лінії і удосконаленого методу визначення основних параметрів МСЛ дало можливість підвищити точність моделювання пристроїв на МСЛ у межах 4-10%.

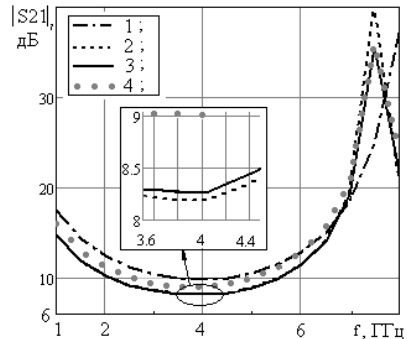


Рис. 6. Перехідне ослаблення спрямованого відгалужувача

В розділі здійснено синтез допусків відхилень на взаємозалежні та взаємозалежні параметри МСЛ з використанням моделей, отриманих наведеними методами. Виявлено, що урахування зазначених особливостей топології дає можливість розширити допуски.

Для обґрунтування економічної доцільності виробництва того чи іншого пристрою доцільним є визначення виходу придатних. Тому розроблено методику визначення виходу придатних пристроїв на МСЛ з заданими технічними характеристиками при їх виготовленні за певною технологією.

Алгоритм методики можна описати наступними кроками:

1. За допомогою інтервального методу розраховуються допуски  $\delta_i$  на геометричні параметри МСЛ, які забезпечують відхилення вихідної функції у межах  $\delta_a$ . У цьому випадку  $i = 1..m$ , де  $m$  – кількість параметрів.

2. Вводяться вагові коефіцієнти  $P_i'$  з метою отримання однакових допусків відхилень у межах нижніх границь  $-\delta_i'$  та однакових допусків відхилень у межах верхніх границь  $+\delta_i'$ .

3. Визначаються межові відхилення  $dx_j$ , що обумовлені етапами обраного технологічного процесу (ТП) виготовлення пристроїв на МСЛ ( $j=1,2..n$ , де  $n$  – кількість технологічних операцій, що впливають на формування геометрії МСЛ). Оскільки процес формування топології МСЛ налічує більше десятка технологічних операцій, то надалі можна використати теорему Ляпунова. Суть цієї теореми полягає в тому, що закон розподілення суми незалежних

випадкових величин  $dx_j$  наближається до нормального закону розподілу при необмеженому збільшенні  $n$ , якщо виконуються умови:

– всі величини мають кінцеві математичні очікування  $M(dx_j)$  та дисперсії

$$D\{x_j\};$$

– жодна з величин за значенням різко не відрізняється від інших.

Кількість  $n$  може бути менше 10, якщо всі величини мають нормальний або рівномірний закон розподілу.

Таким чином, ймовірність того, що  $\bar{dx}$  лежить в інтервалі  $[-\delta'_i; +\delta'_i]$ , можна розрахувати за формулою:

$$P1 = P \left\{ \delta'_i < \bar{dx} < +\delta'_i \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \int_{-\delta'_i}^{+\delta'_i} e^{-\frac{(dx - M(\bar{dx}))^2}{2D}} dx, \quad (16)$$

$$\text{де } \bar{dx} = \frac{dx_1 + dx_2 + \dots + dx_n}{n}.$$

4. Якщо врахувати операцію фінішного контролю, на якій з імовірністю  $\beta$  буде виявлений брак та вилучений із партії, то вихід придатних може бути обчислено за формулою:

$$P2 = \frac{P1}{1 - (1 - P1) \cdot \beta}. \quad (17)$$

У загальному випадку, для ТП виготовлення МСЛ врахування міжопераційного контролю можна провести таким чином: визначається вихід придатних кожен раз після певної кількості операцій  $n' < n$  і проводиться контроль. Внаслідок цього визначається  $P1_{n'}$  та  $P2_{n'}$  за формулами (15) та (16), відповідно. При цьому результуюче значення виходу придатних:

$$P3 = \prod_{n'=1}^n P2_{n'}. \quad (18)$$

Наявність контрольних операцій впливає на виробничі витрати таким чином:

$$C = \sum (\alpha \cdot k_j + c_j) \cdot \sum (\alpha \cdot k_{j+1} + c_{j+1}) \cdot (-\beta_j) \cdot \dots, \quad (19)$$

де  $\alpha = 1$ ,  $\alpha = 0$  – наявність та відсутність контрольної операції, відповідно;  $k$  – вартість контрольної операції;  $c_j$  – вартість  $j$ -ої операції.

Процес синтезу допускових відхилень на параметри пристроїв на МСЛ складається зі значної кількості операцій. Внаслідок цього збільшується час визначення параметрів МСЛ, зміна яких призводить до вагомій зміні основних характеристик. Для пристроїв на МСЛ, основними лініями яких є одиночні лінії, таких як, наприклад, смугопрускаючі фільтри на основі шлейфів, цей процес можна прискорити. Для цього розроблено аналітичні вирази для визначення функції чутливості основних характеристик одиночної

МСЛ у квазидинамічному наближенні з урахуванням товщини смужки. Час розрахунків за цими виразами зменшується, а результати співпадають з результатами аналізу одиночної МСЛ, наведеними у літературі, та зі значеннями передатних коефіцієнтів, отриманих при використанні інтервального методу.

Використання розроблених аналітичних виразів дало можливість проаналізувати зміну чутливості основних характеристик одиночної МСЛ від її параметрів (ширина лінії, висота та відносна діелектрична проникність підложки) залежно від частоти.

У *четвертому розділі* наведено опис реалізації програмної підсистеми MSDisTol для автоматизації проектування мікросмужкових пристроїв.

Особливістю підсистеми MSDisTol є можливість проведення аналізу та синтезу допусккових відхилень на взаємозалежні або взаємозалежні параметри пристроїв на МСЛ залежно від технології виготовлення. Для моделювання пристроїв використовуються наведені квазидинамічні методи з урахуванням особливостей топології.

У розділі наведено особливості побудови підсистеми, сформульовано вимоги до програмного інтерфейсу, розроблено структуру підсистеми (рис. 7) та визначено необхідні міжелементні зв'язки. На рис. 8 наведено схему взаємодії блоків проектування пристроїв на МСЛ з керуючою оболонкою та їх зв'язок з блоками аналізу і синтезу допусккових відхилень.

Архітектурним стилем підсистеми обрано модульну побудову, яка дає можливість легко змінювати функціональний склад підсистеми та дає можливість використати різні мови програмування. Обрано дві мови програмування: С++ та Fortran.

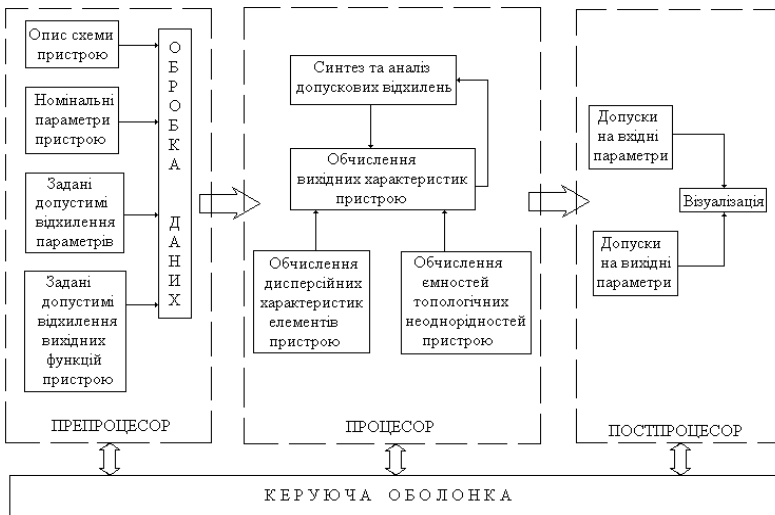


Рис. 7. Структура підсистеми MSDisTol



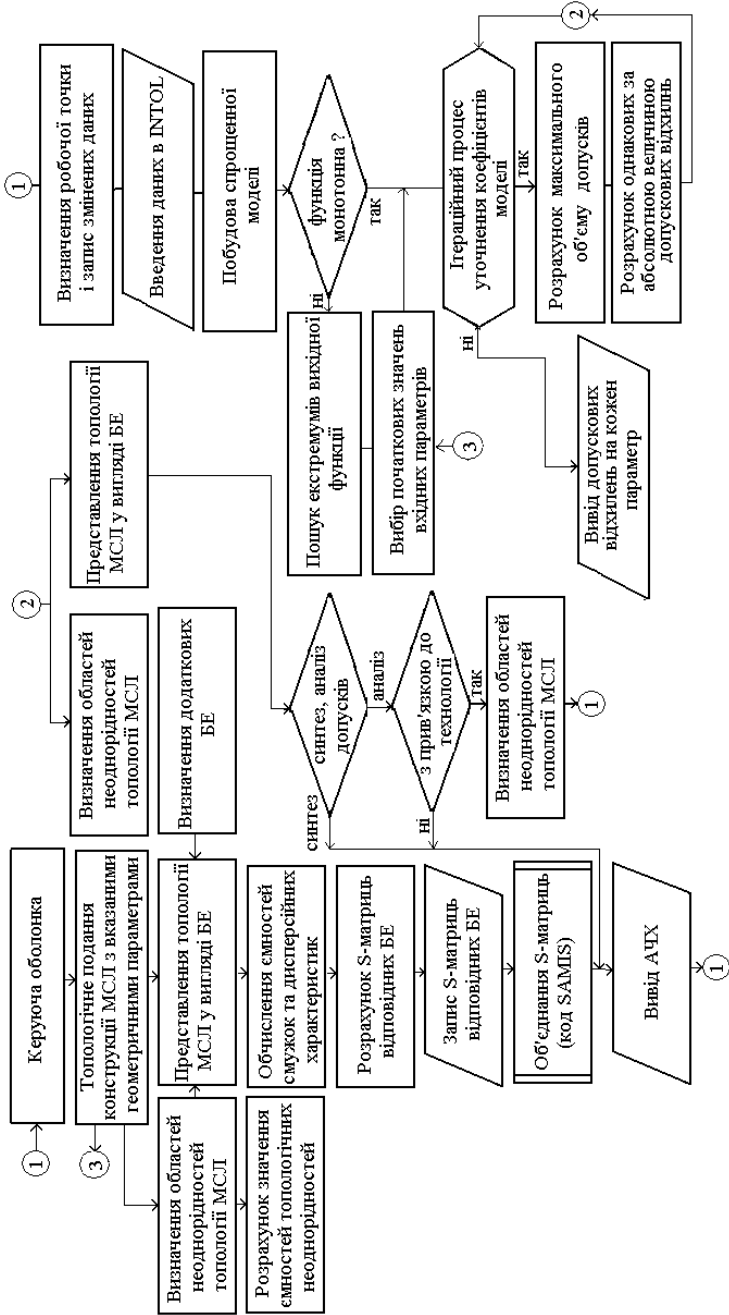


Рис. 8. Схема взаємодії блоків проектування пристроїв на МСЛ з керуючою оболонкою та їх зв'язок з блоками аналізу і синтезу допусківих відхилень

Вхідними даними для підсистеми є: параметри пристрою на МСЛ; максимально допустиме відхилення АЧХ; загальна похибка технології виготовлення; похибки різних етапів технології виготовлення.

Результатом роботи підсистеми є: АЧХ пристрою на МСЛ; допусковий відхилення на параметри мікросмужкового пристрою за етапами технології виготовлення; загальне допускове відхилення за кожним параметром; допуск на АЧХ мікросмужкового пристрою залежно від заданої технології виготовлення; значення виходу придатних пристроїв на МСЛ залежно від заданої технології їх виготовлення.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі вирішено важливу наукове завдання – розроблено та удосконалено методи проектування МСЛ у квазістатичному і квазидинамічному наближеннях та розроблено програмне забезпечення для проектування мікросмужкових пристроїв з можливістю аналізу і синтезу допускових відхилень на параметри МСЛ, що було не доступно раніше в інших САПР НВЧ-пристроїв.

В ході проведених досліджень отримано такі результати:

1. Проаналізовано можливості сучасних САПР НВЧ-пристроїв та реалізованих в них чисельних методів моделювання. Виявлено комплексні недоліки, властиві цим САПР, зокрема відсутність можливості аналізу та синтезу допускових відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв.

2. Проведено аналіз методів моделювання пристроїв на МСЛ, який показав шляхи підвищення ступеня адекватності моделей МСЛ, що будуть використані при проектуванні. Проведено аналіз і вибір методу аналізу та синтезу допускових відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв

3. Розроблено метод визначення значень ємностей топологічних неоднорідностей МСЛ на багат шаровій підложці та удосконалено метод визначення власних параметрів багатопровідних зв'язаних ліній на багат шаровій підложці. При цьому, на відміну від існуючих методів, враховується вплив всіх координатних та некоординатних топологічних елементів МСЛ, а також товщина смужок. Це дає можливість провести уточнення при визначенні власних параметрів МСЛ на багат шаровій підложці. Перевагою розробленого методу є можливість отримання залежності значень ємностей топологічних неоднорідностей МСЛ від частоти.

4. Удосконалено метод визначення вихідних характеристик пристроїв на МСЛ у квазидинамічному наближенні шляхом урахування товщини смужок та фактору травлення при визначенні дисперсійних характеристик одно- та багатозв'язаних МСЛ та шляхом урахування особливостей топології. Це дало можливість підвищити точність моделювання МСЛ у порівнянні зі квазістатичним аналізом та квазидинамічним аналізом, проведеним без урахування особливостей топології. Особливістю цього методу є можливість

аналізувати багат шарові структури при умові розташування МСЛ в одній площині. Розрахунки, проведені в дисертаційній роботі, показали, що похибка моделювання мікросмужкових пристроїв з використанням зазначеного методу в робочій смузі частот не перевищує 4% від результатів електродинамічного розрахунку.

5. Вперше розроблено аналітичні вирази функцій чутливості основних характеристик одиночних МСЛ у квазідинамічному наближенні з урахуванням товщини смужок. Ці коефіцієнти можуть бути використані для попереднього аналізу при виявленні параметрів, що найбільше впливають на зміну вихідних характеристик пристроїв та можуть служити початковими даними для проведення процедур оптимізації, аналізу і синтезу допускових відхилень.

6. Удосконалено метод визначення однакових допускових відхилень на параметри МСЛ. На відміну від попереднього методу, це дало можливість призначити допускові відхилення, значення яких в межах нижніх границь та в межах верхніх границь не різняться. Також запропоновано введення вагових коефіцієнтів на кожній ітерації процедури обчислення допускових відхилень, оскільки при цьому об'єм допусків на 8-10 % більший ніж при введенні вагових коефіцієнтів по завершенні обчислень.

7. Здійснено реалізацію наведених методів для аналізу і синтезу допускових відхилень на параметри мікросмужкових пристроїв на основі інтервальних моделей. Виявлено, що використання моделей МСЛ, отриманих за допомогою розроблених та удосконалених методів, дає можливість не тільки синтезувати більш адекватні допускові відхилення, але й оцінити можливість виготовлення пристрою на певному підприємстві.

8. Розроблено методику визначення виходу придатних пристроїв на МСЛ при виготовленні їх за допомогою певної технології, яка відрізняється можливістю врахування всіх етапів технологічного процесу виготовлення МСЛ та застосуванням теорії Ляпунова. Це дає можливість ще на етапі підготовки виробництва оцінити економічну доцільність виробництва.

9. Розроблено підсистему MSDisTol для проектування мікросмужкових пристроїв. Особливістю підсистеми є можливість моделювання МСЛ у квазідинамічному наближенні з урахуванням особливостей топології та можливість проведення аналізу і синтезу допускових відхилень на параметри МСЛ залежно від технології виготовлення. Розроблена підсистема може бути використана не тільки в умовах виробництва, але й як ефективний інструмент навчання методам автоматизованого проектування пристроїв на МСЛ.

10. Теоретичні та практичні результати впроваджено у практику виробництва КП НВК "Іскра" (м.Запоріжжя) та в навчальний процес підготовки спеціалістів за спеціальністю "Радіоелектронні апарати та засоби" Запорізького національного технічного університету.

Ефективність і достовірність запропонованих методів підтверджується результатами обчислень для тестових прикладів, проведених з використанням

запропонованих методів і даних публікацій, результатами електромагнітного аналізу в САПР, які орієнтовані на розробку пристроїв на мікросмужкових лініях, а також експериментальним даними.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мищенко М. В. Метод синтеза допусковых отклонений на геометрические параметры микрополосковых устройств / М. В. Мищенко, А. Ю. Фарафонов, Д. А. Коваленко, Ю. А. Сицилицин // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2013. – № 2. – С. 21–27.

2. Мищенко М. В. Моделювання багатопровідних зв'язаних мікросмужкових ліній у квазідинамічному наближенні з урахуванням неоднорідностей топології / М. В. Мищенко, О. Ю. Фарафонов, Ю. О. Сицилицин, В. М. Крищук, С. М. Романенко // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2013. – № 1. – С. 46–50.

3. Мищенко М. В. Исследование влияния отверстия в экранирующем слое на значение емкостей неоднородностей топологии устройств на связанных микрополосковых линиях / М. В. Мищенко, А. Ю. Фарафонов, С. Н. Романенко, Н. И. Фурманова // *Радиотехника*. – 2013. – № 173. – С. 53–56.

4. Крищук В. Н. Исследование допусковых ограничений в конструкции микрополосковых фильтров с учетом вида аппроксимации АЧХ / В. Н. Крищук, Л. М. Карпуков, М. В. Заскоцкая (Мищенко), А. Ю. Фарафонов // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2006. – № 2. – С. 20–26.

5. Фурманова Н. І. Порівняння програм проектування на прикладах моделювання мікросмужкових фільтрів з отворами в екрані / Н. І. Фурманова, О. Ю. Фарафонов, С. М. Романенко, Е. М. Шинкаренко, М. В. Мищенко // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2012. – № 2. – С. 53–56.

6. Мищенко М. В. Назначение допусков при проектировании микрополоскового шпилечного фильтра нижних частот / М. В. Мищенко / 23 Междунар. конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (CriMiCo'2013). – Севастополь, Крым, Украина, 2013. – С. 693–694.

7. Mishchenko M. Researching of the tolerances limiting in the microstrip filters designs, considering a view of approximation amplitude-frequency characteristics / M. Mishchenko, V. Krischuk, L. Karpukov, A. Farafonov // *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2007)*. – Lviv-Polyana, 2007. – P. 288–292.

8. Sitsilitsin Yu. Using of parallel computing for the quasi-static analysis of microstrip filters topology / Yuriy Sitsilitsin, Maryna Mishchenko, Nataliya Furmanova, Olexiy Farafonov / *Proc. of the Intern. Conf. "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2014)*. – Lviv-Slavsko, 2014. – P.65.

9. Mishchenko M. Synthesis and electrodynamic analysis of microstrip hairpin filters with slots in the ground plane / M. Mishchenko, N. Furmanova, A. Farafonov, K. Petrova, S. Romanenko / *Proc. of the XIth Intern. Conf. on Modern Problems of*

Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012). – Lviv-Slavsko, 2012. – P. 140.

10. Міщенко М. В. Проектування мікросмужкових спрямованих відгалужувачів на зв'язаних лініях передач / М. В. Міщенко / VI Міжнар. наук.-практ. конф. „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”. – Запоріжжя, 2012. – С. 75–76.

11. Міщенко М. В. Синтез п-зв'язаних мікросмужкових ліній передач з використанням методів квазістатистики та електродинаміки / М. В. Міщенко / V Міжнар. наук.-практ. конф. „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”. – Запоріжжя, 2010. – С. 196–197.

## АНОТАЦІЇ

**Міщенко М. В. Математичне та програмне забезпечення автоматизованого проектування пристроїв на мікросмужкових лініях.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – “Системи автоматизації проектувальних робіт”. – Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2015.

Дисертаційну роботу присвячено розробці математичного та програмного забезпечення для проектування пристроїв на мікросмужкових лініях (МСЛ) з використанням методів квазідинаміки та з можливістю аналізу і синтезу допускових відхилень на параметри МСЛ.

Розроблено новий метод розрахунку значень ємностей топологічних неоднорідностей МСЛ, удосконалено метод визначення власних і взаємних ємностей багатопрвідних зв'язаних МСЛ. Вперше розроблено аналітичні вирази функцій чутливості основних характеристик одиночних МСЛ в квазідинамічному наближенні. Удосконалено метод визначення однакових допускових відхилень на параметри МСЛ. Розроблено методику визначення виходу придатних пристроїв на МСЛ при їх виготовленні за допомогою певної технології.

*Ключові слова:* пристрій на мікросмужкових лініях, автоматизоване проектування, математичне та програмне забезпечення, топологічна неоднорідність, квазідинамічне наближення.

**Мищенко М. В. Математическое и программное обеспечение автоматизированного проектирования устройств на микрополосковых линиях.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – “Системы автоматизации проектировочных работ”. – Национальный университет “Львовская политехника” МОН Украины, Львов, 2015.

Диссертационная работа посвящена разработке математического и программного обеспечения для проектирования устройств на

микрополосковых линиях (МПЛ) с использованием методов квазидинамики и с возможностью анализа и синтеза допусковых отклонений на параметры МПЛ. Разработанная программа реализует процедуры синтеза допусковых отклонений, недоступные ранее в других САПР СВЧ-устройств, и обеспечивает практическую эффективность при проектировании реальных конструкций микрополосковых устройств

Разработан метод определения значений емкостей топологических неоднородностей МПЛ на многослойной подложке и усовершенствован метод определения собственных параметров многопроводных связанных линий на многослойной подложке. При этом учитывается влияние всех координатных и некоординатных топологических элементов МПЛ, а также толщина полосок. Усовершенствовано определение выходных характеристик устройств на микрополосковых линиях в квазидинамическом приближении путем учета толщины полосок, фактора травления и учета особенностей топологии. Впервые разработаны аналитические выражения функций чувствительности основных характеристик одиночных МПЛ в квазидинамическом приближении с учетом толщины полосок. Усовершенствован метод определения одинаковых допусков на параметры МПЛ. Разработана методика определения выхода годных устройств на микрополосковых линиях с заданными техническими характеристиками, изготовленных с помощью определенной технологии.

*Ключевые слова:* устройство на микрополосковых линиях, автоматизированное проектирование, математическое и программное обеспечение, топологическая неоднородность, квазидинамическое приближение.

**Mishchenko M. V. Mathematical and software of the automated designing of microwave devices on microstrip lines.** – Manuscript.

Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.12 - "Computer Aided Design Systems". – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

Thesis is devoted to creating of mathematical and software for designing of devices on microstrip lines (MPL) with using quasi-dynamic methods and with the ability to analysis and synthesis of tolerance deviations to the MPL parameters.

A new method for determining of capacitance value of MSL's topological discontinuities was developed, and method for determination of the own and mutual capacitances of multi-coupled lines was improved. Novel analytical expressions of sensitivity functions of the single MSL's main characteristics in quasi-dynamic approximation were first developed. The method for the determination of the equal tolerances for parameters MSL was improved. The technique of determining the yield of microwave devices manufactured using a certain technology was developed.

*Keywords:* device on the microstrip lines, automated design, mathematical and software, topological discontinuity, quasi-dynamic approach.