

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки,
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
 (повне найменування інституту, факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
 (повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ ВІДГАЛУЖУВАЧІВ НВЧ ІЗ
 ВИКОРИСТАННЯМ НЕРЕГУЛЯРНИХ ЛІНІЙ»

«DEVELOPMENT OF MICROWAVE COUPLERS BASED ON MICROSTRIP
 IRREGULAR LINES»

Виконав: студентка(ка) 2 курсу, групи РТ-519м
 Спеціальності 172 Радіотехніка та
телекомунікації

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Колодка Т.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Фурманова Н.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Воскобойник В.О.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки,
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
 Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Шило Г.М.,
д-р. техн. наук, доцент

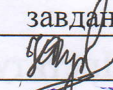
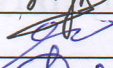
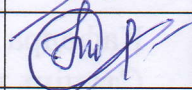
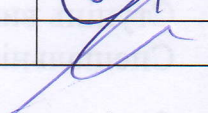
« _____ » _____ 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

Колодки Тетяни Олександрівни
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема проекту (роботи) Проектування мікросмужкових відгалужувачів НВЧ із використанням нерегулярних ліній
 керівник проекту (роботи) Фурманова Наталія Іванівна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом закладу вищої освіти від «12» листопада 2020 року №325
- Строк подання студентом проекту (роботи) 16 грудня 2020 року
- Вихідні дані до проекту (роботи) спрямований відгалужувач на мікросмужкових лініях; нерегулярні лінії передач, описані синусоїдою; частотний діапазон - (0.1...5) ГГц, мінімальний рівень S13 - 20 дБ, матеріал підкладки - полікор ВК 96-1, товщина підкладки - 1 мм (не помню точно), товщина металізації 5 мкм, матеріал провідників - мідь
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Відгалужувачі НВЧ; 2 Моделювання мікросмужкового відгалужувача НВЧ у САПР; 3 Синтез мікросмужкового відгалужувача НВЧ на основі нерегулярних ліній; 4. Економічне обґрунтування дипломної роботи 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 36 рисунків; 8 таблиць; презентація роботи

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

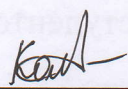
Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
Розділи 1-3	Фурманова Н.І., доц.	01.09	
Розділ з ОП і НС	Якімцов Ю.В., доц.	10.09	
Розділ з економіки	Левченко Н.М., проф.	10.09	
Нормоконтроль	Поспєєва І.Є., ст. викладач	11.12	

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2020 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

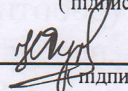
№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел за тематикою дослідження	1 тиждень	Виконано
2	Аналіз зібраної інформації	1 тиждень	Виконано
3	Аналіз САПР	1 тиждень	Виконано
4	Виконання розрахунків	1 тиждень	Виконано
5	Проектування в обраній САПР	1 тиждень	Виконано
6	Перевірка результатів розробки	1 тиждень	Виконано
7	Оформлення звіту за результатами розробки	1 тиждень	Виконано
8	Оформлення супровідної документації	1 тиждень	Виконано
9	Нормоконтроль та рецензування	1 тиждень	Виконано
10	Захист роботи	1 тиждень	Виконано

Студент


(підпис)

Колодка Т.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Фурманова Н.І.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ:89с., 36 рис.,8 табл., 14джерел.

Об'єктом дослідження в даному дипломному проекті є елементи мікросмужкових відгалужувачів НВЧ.

Мета роботи – проектування конструкції мікросмужкового відгалужувача за допомогою сучасних САПР.

Основними задачами виконання магістерської роботи є аналіз мікросмужкових відгалужувачів, особливостей їх конструкцій, методів моделювання елементів.

Актуальність проведення дослідження обумовлена необхідністю покращення характеристик мікросмужкових пристроїв без значного ускладнення їх конструкції при виробництві, а також зниження часових та трудових затрат на проектування пристроїв.

МІКРОСМУЖКОВА ЛІНІЯ, СПРЯМОВАНИЙ ВІДГАЛУЖУВАЧ, МІКРОСМУЖКОВИЙ ВІДГАЛУЖУВАЧ, ЦЕНТРАЛЬНА ЧАСТОТА, ШИРИНА СМУГИ ПРОПУСКАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1.1 Огляд існуючих конструкцій відгалужувачів	10
1.1.1 Спрямовані відгалужувачі з двома елементами зв'язку.....	14
1.1.2 Багатоелементні спрямовані відгалужувачі	15
1.1.3 Спрямований відгалужувач на основі коаксіальних хвилеводів	16
1.1.4 Шлейфний спрямований відгалужувач	17
1.1.5 Кільцевий спрямований відгалужувач.....	17
1.2 Мікросмужкові відгалужувачі НВЧ	18
1.3 Обґрунтування вибору конструкції відгалужувача.....	28
2. МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСМУЖКОВОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА НВЧ У САПР	29
2.1 Огляд існуючих САПР для моделювання пристроїв НВЧ	29
2.1.1 FEKO	29
2.1.2 μ Wave Wizard	32
2.1.3 Sonnet Suites	34
2.1.4 AWR Microwave Office	38
2.1.5 ANSYS HFSS	41
2.2 Проектування мікросмужкового відгалужувача в системі HFSS	48
3 СИНТЕЗ МІКРОСМУЖКОВОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА НВЧ НА ОСНОВІ НЕРЕГУЛЯРНИХ ЛІНІЙ	52
3.1 Проектування мікросмужкового відгалужувача пилкоподібної форми.....	52
3.2 Проектування мікросмужкового відгалужувача синусоїдальної форми в системі HFSS.....	54
3.3 Проектування мікросмужкового відгалужувача синусоїдальної форми в системі HFSS.....	56
4 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	58
4.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу.....	58

	6
4.2 Планування розробки програмного продукту	59
4.3 Визначення витрат на проектування.....	60
4.4 Розрахунок основної заробітної плати	61
4.5 Розрахунок додаткової заробітної плати	61
4.6 Відрахування на єдиний соціальний внесок	62
4.7 Визначення затрат на матеріали	62
4.8 Витрати на спеціальне обладнання	63
4.9 Загальновиробничі витрати.....	66
4.10 Розрахунок техніко-економічної ефективності моделі.....	67
4.11 Висновки	68
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ.....	70
5.1 Аналіз потенційних небезпек	70
5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки	71
5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни	73
5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	81
5.4.1 Заходи з пожежної безпеки	81
5.4.2 Заходи з цивільного захисту	83
ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

3D – тривимірна графіка

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

МСЛ – мікросмужкова лінія

МОМ – метод моментів

МФО – метод фізичної оптики

НВЧ – надвисокочастотний

ОТД – однорідна теорія дифракції

ПЗ – програмне забезпечення

САПР – система автоматизованого проектування

СВ – спрямований відгалужувач

ВСТУП

В даний час область застосування радіоелектронних засобів розширюється, комплекси радіосистем стають все більш складними, це повністю відноситься і до радіотехніки НВЧ діапазону.

У зв'язку з розширенням фізичних можливостей радіоелектронної апаратури в багатьох випадках необхідно не тільки випромінювати і приймати НВЧ сигнал, але також виконувати його обробку і перетворення, тому ускладнюються НВЧ схеми і в минулому виконанні стають громіздкими, тому виникає необхідність створення мініатюрних схем які працюють в НВЧ діапазоні. Мініатюризація схемних рішень радіоапаратури в даний час реалізується за допомогою гібридних плівкових і твердотільних мікросхем[1].

Найбільші успіхи в цьому плані були досягнуті в області низьких частот. Однак методи конструювання і технологія виготовлення низькочастотних схем не можуть бути перенесені на схеми НВЧ діапазону, так як між цими пристроями в мікрвиконанні існує велика кількість відмінностей.

До радіотехнічним пристроїв НВЧ діапазону висуваються жорсткі вимоги щодо зниження собівартості, підвищення надійності, зменшення габаритів і ваги. Сьогодні вага і габарити стали чинниками, що обмежують застосування СВЧ апаратури, особливо в мобільних установках - на борту наземного і водного транспорту, не кажучи вже про літальні апарати. Тому використання мініатюризації елементів і вузлів на НВЧ в сучасній радіоелектроніці є актуальним завданням.

У порівнянні зі звичайною апаратурою мікросмужкові і смужкові схеми більш трудомісткі в розробці, оскільки зв'язок між елементами схеми за рахунок крайових полів і полів випромінювання важче піддається обліку, розрахунок багатьох елементів схеми проводиться наближено, а підстроювання готових схем утруднена. Остаточні розміри схем доводиться відпрацьовувати шляхом перебору безлічі варіантів.

Широкий розвиток і поширення мікросмужкової техніки обумовлено тим, що для її виготовлення можна застосувати технологію друкованих плат, наприклад, травлення друкованих провідників або вакуумне напилення.

Застосування інтегральної технології дозволяє з успіхом вирішувати завдання по створенню антенно-фазованих пристроїв при досить жорстких і суперечливих вимогах до електродинамічних, аеродинамічних, габаритних, вагових, вартісних, конструктивних та інших параметрів.

Питання моделювання елементів мікросмужкових пристроїв із застосуванням сучасних САПР є актуальним, оскільки таке моделювання значно скорочує процес проектування пристроїв та зменшує тривалість випробувань дослідних зразків за рахунок попереднього аналізу різних варіантів конструкцій.

1 ВІДГАЛУЖУВАЧІ НВЧ

1.1 Огляд існуючих конструкцій відгалужувачів

Спрямованим відгалужувачем (СВ)[2] називаються восьмиполюсники, призначені для спрямованого відгалуження НВЧ-енергії. Зокрема, вони можуть використовуватися для окремого відгалуження з лінії передачі енергії падаючої і відбитої хвилі.

Використовуються спрямовані відгалужувачі в схемах вимірювання коефіцієнтів відбиття, змішування і розподілу сигналів, контролю параметрів сигналів, потужності, частоти, а також перемикачів і т. д.

Лінія передачі СВ, якою передається основна потужність, називається первинною, або основною, а лінія, в яку відгалужується частина потужності, - вторинною або допоміжною. Як правило, СВ є пристроєм взаємним, хоча існує і невзаємно спрямовані відгалужувачі, у яких зв'язок ліній передачі відбувається через намагнічений ферит.

Основними характеристиками СВ є перехідне ослаблення, спрямованість, розв'язка, Кст (коефіцієнт стоячої хвилі) первинної і вторинної ліній. На рис 1.1 представлено схематичне зображення СВ до прийнятої в подальшому нумерації плечей. Розглянемо основні властивості СВ за умови подачі сигналів в плече 1 і узгоджених навантажень в інших плечах.

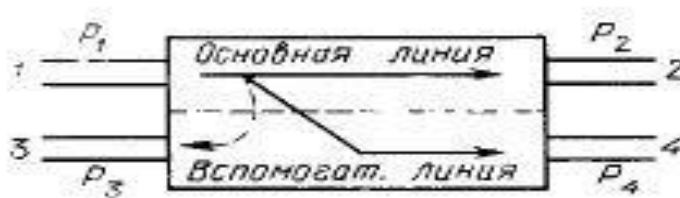


Рисунок 1.1 - Схема спрямованого відгалужувача

Перехідне ослаблення являє собою виражене в децибелах відношення вхідної потужності основної лінії до потужності, відгалуження в робоче плече 4 допоміжної лінії:

$$A_{12} = 10 \lg P_1 / P_2, \quad (1.1)$$

де P_1 - вхідна потужність основної лінії

P_2 – вихідна потужність основної лінії

Величина перехідного ослаблення в $10 \lg$ прийнята за границю сильного і слабого зв'язку.

Спрямованість являє собою виражене в децибелах відношення потужностей на виході робочого 4 і неробочого 3 плечей вторинної лінії і характеризує просочування потужності в неробочий плече за рахунок неідеальності властивостей СВ.

$$A_{24} = 10 \lg P_2 / P_4, \quad (1.2)$$

де P_2 - вихідна потужність основної лінії

P_4 – вихідна потужність вторинної лінії

Розв'язкою називається виражене в децибелах відношення потужності на вході первинної лінії до потужності в неробочому плечі вторинної лінії.

$$A_{13} = 10 \lg P_1 / P_4, \quad (1.3)$$

де P_1 - вхідна потужність основної лінії

P_4 – вихідна потужність вторинної лінії

Робоче загасання(дБ) визначається відношенням потужностей на вході й виході первинної лінії

$$C_{13} = 10 \lg P_1 / P_3 \quad (1.4)$$

Коефіцієнт $K_{ст}$ первинної лінії характеризує відображення, що вносяться СВ в НВЧ-тракт, і визначається з боку вхідного плеча при наявності узгоджених навантажень в інших плечах.

Вихід неробочого плеча вторинної лінії завжди навантажується на узгоджене навантаження, значення $K_{ст}$ якої істотно впливає на параметри СВ. В

хвильоводних конструкціях СВ це навантаження конструктивно об'єднане із вторинною лінією.

Всі розглянуті вище параметри НВ залежать від конструктивно-технологічних факторів, наявності неоднорідностей і втрат в лініях передачі, а також від якості з'єднаних елементів. Відгалужувачі з рівним енергорозподілом, тобто з відгалуженням у вторинну лінію половини потужності, що розповсюджується по первинній лінії, отримали назву гібридних сполучень.

Матриця розсіювання ідеального спрямованого відгалужувача (коефіцієнти відображення рівні нуля, спрямованість - безкінечності) має вигляд:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{1-K^2} & 0 & iK \\ \sqrt{1-K^2} & 0 & iK & 0 \\ 0 & iK & 0 & \sqrt{1-K^2} \\ iK & 0 & \sqrt{1-K^2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{де } K = S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32}; A_{14} = A_{41} = A_{23} = A_{32} = 20 \lg 1 / K \quad [\text{дБ}]$$

Найбільш поширеною конструкцією одноелементного відгалужувача (ОВ) є відгалужувач Бете, [3] показаний на (рис. 1.2, а). В якості елемента зв'язку тут використовується круглий отвір посередині широкої стінки хвильоводу. Електричне поле (рис. 1.2, б) основного хвильоводу збуджується у допоміжному хвильоводі дві рівні за амплітудою симфазні хвилі, спрямовані в різні боки.

$$E_{2\vartheta}^1 = E_{2\vartheta}^{11} = E_{nad} i \frac{8\pi^* r^3}{3\gamma_n^* ab} \cos^* \theta^* F_n(\Delta) \quad (1.5)$$

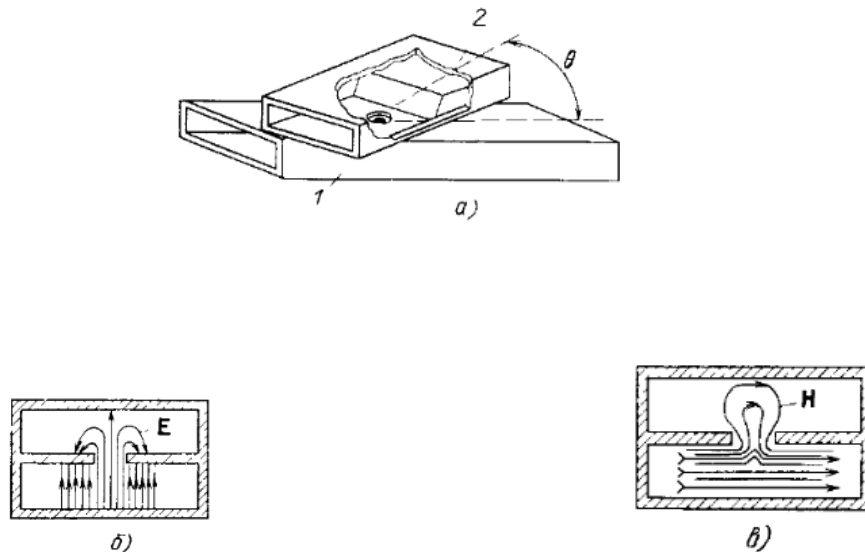
Магнітне поле (рис.1.2, в) збуджує у допоміжному хвильоводі також 2 хвилі, рівні за амплітудою, СВ протифазні.

$$E_{2M}^1 = -E_{nad}^{11} i \frac{8\pi r^3}{3\lambda_{nad}} \cos \theta F_{\eta}(\Delta), \quad (1.6)$$

де r - радіус елемента зв'язку;

$F_E(\Delta)$ и $F_H(\Delta)$ - функціональні залежності ослаблення від товщини стінки хвилеводу Δ для E і H - складових поля.

Електромагнітні хвилі, які збуджуються у допоміжному хвилеводі полем основного хвилеводу, в одному напрямку складаються ($E_{23}^1 + E_{2M}^1 = E_q$), а в іншому - віднімаються ($E_{23}^{11} + E_{2M}^{11} = E_3$). Оскільки магнітний зв'язок СВ залежить від взаємного розташування хвилеводів кута θ , (рис. 1.2, а), то, повертаючи хвилеводи відносно один одного (змінюючи кут θ), можна зрівняти амплітуду хвиль $E_{23}^1 = E_{2M}^1$ и $E_{23}^{11} = E_{2M}^{11}$ і таким чином здійснити спрямоване збудження хвилеводу.



1 - основний хвилевід; 2 - поглинач; а - ескіз конструкції; б - розподіл електричного поля; в - розподіл магнітного поля.

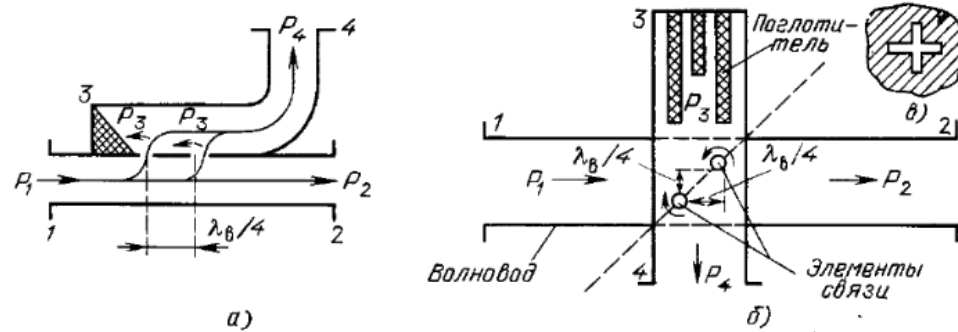
Рисунок 1.2 - Відгалужувач Бете

1.1.1 Спрямовані відгалужувачі з двома елементами зв'язку

Спрямований відгалужувач можна сконструювати на базі ненаправлених елементів зв'язку, якими є, наприклад отвори у вузькій стінці прямокутного хвилеводу, зв'язок через які здійснюється за рахунок тангенціальної складової магнітного поля. Два таких відгалужувача, розташованих на відстані $l = \lambda_n / 4$ один від одного, забезпечують направлений зв'язок. Спрямованість (направленість) досягається за рахунок інтерференції електромагнітних хвиль, збуджених у вторинному хвилеводі.

Рис 1.3, а ілюструє принцип роботи СВ з двома елементами зв'язку. Нехай хвиля H_{10} надходить в плече 1 основного хвилеводу. Кожний отвір зв'язку збуджує в допоміжному хвилеводі дві хвилі, рівні по амплітуді і протилежні по фазі. В плече 3 приходять дві хвилі, фазовий зсув між якими складає $\Delta\varphi = 0$, при цьому хвилі віднімаються. В плече 4 приходять також дві хвилі, фазовий зсув між якими $\Delta\varphi = 0$, при цьому хвилі додаються. Перехідне ослаблення таких СВ велике і складає не менше 20 дБ, що дозволяє їх рекомендувати для роботи на високих рівнях потужності.

Іншою найпростішою конструкцією СВ є відгалужувач зі взаємно перпендикулярними хвилеводами, наведеними на рис. 1.3, б, в якості елементів зв'язку використовуються як круглі, так і хрестоподібні отвори (рис. 1.3, в), розташовані по діагоналі загальної частини широких стінок. В області розташування отворів магнітне поле має протилежно спрямовану поляризацію. В результаті цього отвору створюють у допоміжному хвилеводі протилежно спрямовані хвилі, які віднімаються в напрямку плеча 3 і додаються в напрямку плеча 2, так як в ньому хвиля, створена верхнім отвором в цьому напрямку (див. рис 1.2, б), має додатковий зсув на кут π через подовження пройденого шляху на $\lambda_n / 2$. Оскільки елементи зв'язку розташовуються в місцях з відносно слабким електричним полем, то СВ має підвищену електричну міцність і рекомендується для використання на високих рівнях потужності.



а - двоелементний спрямований відгалужувач, б - СВ зі зв'язком по широкій стінці; в - хрестоподібний елемент зв'язку

Рисунок 1.3 - СВ зі взаємно перпендикулярними хвилеводами

1.1.2 Багатоелементні спрямовані відгалужувачі

Для розширення смуги частот, в якій зберігаються задані значення спрямованості і перехідного ослаблення, застосовують багатоелементні СВ. У таких відгалужувачах можуть бути використані як елементи зв'язку, що володіють спрямованістю, так і неспрямовані елементи. Відстань між елементами зв'язку не обов'язково має дорівнювати одній четвертій довжини хвилі. Однак чвертьхвильові відстані забезпечують максимальну спрямованість і широкосмужковість СВ.

Значного збільшення широкосмужковості СВ можна досягти, використовуючи такий вибір розмірів елементів зв'язку, при якому амплітуда яка збуджується у вторинній лінії хвилі, змінюється від отвору до отвору за законами біноміального або чебишовського розкладання і залежить від розмірів, числа і типу елементів зв'язку.

На рис 1.4 показаний багатоелементний спрямований відгалужувач, що має перехідний ослаблення 10 дБ. Подібний СВ забезпечує спрямованість не менше 35 дБ, перепад перехідного ослаблення не більше 0.6 дБ в робочому діапазоні частот хвилеводу.

При виготовленні елементів зв'язку СВ найбільш широко застосовується метод прецизійної електроіскрової обробки, що дозволяє отримати всі отвори зв'язку одночасно по 7-10 класу шорсткості поверхні. Точність розмірів елементів зв'язку забезпечується до сотих часток міліметра.

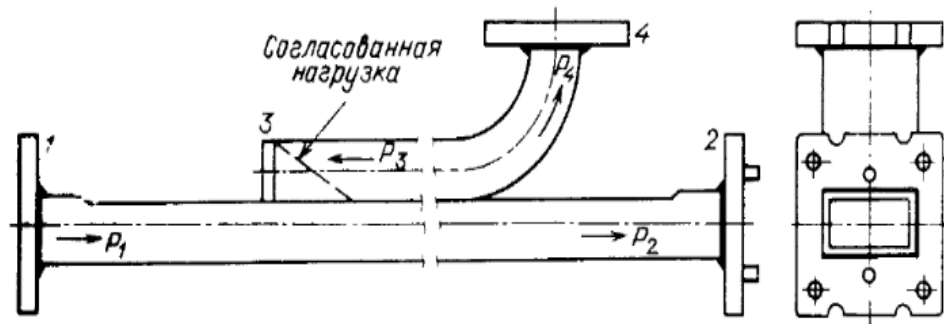
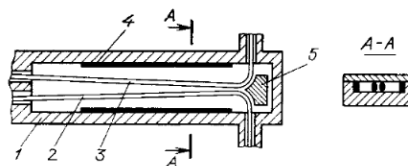


Рисунок 1.4 - Багатоелементний спрямований відгалужувач.

1.1.3 Спрямований відгалужувач на основі коаксіальних хвилеводів

На рис. 1.5 представлена конструкція СВ із розподіленим зв'язком, що змінюється, де шляхом вибору закону зміни зв'язку по довжині ліній, конструкції поглинача і за допомогою налаштування елемента вдається в широкому діапазоні частот зрівняти амплітуди хвиль в допоміжній лінії, що викликані електричними і магнітними полями основної лінії. Відгалужувач відрізняється великою широкосмуговістю (1.0 ... 18 ГГц), спрямованість в цій смузі не менше 20 дБ.



- 1 - корпус; 2 - основна лінія; 3 - допоміжна лінія;
4 - поглинач; 5 - елемент настройки.

Рисунок 1.5 - Коаксіальний спрямований відгалужувач.

1.1.4 Шлейфний спрямований відгалужувач

Спрямований відгалужувач (рис 1.6) складається з двох відрізків смужкових ліній передач, з'єднаних між собою за допомогою двох і більше шлейфів, довжини і відстані між якими рівні чверті довжини хвилі, визначеної в смужковій лінії передачі.

Зі збільшенням числа шлейфів спрямованість і діапазонні характеристики шлейфового СВ покращуються. Однак при числі шлейфів більше трьох їх хвильові опори стають настільки великими, що практично не можуть бути реалізовані в друкованому виконанні. У зв'язку з цим в інтегральних мікросхемах НВЧ найбільшого поширення набули двох і трьохшлейфові СВ.

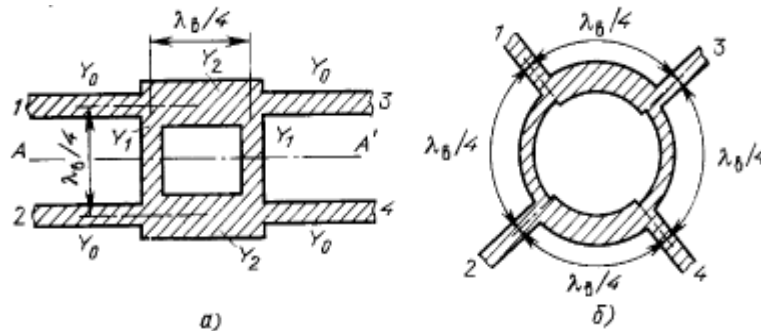


Рисунок 1.6 - Шлейфний спрямований відгалужувач.

1.1.5 Кільцевий спрямований відгалужувач

До СВ зі зв'язком шлейфного типу відноситься кільцевий СВ, топологія якого показана на рис. 1.7. Кільце має довжину 1.5λ . При збудженні плеча 1 вхідний сигнал ділиться на дві частини і поширюється по двох каналах. Сигнали складаються синфазно (пучність напруги) в точках Б і Г кільця і протифазно в точці В (вузол напруги) в точці В дорівнює нулю і потужність в плече 4 не передається. Таким чином, сигнал, що надходить в плече 1, ділиться між плечима 2 і 3, які є суміжними по відношенню до плеча 1.

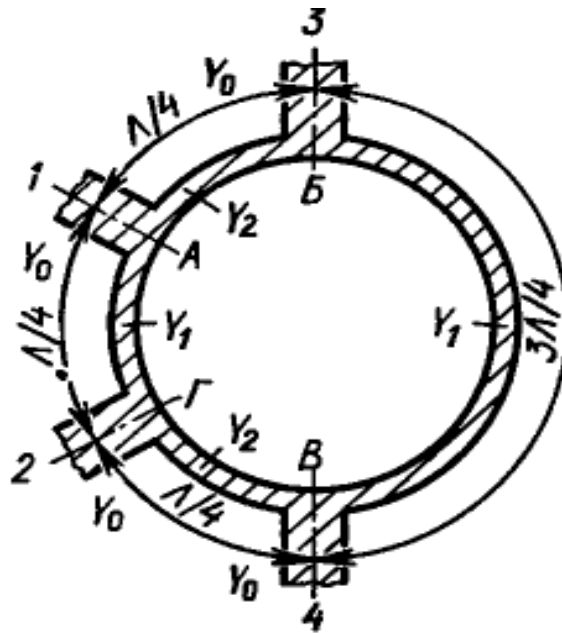


Рисунок 1.7 - Топологія кільцевого СВ на МСЛ

1.2 Мікросмужкові відгалужувачі НВЧ

1.2.1 Мікросмужкова лінія та її характеристики

Мікросмужковою лінією передачі (МСЛ) називається провідник стрічкового типу 1 (смужка) прямокутного перерізу, розташований на підкладці 2 з високою діелектричної проникністю на зворотному боці якої розташована заземлена металева площина 3 (екран), показана на рис. 1.8

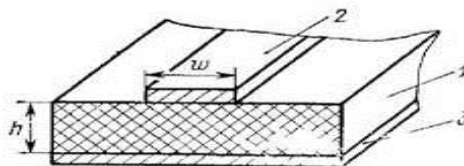


Рисунок 1.8 – Мікросмужкова лінія

Мікросмужкова лінія є одним з основних елементів мікросхем НВЧ і широко використовується в якості складових частин таких пристроїв, як відгалужувачі, подільники потужності, фільтри, фазоперетворювачі та інші.

Лінії назвали мікросмужковими, тому що за результатом високої діелектричної проникності підкладки її товщина і поперечні розміри смуги набагато менші довжини хвилі у вільному просторі. У мікросмужковій лінії поширюється хвиля квазі-ТЕМ і силові лінії електричного поля проходять не лише в діелектрику, але і за ним [1].

Основною перевагою мікрополоскової лінії та пристроїв на її основі є можливість автоматизації виробництва із застосуванням технологій виготовлення друкованих плат, гібридних і плівкових інтегральних мікросхем. Основний недолік, що обмежує застосування - можливість застосування тільки при малих і середніх рівнях потужності СВЧ коливань. Мікросмужкові лінії передачі використовуються в гібридних і монолітних інтегральних схемах НВЧ діапазону. В гібридних інтегральних схемах різні дискретні компоненти (транзистори, діоди) поміщені в корпус або модулі мікросмужкової конструкції. В монолітних інтегральних схемах всі елементи схеми реалізуються всередині загальної напівпровідникової пластини і частково на її поверхні. Якщо порівнювати гібридні схеми з монолітними, то вони характеризуються кращими електричними характеристиками, широкою смугою пропускання, стабільністю і малими шумами високою добротністю. Монолітні, значно дешевші, мають менші габарити і більш пристосовані до серійного виробництва.

МСЛ характеризується рядом параметрів: хвильовим опором, коефіцієнтом втрат, граничною потужністю, довжиною хвилі і її дисперсією [2]. Розглянемо деякі параметри докладніше.

Хвильовий опір МПЛ залежить від конструктивних і електричних параметрів провідника і підкладки, тому є складною їх функцією. Так, хвильовий опір МСЛ в припущенні, що $t/h = 0, \alpha \rightarrow \infty, \epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = \epsilon_r$, можна обчислити за формулами:

$$Z_{\beta} = \frac{120}{\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}} \left[\ln \frac{8h}{W} + \frac{W^2}{32h^2} - \frac{1(\varepsilon_r - 1)}{2(\varepsilon_r + 1)} \times \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r} \ln \frac{u}{\pi} \right) \right] \text{ при } W/h \leq 1, \quad (1.7)$$

$$Z_{\beta} = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left[\frac{W}{2h} + 0.44 + 0.082 \frac{(\varepsilon_r - 1)}{\varepsilon^2} + \frac{(E_r + 1)}{2\pi\varepsilon_r} A \right]^{-1} \text{ при } W/h \leq 1, \quad (1.8)$$

де $A = 1,451 + \ln(W/2h + 0.94)$.

Похибка розрахунку по (1.7) не перевищує 1%, а по (1.8) - 2%.

Основною хвилею в МСЛ є квазі Т-хвиля яка на частотах 1 ГГц по своїх властивостях і структурі практично не відрізняється від Т-хвилі (вектори Е, Н і ν взаємно перпендикулярні), але її параметри залежать від частоти, що зумовлює залежність фазової швидкості ν_{ϕ} і хвильового опору Z_{β} від частоти, тобто дисперсію.

Облік дисперсії основної хвилі можна провести, вводячи ефективну діелектричну проникність $\varepsilon_{\text{эф}}$ замість ε_r , яка розраховується за емпіричною формулою:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \left[\frac{(f/f_w)^2 + 1}{(f/f_w)^2 + \sqrt{\varepsilon_r/\varepsilon_{\text{эф}0}}} \right]^2 \varepsilon_r \quad (1.9)$$

де f - робоча частота, ГГц;

$$f_w = \frac{16.2\varepsilon_r^{0.25}}{1 + 0.12W\varepsilon_r^{0.35}/h} + 3.5; \quad (1.10)$$

$\varepsilon_{\text{эф}0}$ - ефективна діелектрична проникність, враховуючи неоднорідність діелектрика в МСЛ.

Втрати енергії в МПЛ характеризуються коефіцієнтом загасання хвилі. Коефіцієнт загасання обернено пропорційний відстані, яку повинна пройти хвиля уздовж регулярної лінії (в поздовжньому напрямку незмінні поперечний переріз і

електромагнітні властивості заповнюють її середовища), щоб її амплітуда зменшилася в L раз, що відповідає 1Нп (8,686 дБ). Коефіцієнт загасання МПЛ (дБ / м) для випадку відносно не великих втрат:

$$A = a_d + a_m \quad (1.11)$$

де: a_d – постійна затухання в діелектрику;

a_m – постійна затухання в металі.

На рисунку 1.9 наведена залежність коефіцієнта загасання від частоти для МСЛ різного хвильового опору, різної товщини підкладки з полікору і смужки з міді.

Гранична частота хвилі, що розповсюджується в МПЛ, визначається виникненням поверхневої хвилі, що розповсюджується по поверхні електричної підкладки по межі поділу діелектрик - повітря. Частота (в гігагерцах) на якій виникають паразитні поверхневі хвилі, є граничною верхньою частотою, до якої можна застосовувати МСЛ, та визначається за формулою:

$$f = \frac{75}{h} \sqrt{\epsilon_r - 1} \quad (1.12)$$

Залежність коефіцієнта затухання МСЛ та деяких конструктивних та електричних параметрів.

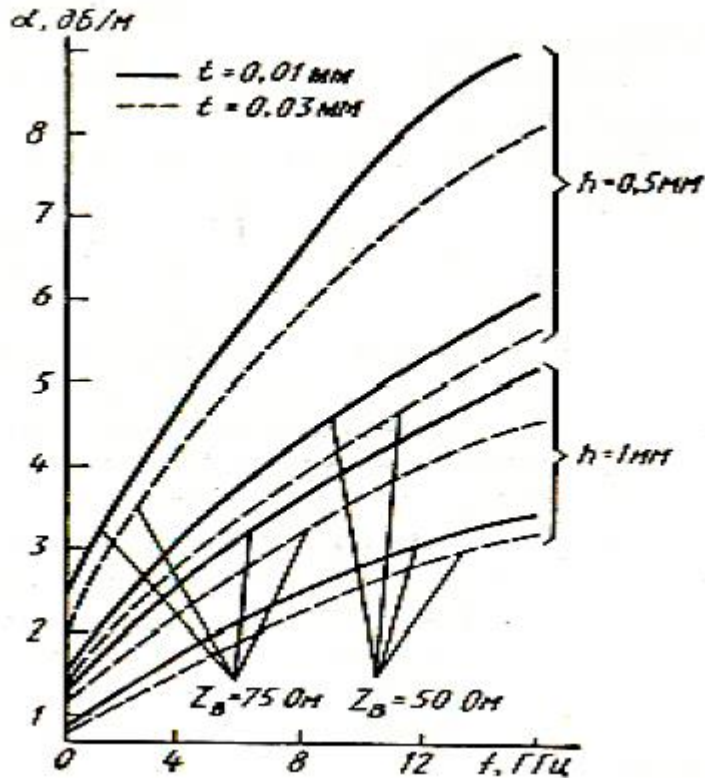


Рисунок 1.9 – Залежність коефіцієнта загасання від частоти.

1.2.2 Відгалужувачі на зв'язаних лініях

Далі розглянемо типи мікросмужкових відгалужувачів .

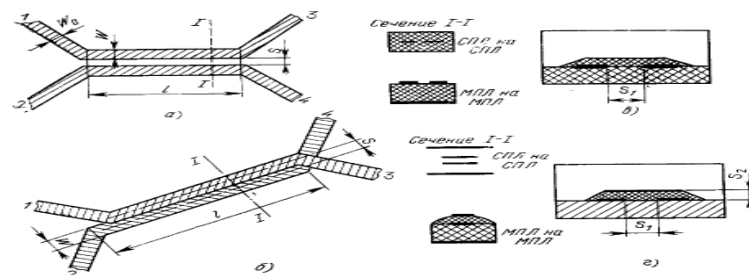
Спрямовані відгалужувачі з розподіленим електромагнітним зв'язком становлять великий клас відгалужувачів. Вони більше відомі за назвою відгалужувачі на зв'язаних лініях передачі. Розрізняють СВ з бічним і лицьовим зв'язком(рис.1.10). Довжина області зв'язку1 (рис.1.10) становить непарне число четвертей довжини хвилі у лінії на середній частоті робочого діапазону. Зазвичай довжина області зв'язку обирається рівною $\lambda/4$.

Хвиля, що поширюється у первинній лінії, частково відгалужується у вторинну лінію, де вона поширюється у протилежному напрямку. Таким чином, СВ на зв'язаних лініях є протиспрямованим (див.рис.1.10,а). Ідеальний спрямований відгалужувач при розрахункових співвідношеннях в одномодовому наближенні має ідеальну спрямованість у необмеженому діапазоні частот і смугу

постійного перехідного загасання, близьку до октави. Завдяки широкосмуговості, а також простоті конструкції, цей відгалужувач використовується у багатьох інтегральних мікросхемах НВЧ.

Смужкова конструкція відгалужувача на зв'язаних лініях (рис 1.10) складається з паралельних відрізків ліній, пов'язаних рівномірно по довжині електричної і магнітної зв'язками, причому довжина галузі зв'язку становить непарне число чвертей довжин хвиль певних в даних відрізках ліній. Залежно від розташування ліній розрізняють СВ з бічної (рис 1.10, а) і лицьової зв'язком (рис. 1.10, б). Енергія, що проходить в певному напрямку по первинній лінії, відгалужується у вторинну і поширюється по ній в протилежному напрямку. Принцип дії СВ збігається з принципом дії коаксіальних СВ (рис. 1.5). Це збіг має місце тільки в межах збудження. Т-хвиль в обох конструкціях. Спрямовані відгалужувачі на мікросмужкових лініях мають ряд специфічних особливостей, пов'язаних з тим, що частина енергії розподіляється над діелектричної підкладкою, а інша (більша частина) - в діелектричній підкладці з високим значенням.

У зв'язку з цим, з'являється різниця коефіцієнтів поширення коливань в підкладці і над нею, яка збільшується з посиленням зв'язку, в результаті чого виникають додаткові частотно-залежні фазові зрушення між сигналами у вторинній лінії, що погіршує характеристики відгалужувача на зв'язаних лініях.



а – с боковим зв'язком; б – с лицевим зв'язком; в – з додатковим діелектричним покриттям; г – з додатковим провідником вільного потенціала.

Рисунок 1.10 - Спрямований відгалужувач на зв'язаних лініях.

З метою усунення зазначеного недоліку застосовують спеціальні конструкції відгалужувачів, одна з яких показана на (рис 1.10.,в): тут для вирівнювання фазової швидкості коливань використовується додаткове діелектричне покриття; при цьому майже вся енергія над підкладкою концентрується в діелектрику. Ще більше вирівнювання двох фазових швидкостей досягається за рахунок використання додаткового провідника вільного потенціалу (рис.1.10.,г), розташованого над пов'язаними лініями і окремо від останніх шарів діелектрика. Довжина цього провідника дорівнює довжині галузі зв'язку.

Також істотним недоліком СВ на зв'язаних лініях в несиметричних лініях є різні постійні поширення парних і непарних хвиль. На (рис 1.11, а) показана структура поля парної хвилі, на (рис 1.11, б) непарної. Відомо, що парна хвиля поширюється головним чином в товщині підкладки, а непарна хвиля в значній мірі витісняється в повітря. Таким чином, ефективні діелектричні проникності для парної і непарної хвиль розрізняються, а отже, розрізняються швидкості поширення цих хвиль і фазові зрушення, придбані на довжині зв'язку.

При підвищенні коефіцієнта зв'язку зростає відмінність постійних поширень, напрямком поширення енергії в первинній і вторинній лінії співпадає, спотворюються фазові співвідношення сигналів і погіршуються характеристики СВ, спрямованість СВ на пов'язані лінії падає зі збільшенням ступеня зв'язку.

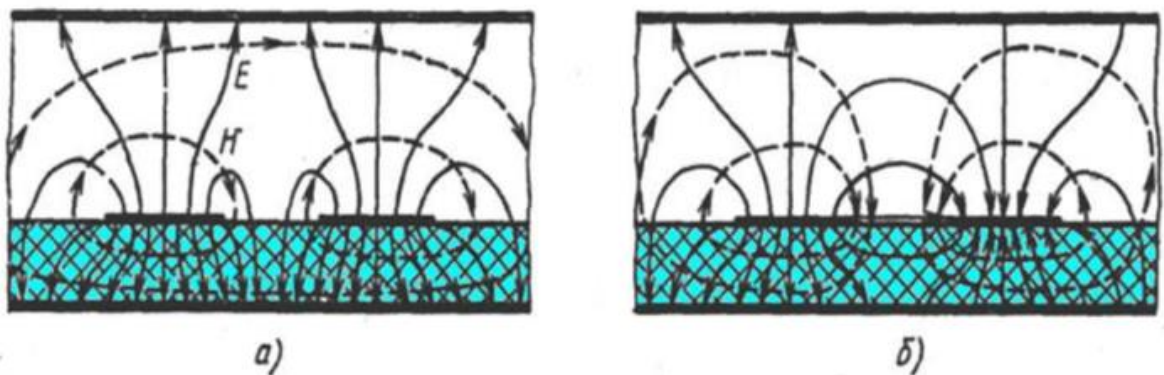


Рисунок 1.11 - Структура електромагнітного поля парної(а) і непарної (б) хвиль с СВ з бічним зв'язком

Фазові швидкості парної й непарної хвиль можна вирівняти, використовуючи деякі заходи. УСВ, поперечний переріз якого зображено на рис.1.12,а, зв'язані лінії покриваються зверху додатковим шаром діелектрика. В даному випадку більша частина енергії непарної хвилі розповсюджується в діелектрику покриття й підкладки. Використання додаткового провідника з вільним потенціалом дозволяє досягти ще більшого вирівнювання фазових швидкостей (рис.1.12,б). Довжина провідника дорівнює довжині області зв'язку СВ. Для вирівнювання ефективної діелектричної проникності для парної й непарної хвиль використовуються також підкладки з неоднорідним заповненням(рис.1.12,в). При $\epsilon_2 < \epsilon_1$ додатковий шар діелектрика знижує $\epsilon_{\text{еф}}$ парної хвилі порівняно з $\epsilon_{\text{еф}}$ для непарної. Вирівнювання фазових швидкостей в СВ (рис.1.12,а,б) здійснюють, включаючи конденсатори в середину або по краях області зв'язку[2].

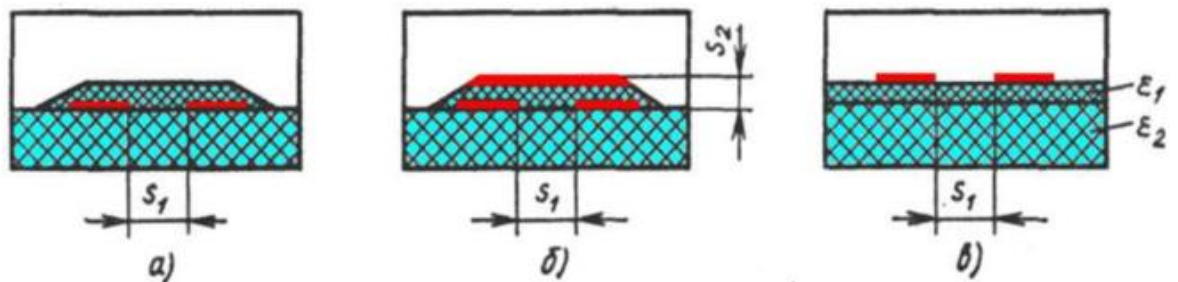


Рисунок 1.12 – СВ з додатковим шаром діелектрика для вирівнювання фазових швидкостей парної і непарної хвиль

Цікавим технічним рішенням проблеми вирівнювання фазових зсувів хвиль двох типів є застосування періодичного профілю області зв'язку – пилкоподібного або східчастого.

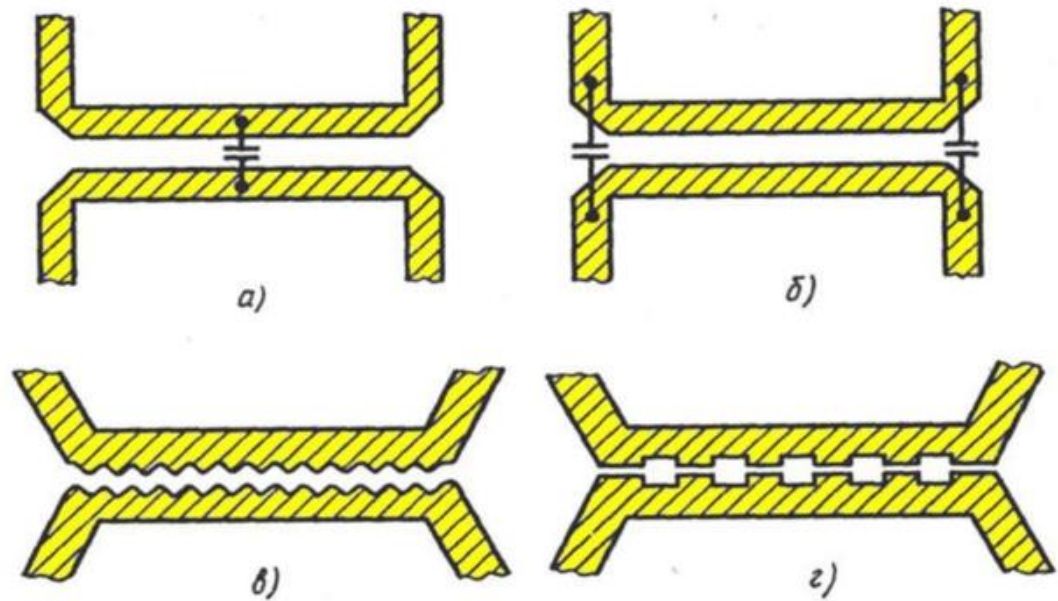


Рисунок 1.13 - Приклади топології СВ, що забезпечують вирівнювання фазових швидкостей парної та непарної хвиль

У такій структурі збільшується довжина шляху непарної хвилі порівняно з парною, оскільки струми непарної хвилі витісняються до внутрішніх країв провідників в області зв'язку, а струми парної хвилі – до зовнішнього. Цим і забезпечується вирівнювання фазових зсувів. Спрямовані відгалужувачі із сильним зв'язком реалізуються досить просто на основі зв'язаних ліній з лицьовим зв'язком, (зв'язані лінії з бічним зв'язком, навпаки, дозволяють створювати лише слабкозв'язані СВ, що обумовлено значними технологічними труднощами. Так, СВ на підкладці з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 9,6$ затовщини провідників, близької нулю, повинен мати зазор між зв'язаними лініями менше 10 мкм, що практично важко реалізувати. Разом з тим найбільш простими в технологічному відношенні є зв'язані несиметричні МСЛ, які виробляються в єдиному технологічному циклі без додаткового складання й сполучаються добре зі схемами, які містять навісні компоненти. Все це обумовлює інтерес до таких конструктивних рішень, які допускають реалізацію сильнозв'язаних СВ задосить великих, технологічно здійсненних зазорів між зв'язаними лініями. Зазначеними

властивостями володіє тандемний СВ, який являє з'єднання двох однакових СВ на зв'язаних лініях передачі (рис.1.14,а). Неважко бачити, що плечі 1 і 2 є розв'язаними (відповідно розв'язані плечі 3 і 4); сигнал, що надходить у плече 1, ділиться між плечима 3 і 4.

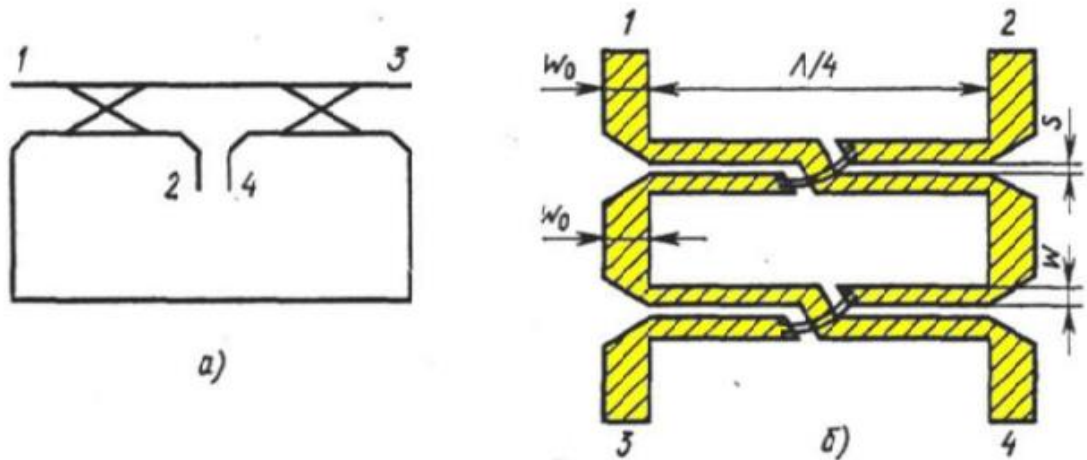


Рисунок 1.14 - Електрична схема(а) і топологія (б) тандемного СВ

Тандемний СВ дозволяє не тільки збільшити зазор між зв'язаними лініями з бічним зв'язком, але й знизити вимоги до допусків на геометричні розміри. Він виявляється менш чутливим до відхилення геометричних розмірів від номінального значення порівняно зі звичайним СВ на зв'язаних лініях. Додатковою перевагою тандемного СВ є його більша широко смуговість порівняно з одиночним. Так, в ході порівняння СВ виявляється, що тандемний СВ має відносну смугу пропускання 70% за відхилення перехідного загасання на 0,2 дБ від свого значення на середній частоті робочого діапазону, одиночний СВ – 38%.

Іншим варіантом сильнозв'язаних СВ на несиметричних МСЛ є зустрічно-штирові структури (рис.1.15), які мають назву відгалужувачі Ланге. Потужність, що надходить у плече 1, ділиться нарівно між плечима 2 і 3. Плечі 1 і 4 є розв'язаними. Сигнал у плечі 2 випереджає на $\pi/2$ сигнал у плечі 3.

Тридещибельний СВ на підкладці $\epsilon = 9,6$ товщиною 1 мм має розміри $W/h=0,107$, $s/h=0,071$. У смузі частот 2...4 ГГц розв'язка становить 21,5...40 дБ і з втратами не більше 0,25 дБ.

Недоліком тандемних СВ і відгалужувачів Ланге є наявність дровових перемичок, які припаюються або приварюються до ліній передачі. Для зменшення паразитних індуктивностей вони утворюються з декількох дротів. Багато октавні смуги пропускання можуть мати СВ, що складаються з каскадного з'єднання декількох ланок рівної електричної довжини θ з різними коефіцієнтами зв'язку (рис.3.15). Недоліком таких відгалужувачів є порівняно великі габарити. Відомі також аналогічні СВ із коефіцієнтами зв'язку, що плавно змінюються за довжиною.

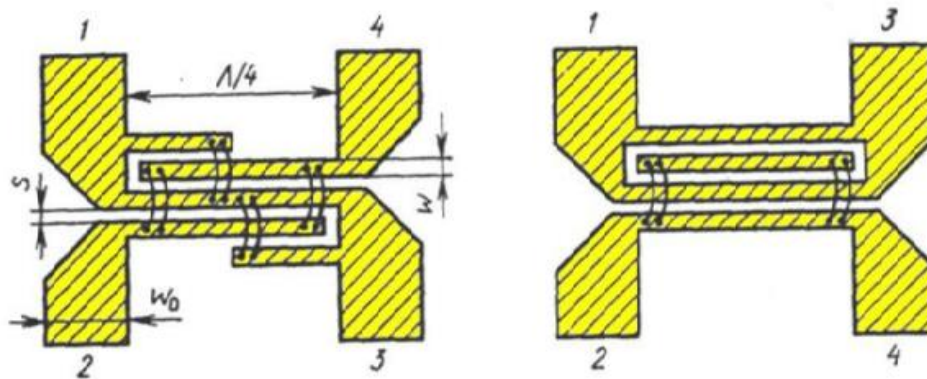


Рисунок 1.15 - Зустрічно – штирові мікросмушкові СВ

1.3 Обґрунтування вибору конструкції відгалужувача

На наш погляд перспективною є пилкоподібна конструкція та мікросмушковий відгалужувач на нерегулярних лініях і саме дослідженню її характеристики присвячена наша робота.

2 МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСМУЖКОВОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА НВЧ У САПР

2.1 Огляд існуючих САПР для моделювання пристроїв НВЧ

В останні десятиліття системи автоматизованого проектування електронного обладнання інтенсивно розвиваються. Сучасне радіообладнання все чіткіше можна розділити на дві частини: системи НВЧ і цифрової обробки. Поряд з цифровою частиною, ми можемо відзначити зростаючу роль НВЧ-електроніки. Велика кількість систем, що працюють на надвисоких частотах: мобільний зв'язок, навігація, супутникове телебачення, телекомутаційні системи, системи спеціального призначення і т. д., обумовлюють цю тенденцію. З іншого боку, багато питань роботи радіосистем, електромагнітної сумісності різних підсистем, повинні бути вирішені за допомогою методів, характерних для НВЧ-діапазону. Якщо ще декілька десятків років тому, НВЧ-обладнання розглядалося виключно як апаратний засіб спеціального призначення, але тепер це не так.

Таке розширене використання НВЧ-електроніки знаходить своє відображення в розробці відповідних систем автоматизованого проектування. Зараз розглянемо деякі із них.

2.1.1 ФЕКО

ФЕКО - всеосяжне програмне забезпечення, широко використовується в телекомунікаційній, автомобільній, аерокосмічній і оборонній промисловості. Назва програми ФЕКО - це аббревіатура від німецької мови – «Feldberechnung bei Korpern mit beliebiger» (Поле обчислення за участю тіл довільної форми), назва вказує на те, що ФЕКО використовується в розрахунках електромагнітних хвиль в просторі, що включають об'єкти довільної форми. На рис. 2.1 показний інтерфейс програми.

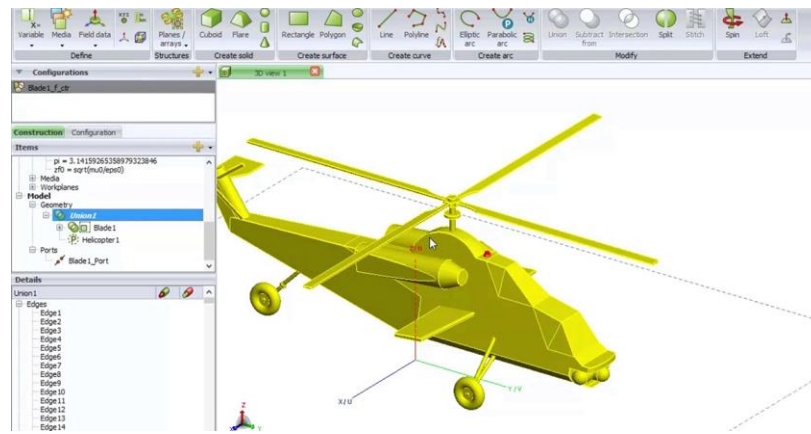


Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми ФЕКО

Altair FEKO – це програмний комплекс для чисельного електромагнітного аналізу, заснований на передових методах обчислювальної електродинаміки. Altair FEKO дозволяє вирішувати широке коло дослідницьких і прикладних задач в різних галузях - від проектування антен і функціональних вузлів до оцінки характеристик радіотелескопів і впливу об'єктів розміщення антен на підсумкові параметри діаграми спрямованості.

Використання FEKO дозволяє проводити ефективний аналіз широкого спектра завдань, в тому числі антен, НВЧ-компонентів і медико-біологічних систем, розміщення антен на електрично великих структурах, розрахунок розсіювання, а також дослідження електромагнітної сумісності. FEKO також пропонує інструменти, які з урахуванням вирішення більш складних електромагнітних взаємодій. FEKO вважається світовим лідером на ринку для аналізу і розрахунку антен.

Головною особливістю програми FEKO, що відрізняє її від інших комерційних програм електромагнітного проектування, є вдале поєднання базового методу моментів (ММ), з наближеними аналітичними методами: методом фізичної оптики (МФО) та однорідної теорії дифракції (ОТД).

Таке поєднання дозволяє подолати головний недолік програмно-комп'ютерного моделювання високочастотних структур: великі витрати ресурсів

при моделюванні об'єктів з розмірами набагато більшими довжини хвилі. В результаті з'являється можливість вирішення таких завдань, як розсіювання радіохвиль на літаку або кораблі і поширення радіохвиль в міських умовах з хорошою точністю.

Можливості використання різних методів електромагнітного моделювання, реалізовані в FEKO, роблять цей програмний продукт придатним для вирішення різноманітних завдань у багатьох галузях промисловості. В рамках єдиної системи ліцензування, Altair FEKO надає розробникам можливість проведення електродинамічного аналізу з використанням різних методів як в частотній, так і в тимчасовій області. Можлива також і робота з гібридними моделями, що поєднують різні варіанти і наближені алгоритми.

Повнохвильове моделювання в частотній області здійснюється в Altair FEKO з використанням таких методів:

- метод моментів (MoM), для об'ємних об'єктів плоско-шаруватих структур, і його модифікації (MoM + SEP, MoM + VEP);
- багаторівневий швидкий мультипольний метод (MLFMM);
- векторний метод кінцевих елементів (FEM), 3D;
- у часовій області використовується метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD).

Електрично великі структури аналізуються засобами наближених методів:

- метод геометричної оптики (GO);
- однорідна теорія дифракції (UTD);
- метод фізичної оптики (PO) і його модифікації для укрупнених сіток (LE-PO).



Рисунок 2.2. – Методи моделювання

Користувальницький інтерфейс Altair FEKO має модульну структуру і крім обчислювального ядра містить незалежні призначені для користувача оболонки для створення і підготовки моделей, а також для аналізу і обробки результатів.

2.1.2 μ Wave Wizard

Пакет μ Wave Wizard являє собою спеціалізоване програмне забезпечення для проектування НВЧ пристроїв, що використовує метод узгоджених мод (Mode-Matching), який найкращим чином підходить для моделювання та оптимізації пасивних НВЧ пристроїв і антен. Метод узгоджених мод і його похідні (швидкі гібридні методи граничного контуру (MM / boundary contour) і кінцевих елементів (MM / finite-element method) забезпечують неперевершену швидкість і точність обчислень для цих завдань.

САПР μ Wave Wizard компанії Micsian поєднує в собі гнучкість 2D / 3D метода кінцевих елементів зі швидкістю і точністю традиційних методів согласування мод.

Простий склад складних НВЧ-структур з використанням основних блоків виключає необхідність створення повної 3D моделі всієї структури і прискорюється процес проектування.

μ Wave Wizard пропонує графічний користувальницький інтерфейс, який робить зручним використання ПЗ навіть для новачка. Подання про-екта у вигляді дерева надає всю інформацію про поточний проект, схеми і підсхеми і настройки за замовчуванням, точність, властивості матеріалу і ін. Новий графічний інтерфейс окремо ідентифікує змінні, які використовуються схемою, обраної в даний момент. Редактор схем μ Wave Wizard підтримує масштабування, перетягування, вирізання, вставку, скасування і має багато корисних макросів. Всі ці опції редагування легко знаходяться під стрічками.

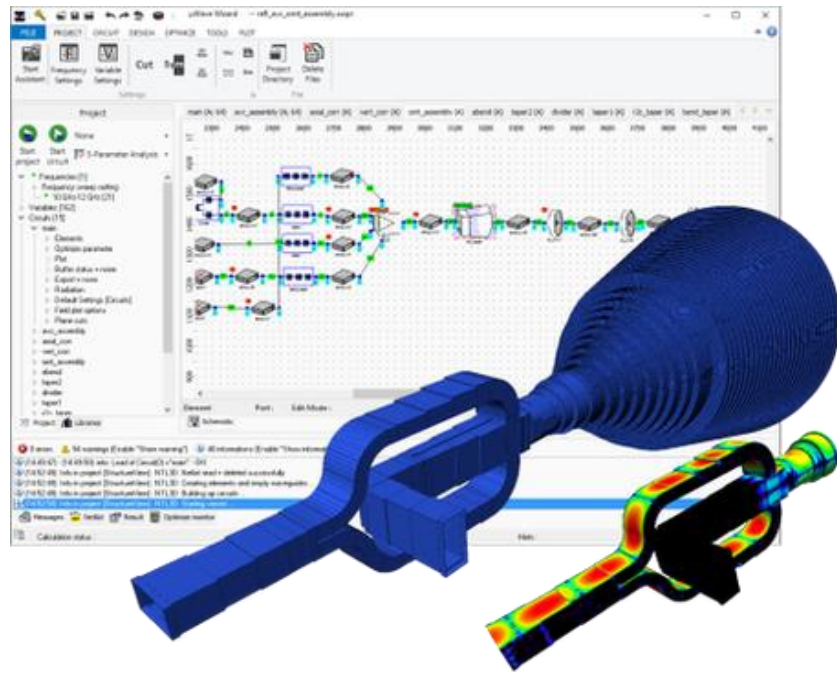


Рисунок 2.3 - Інтерфейс програми μ Wave Wizard

Секрет швидкодії пакету μ Wave Wizard криється в використанні методу узгоджених мод (Mode-Matching) і його похідних для аналізу складних тривимірних структур, де на перший погляд, уникнути повного 3D ЕМ аналізу неможливо. Проте, для структур з дуже складною геометрією в пакеті μ Wave Wizard зараз реалізований 3D FEM обчислювач, що забезпечує ряд функціональних можливостей недоступних в методі узгоджених мод (ММ).

Потужний набір чисельних методів, реалізованих в пакеті μ Wave Wizard, доповнюється простим і ергономічним призначенням для користувача

інтерфейсом, що забезпечує необхідну гнучкість і відкритість. Подальший розвиток пакета передбачає послідовну реалізацію останніх теоретичних і математичних підходів аналізу НВЧ пристроїв.

Типовими додатками для програми μ Wave Wizard є пасивні хвильові структури і компоненти, такі як хвильові і комбіновані фільтри, мультиплексори, відгалужувачі, переходи, рупорні антени, кластерні фідерні системи, поляризатори, мости і багато іншого. Бібліотеки програми об'єднують понад 230 різних хвилеводних, комбінованих і коаксіальних елементів.

Для моделювання частотних характеристик складних хвилеводних структур вся конструкція розбивається на окремі блоки, які мають еквівалентні бібліотечні моделі. Програма розраховує параметри розсіювання для кожного окремого блоку, після чого в багатомодовому режимі виконує наскрізне моделювання частотних характеристик всієї структури. Таким чином, строго враховується взаємодія мод вищого порядку. Використання типових бібліотечних блоків дозволяє відмовитися від побудови повної тривимірної моделі всієї аналізованої структури. Так як більшість розмірів сполучених елементів параметризовані, створення і зміна проекту займає лічені хвилини. Параметризація розмірів дає можливість користувачеві швидко переходити від аналізу до оптимізації за допомогою призначення їх в якості варійованих змінних. Вікно управління оптимізатором дозволяє просто і наочно задати цілі оптимізації для різних характеристик, вибрати метод і тип цільової функції.

2.1.3 Sonnet Suites

Sonnet Suites забезпечує промисловий стандарт для тривимірного планарного електромагнітного моделювання. Точність аналізу і швидкість в зчитування з потужними функціями даного ПЗ дозволяють довіряти результатам моделювання. Це дозволяє скоротити витрати на розробку.

Sonnet Suites розроблений інженерами в області НВЧ, які розуміють унікальні проблеми проектування і додали нові функції, які оптимізують процес розробки НВЧ. Функції, орієнтовані на користувача, призначені для спрощення інженерних НВЧ завдань, спрощують також і роботу користувача.

Пакет програм Sonnet Suites призначений для електромагнітного моделювання планарних НВЧ структур: смужкових і мікросмужкових ліній, копланарних волноводів, одно- і багат шарових друкованих плат, що включають перехідні отвори різних конфігурацій, вертикальних мікросмужкових ліній, а також антен.

Використання в своїй основі методу моментів (МоМ) в закритому об'ємі дозволяє стабільно отримувати якісні результати з точністю 1% і нижче. Додаткові настройки програми дозволяють отримати повторювані результати аналізу з точністю краще за 0.1%.



Рисунок 2.4 - Інтерфейс програми Sonnet

Крім того, що компанія Sonnet надає дуже точний інструментарій для високочастотного електромагнітного аналізу планарних структур, вона також дає

своїм клієнтам можливість використання звичного для них програмного забезпечення. Гнучкість системи Sonnet дає можливість вбудувати її в більшість популярних систем проектування НВЧ пристроїв за допомогою спеціально розроблених інтерфейсів. Як правило, інтеграція виконана на такому високому рівні, що від користувача не потрібно ніяких спеціальних дій, він продовжує працювати в звичному для нього середовищі. Весь обмін даними відбувається в автоматичному режимі.

В даний час доступні інтерфейси до наступних систем:

- Cadence Virtuoso;
- Advanced Design System (ADS) компанії Keysight (Agilent);
- AWR Microwave Office;
- SonnetLab Toolbox for MATLAB;
- Nuhertz Technologies Filter Solutions;
- Applied Computational Sciences (ACS) LINC2.

Найбільшою проблемою в вимірі параметрів реальних НВЧ пристроїв є подача на нього вимірювальних сигналів, так щоб неоднорідність, що виникає в структурі через наявність лінії підведення, роз'єму і вимірювального зонда, не впливала на його характеристики. Аналогічним чином, програмне забезпечення для високочастотного ЕМ моделювання використовує порти схеми для подачі сигналів на її вхід і вимірювання рівнів сигналів на її виході. Присутність портів в ЕМ структурі вносить в неї неоднорідності, наявність яких згодом має бути враховано методами виключення (de-embedding), в іншому випадку в кінцевому результаті аналізу буде присутня значна помилка.

Програмне забезпечення Sonnet дозволяє виконувати екстракцію еквівалентних схем заміщення для аналізованих структур, які потім можуть використовуватися в системах моделювання НВЧ схем частотними або часовими методами. Отримані моделі можуть включати:

- набори S-, Y- і Z-параметрів в форматах Touchstone і Cadence;

- SPICE моделі на основі PI-ланцюгів, які представляють собою точну еквівалентну схему, що описує передачу сигналу між двома будь-якими портами, і враховує навіть взаємні індуктивні зв'язку;
- широкосмугові SPICE схеми заміщення, що описують поведінку ЕМ структури в широкому діапазоні частот, і не мають обмежень на розмір схеми і її конфігурацію;
- модель на основі матриці зв'язкових ліній (TCM), що представляє собою TLINE RLGC матрицю для N зв'язкових паралельних ліній передачі і використовувану при моделюванні програмою Cadence Spectre.

Значно удосконалені алгоритми побудови сіток розбиття, націлені на досягнення максимальної продуктивності обчислювача. Сітки на масивах перехідних отворів тепер будуються більш акуратно, що дозволяє забезпечити прискорення аналізу топологій і міжз'єднань сучасних кремнієвих ВЧ ВІС. Патентована технологія побудови конформної сітки забезпечує високу швидкість моделювання багатошарових структур з товстими металевими шарами. Застосовані тут алгоритми ретельно налаштовані для розпізнавання окремих частин схеми, де потрібно більш подрібнена сітка. Наприклад, пакет Sonnet автоматично формує правильну сітку на краях мікросмужкових ліній, що дозволяє врахувати ефект крайових струмів і суттєво підвищити точність отриманих результатів.

Багатошарова модель товстих провідних шарів використовується для правильного уявлення проникнення полів і струмів в глиб провідника, коли товщина скін-шару стає сумірною з товщиною металізації. Це дозволяє точно розраховувати добротність планарних котушок, виконаних на кристалах кремнію.

Розроблена компанією Sonnet оригінальна адаптивна технологія ABS (Adaptive Band Synthesis) дозволяє швидше виконувати моделювання в широких діапазонах частот без втрати точності за рахунок скорочення числа точок аналізу. Сотні точок графіка частотної характеристики можуть бути отримані за підсумками всього аналізу всього в декількох частотних точках. Від користувача

потрібно лише задати його діапазон частот, після чого адаптивний алгоритм ABS сформує частотні характеристики з прецизійним частотним кроком за мінімально можливий час моделювання. Алгоритм аналізує проект і визначає мінімально допустиму кількість запусків ЕМ аналізу, яке не призведе до втрати точності, запускає моделювання і за його результатами формує залежності S-, Y- і Z-параметрів у всьому діапазоні частот. Технологія дозволяє виконувати моделювання в сотні разів швидше в порівнянні зі звичайними методами послідовного перебору частотних точок.

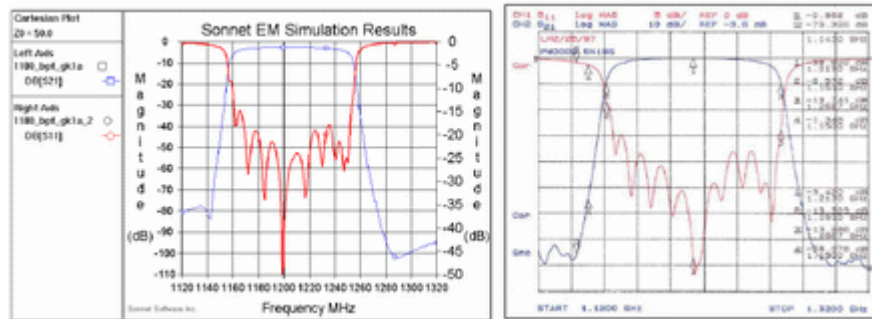


Рисунок 2.5 – Частотна характеристика

2.1.4 AWR Microwave Office

AWR Microwave Office – є одним з найшвидших і сучасних програмних комплексів для проектування ВЧ і НВЧ пристроїв [3].

Розробила пакет Microwave Office компанія AWR (Applied Wave Research) Corporation. Яка заснована в 1994 році, штаб-квартира розташована в Ель Сегундо (штат Каліфорнія, США). Сьогодні AWR пропонує цілий набір спеціалізованих продуктів (Visual System Simulator, Analog Office, Signal Integrity Design Suite) для розробки високочастотних і надвисокочастотних пристроїв: компонентів систем радіозв'язку, електронних приладів, мобільних радіосистем, телекомунікаційного обладнання. AWR має робочі офіси, навчальні центри та комерційні відділи по всьому світу, в даний час організація повністю належить National Instruments.

AWR Microwave Office не може моделювати в тривимірному просторі, але є потужним інструментом для НВЧ-схем. Ефективна можливість моделювання, відома як INET (інтелектуальна мережа) дозволяє легко розробляти багат шарові друковані плати, які можна зробити швидко і точно. Microwave Office володіє великою бібліотекою елементів, що є важливою вимогою точного моделювання.

В рамках єдиної оболонки Microwave Office володіє унікальними інструментами, які є необхідні для розробки різних високочастотних пристроїв і надають можливості: створення та моделювання нелінійних і лінійних схем, оптимізації та електромагнітного аналізу, проектування топології і екстракції паразитних параметрів, статистичного аналізу та зв'язку з пакетами верифікації типу Mentor Calibre або ICED, а також РСВ-проектування. Бібліотеки Microwave Office налічують більш ніж 500 моделей розподілених і зосереджених компонентів, а також 150 тисяч простих елементів від різних виробників, що застосовуються при створенні високочастотних схем. Програма працює в частотній і часовій областях, проводить аналіз схем на основі рядів Вольтерра, конверсійно-матричним способом, лінійної стабільності, перехідних процесів, одночастотних і багаточастотних методів гармонійного балансу нелінійних схем і деяких інших способів.

Графічний редактор Microwave Office пропонує тривимірне анімаційне кольорове зображення високочастотних струмів з відображенням їх амплітуд і напрямків. Крім цього присутні всі «традиційні» варіанти виведення розрахункових даних: діаграми Сміта, таблиці даних, графіки в полярних і прямокутних системах координат. В даному ПЗ присутній модуль аналізу антен, що дозволяє розраховувати їх характеристики, будувати діаграми спрямованості (LHCP, RHCP, ETheta і EPhi), переглядати і анімувати струми. Кожному елементу на схемі призначений його топологічний еквівалент. Редактор топологій дає можливість створювати нові або змінювати наявні варіанти. Оскільки даний редактор постійно пов'язаний з редактором схем, топологія автоматично генерується в міру створення проекту. У редакторі топологій є модуль за

контролем топологічних норм, що допомагає ефективно відстежувати і усувати порушення.

Крім цього в Microwave Office можна виділити наступні інтегровані інструменти:

- обчислювальний модуль APLAC, що моделює в тимчасовій області ємні схеми з компонентами з високою нелінійністю шляхом гармонійного балансу;
- автоматичну екстракцію паразитних параметрів (технологія ACE);
- технологію «розумних» мереж iNet для формування міжз'єднань;
- модуль AXIEM для повного 3D електромагнітного аналізу (можливе виконання тривимірного моделювання сторонніми програмами, для цього спеціально створений інтерфейс EM Socket);
- модуль синтезу частотно-вибіркових пасивних ланцюгів Nuhertz Technologies;
- можливість роботи з багатошаровими платами з урахуванням технологічних шарів;
- пошаровий перегляд плоского відображення топології або тривимірного зображення проектованого приладу в «прозорому» варіанті, а також шляхом накладання різних текстур.

Microwave Office включає лінійне моделювання, моделювання гармонічного сигналу у часовій області і електромагнітне моделювання. Вона включає в себе аналіз лінійних і нелінійних шумів і може моделювати нелінійну поведінку, присутню в НВЧ пристроях [4].

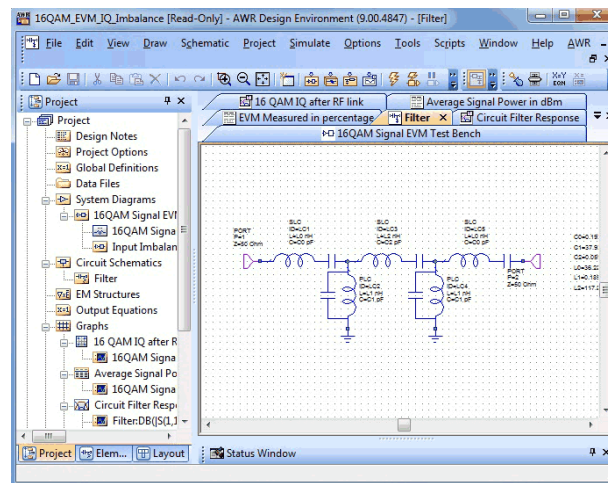


Рисунок 2.6 – Робоче вікно програми Microwave Office

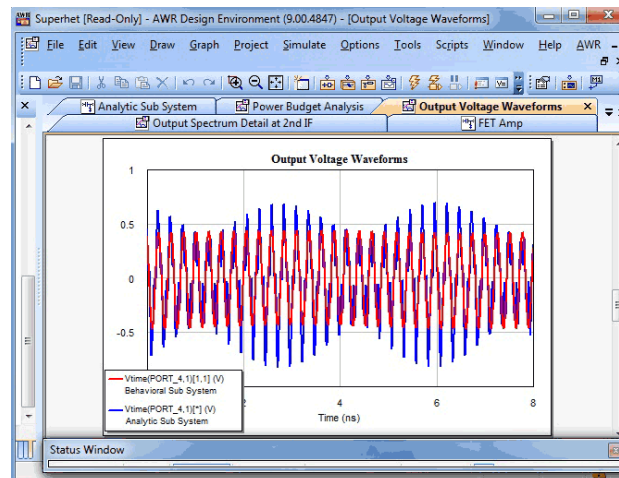


Рисунок 2.7 – Графічні результати аналізу ланцюга Microwave Office

2.1.5 ANSYS HFSS

ANSYS HFSS - це сучасне, високопродуктивне програмне забезпечення для моделювання електромагнітних полів, що використовується для аналізу бездротових пристроїв, друкованих плат, елементів силової електроніки та інших електронних пристроїв різного застосування.

HFSS є відмінним інструментом для вирішення завдань радіолокації, розрахунку ЕПР об'єктів зі складною геометрією. Математична основа ANSYS

HFSS - метод кінцевих елементів, завдання якого полягає в знаходженні єдиного можливого розподілу електромагнітного поля в заданій розрахунковій області при зазначених граничних умовах і порушення. ANSYS HFSS стрімко розвивається, високопродуктивні розв'язувачі з високою точністю і максимальною швидкістю, що дозволяють розрахувати електричні і магнітні поля, струми, S-параметри, випромінювання полів в ближній і дальній зонах, питому потужність поглинання випромінювання, втрати в матеріалах і втрати на випромінювання, а також перетворення різних видів коливань. Користувачеві надається величезний інструментарій та сучасний постпроцесор для розрахунку і оптимізації електродинамічних пристроїв на основі аналізу віртуальної моделі. Процес виконання розрахунку повністю автоматизований, користувачеві необхідно всього лише визначити геометричні параметри, властивості матеріалів і бажаний результат. HFSS автоматично побудує точну сітковий модель, відповідну конкретного випадку, для вирішення задачі за допомогою методу кінцевих елементів. В технології HFSS фізика визначає параметри сіткового моделі, а не навпаки.

ANSYS HFSS застосовується для розрахунків електромагнітних полів в антенних системах бездротових пристроїв, елементах друкованих плат, а також НВЧ і ВЧ-компонентів. Робота з віртуальними моделями замість дорогих натурних експериментів має чітку економічну обґрунтованість. HFSS застосовується для вирішення цілої низки завдань з області електродинаміки. Розрахунок тривимірного електромагнітного поля різних антенних систем: автомобільних радарів, засобів мобільного зв'язку; Рішення задач інтерференції електромагнітного поля і взаємних впливів; Розрахунок багатоелементних антенних решіток; Розрахунок діаграм розсіювання (RCS - Radar Cross Section) для великих об'єктів, таких як літаки та інші транспортні засоби. Розрахунок RCS проводиться з метою мінімізації виявлення об'єктів радаром, або для отримання типових діаграм розсіювання. Аналіз сигналів в електронних схемах і платах, на роз'ємах і в різних з'єднаннях; Прогнозування електромагнітних завад, сигнальних

трактів і електроживлення; Моделювання передачі електромагнітної енергії від мікросхем або друкованої плати до корпусу, розсіювання електромагнітного випромінювання на корпусі; Міждисциплінарні завдання: модуль HFSS може бути пов'язаний з ANSYS Mechanical і ANSYS DesignXplorer для виконання міждисциплінарного аналізу та вивчення можливостей оптимізації виробів.

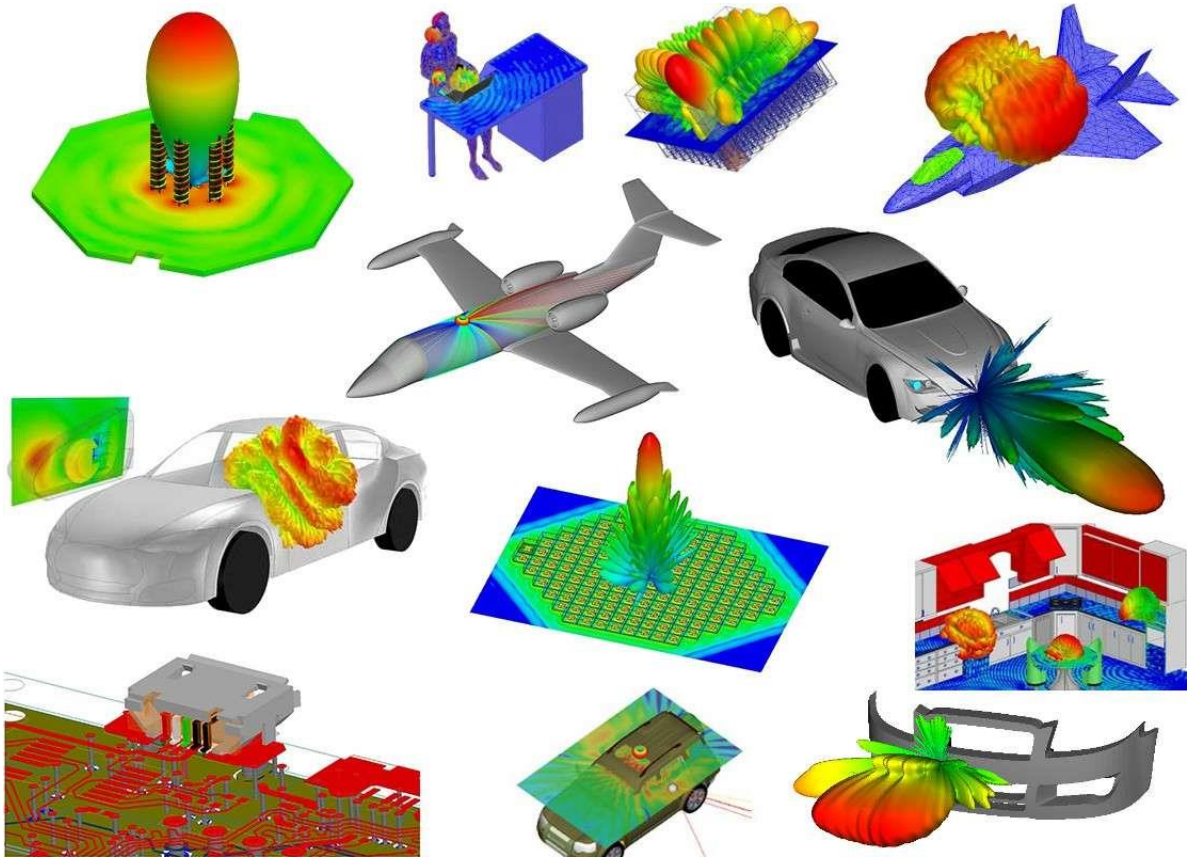


Рисунок 2.8 – Приклади вирішення задач за допомогою ANSYS HFSS

HFSS 3D Modeler ANSYS HFSS оснащений вбудованим графічним редактором, функціонал якого в повній мірі забезпечує потреби користувача на етапі підготовки моделі для розрахунку:

- імпорт геометричної CAD-моделі з усіх сучасних пакетів тривимірного моделювання;
- робота з великими збірками;

- база примітивів: прямокутник, окружність, паралелепіпед, циліндр, конус, сфера, тор;
- можливість створення геометричних моделей зверху-вниз (операції з геометричними примітивами) і знизу-вгору (точки, лінії, поверхні, об'єми).
- булеві операції над геометричними об'єктами (додавання, віднімання, перетин і т.д.);
- можливість злиття декількох геометричних об'єктів в один.
- параметричне завдання геометрії;
- перевірка на наявність малих геометричних об'єктів, сингулярностей і багато чого іншого з можливістю візуального контролю;
- інструменти вимірювання геометричних об'єктів: запит обсягу, площі поверхні, довжини лінії і ін.

ANSYS HFSS має набір примітивів, який використовується для спрощення створення і параметризації моделей антенних систем і хвильоводних НВЧ-трактів: елементи друкованих плат, прямокутні і круглі хвильоводи, рупори, антени, будь-які види випромінювачів, корпуси плат.

3D-макет HFSS - це інтерфейс, оптимізований для створення шаруватої геометрії для друкованих плат та їх пасивних компонентів. Він підходить для аналізу цілісності сигналу (Signal Integrity), напівхвильових та випромінювальних ефектів.

Застосування:

- аналіз високошвидкісних послідовних каналів зі складними переходами між шарами плати;
- комутаційні антени та міліметрові хвильові канали.

Використовуючи 3D-макет HFSS, ви можете імпортувати або перебудувати геометрію для аналізу наступних характеристик:

- електромагнітні параметри;
- випромінені поля;

- дослідження імпедансів та констант поширення;
- S-параметри;
- внесені та повернені втрати.

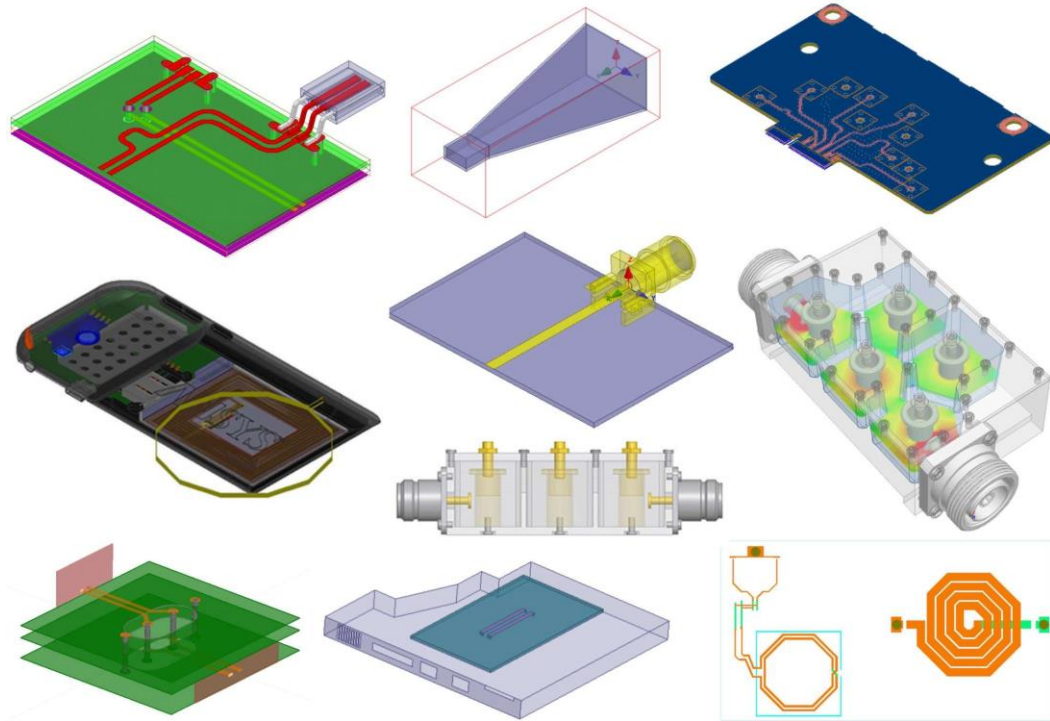


Рисунок 2.9 – Геометричні моделі, створені за допомогою примітивів ANSYS HFSS

Модель у 3D-макеті HFSS також є тривимірним об'єктом, і модель може враховувати ефекти травлення плати, типи склеювання дроту та типи кульок припою. Геометрія макета визначається як об'єкт 2.5D зі стеками та спеціалізованими примітивами, такими як наскрізні отвори, шпильки, доріжки та з'єднувальні дроти.

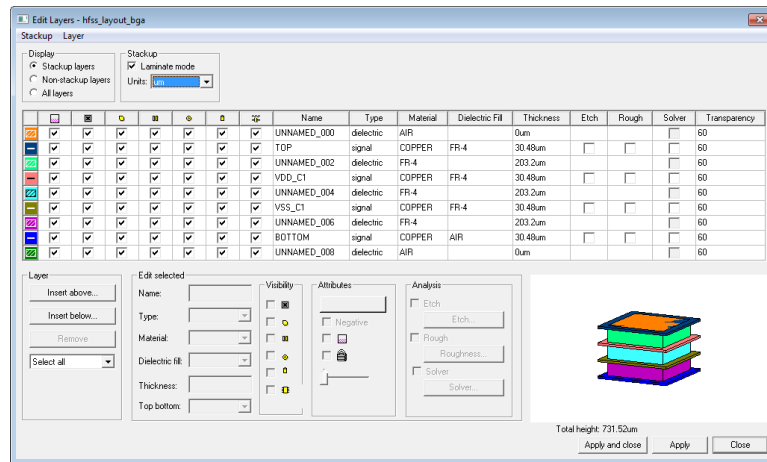


Рисунок 2.10 – Редактор 3D Layout

Редактор 3D Layout (представлений на рис.2.10) повністю параметричний, тому ширину і товщину трас можна легко змінювати. Розв'язувач HFSS в 3D Layout включає в себе безліч функцій, призначених спеціально для друкованих плат і структур корпусів. В основі розв'язувача лежить передова технологія побудови сітки, адаптована для багат шарової геометрії і елементів інтегральних схем. Будь-яка модель, створена в ANSYS, може бути перетворена в 3D-компонент. 3D-компоненти можна використовувати в більш складних моделях і проектах. 3D-компоненти включають в себе геометрію, властивості матеріалу, граничні умови, настройки сітки, збудження тощо. Вони зручні для повторного використання в таких пристроях як: антени, роз'єми і пристрої поверхневого монтажу (конденсатори, індуктивності і фільтри). 3D-компоненти можуть бути захищені паролем і шифруванням. 3D-компоненти ANSYS можна порівняти з будівельними блоками, реалізованими у вигляді модулів plug-and-play. Оскільки 3D-компоненти забезпечують повністю пов'язаний електромагнітний аналіз, вони мають явну перевагу в порівнянні з моделлю S-параметрів, яка забезпечує тільки відгук компонента. Якщо інженер встановлює 3D-компонент антени на літак для імітації характеристик антени, то він може бути впевнений, що результат моделювання буде являти собою повністю пов'язану і точну модель.

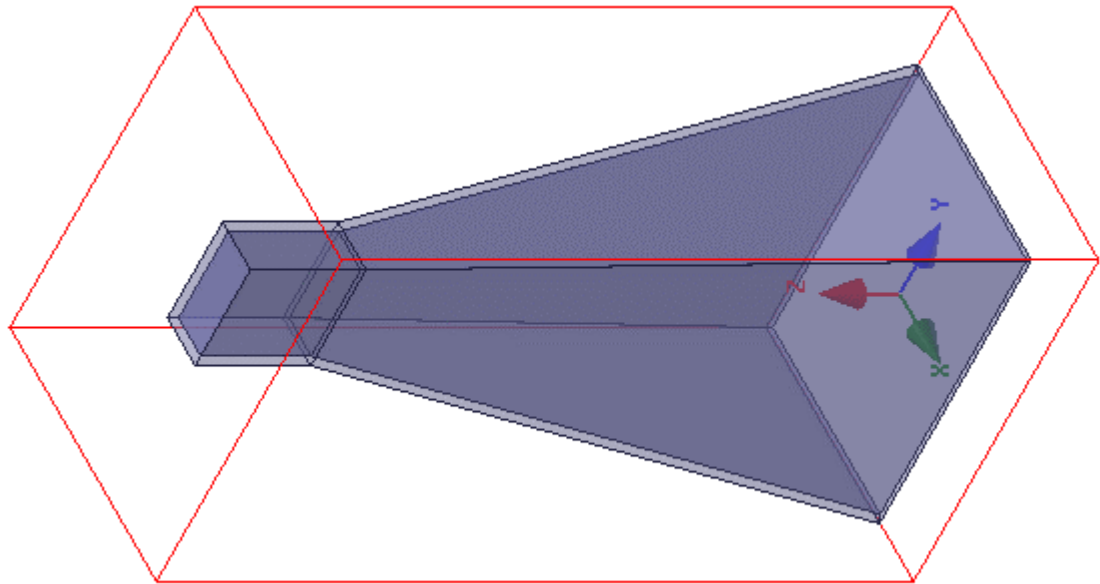


Рисунок 2.11 – Тривимірна модель в ANSYS HFSS

Сьогодні все більше постачальників і розробників дискретних компонентів створюють їх тривимірні моделі в ANSYS HFSS і надають їх кінцевим користувачам. Інженери можуть використовувати ці моделі при моделюванні великих систем. Завдяки цій можливості постачальники отримують конкурентну перевагу, а у інженерів з'являється можливість розрахункової перевірки виробів перед їх вибором.

Програмне забезпечення HFSS компанії ANSYS є галузевим стандартом для 3D електромагнітного моделювання. Стандарт точності, передові обчислювальні технології роблять його незамінним інструментом для інженерів, яким необхідно виконати точне і швидке проектування високочастотних і електронних пристроїв. HFSS вирішує поставлене користувачем завдання в області СВЧ, використовуючи методи кінцевих елементів, інтегральних рівнянь, асимптотичні і передові змішані методи. До того ж, HFSS використовують, щоб розрахувати електромагнітні зв'язки між сполучними елементами, ліній електропередач, перехідних отворів друкованих плат.

Враховуючи проведений аналіз, нами було обрано систему HFSS.

2.2 Проектування мікросмушкового відгалужувача в системі HFSS

Для побудови конструкції мікросмушкового відгалужувача на нерегулярних лініях, було вирішено використовувати систему електродинамічного моделювання і проектування Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Система проектування HFSS призначена для розрахунку параметрів і моделювання електромагнітних кіл у складних НВЧ пристроях за допомогою методів кінцевих елементів. Програмне забезпечення включає в себе програму креслення тривимірних об'єктів, програму розрахунку, яка включає декілька методів вирішення граничних задач і постпроцесорів для обробки і детального аналізу отриманих результатів .

Система має велику базу даних матеріалів з заданою діелектричною проникністю, магнітною проникністю, з електричними і магнітними тангенсами кута втрат. Також система має велику бібліотеку стандартних структур, що значно скорочує процес створення складних об'єктів.

За допомогою системи проектування HFSS можливо розрахувати:

- ближнє електромагнітне поле і поле дальньої зони;
- характеристичні імпеданси портів і сталі розповсюдження в регулярних лініях передачі, які підключені до портів;
- одномодові і багатомодові матриці розсіювання пристроїв.

HFSS включає в себе програму розрахунку власних хвиль хвилеведучих структур, і власних коливань НВЧ резонаторів Eigenmode. При використанні Eigenmode, HFSS розраховує резонансні частоти власних коливань і сталі розповсюдження власних хвиль структури на основі її геометрії, властивостей матеріалу і граничних властивостей. Система HFSS може отримувати рішення для фіксованої частоти і для ряду частот.

Перед початком розв'язання електродинамічних задач необхідно накреслити пристрій, що аналізується, визначити матеріали для кожного об'єкту, вказати порти і граничні умови на поверхнях. Потім система HFSS розрахує

електромагнітне поле в кожній точці досліджуваної структури і знайде по цим даним S-параметри й інші характеристики.

Першим кроком при проектуванні мікросмушкового відгалужувача на нерегулярних лініях в системі HFSS є створення проекту і встановлення таких параметрів як: одиниці вимірювання проекту і глобальні прив'язки.

Наступним кроком є побудова діелектричної підкладки відгалужувача використовуючи елемент Box. За допомогою вікна властивостей підкладки задаємо її геометричні розміри і матеріал.

Для того, щоб провести електродинамічний аналіз відгалужувача, потрібно створити середовище, в якому він буде експлуатуватися. Для цього будується бокс повітря, який охоплює відгалужувач.

Після побудови діелектричної підкладки і боксу повітря, переходимо безпосередньо до побудови струмонесучої частини відгалужувача. Для цього необхідно обрати робочу площину, на якій будуть розташовані провідники.

Нерегулярними лініями слугують 2 мідних провідника, які накреслено прямокутниками (Rectangle).

Далі вибрано ще 2 прямокутника (Rectangle) справа і зліва від нерегулярних ліній щоб з'єднати їх з портами. І для всіх цих провідників використано команду Perfect E.

В системі Ansoft HFSS при проектуванні НВЧ пристроїв на вході і на виході встановлюються порти. Їх можна задавати як відрізки хвильових ліній (WavePort), або як зосереджені порти (LumpedPort).

Хвильовий порт представляє собою поверхню, через яку сигнал вводиться або виводиться з геометричної структури. Перерізами портів служать вертикальні площини, які включають частину підкладки, під мікросмушковою лінією, і вся площина корпусу, над мікросмушковою лінією. При вирішенні S-параметрів, передбачається, що структура збуджується хвилями тих типів), які зв'язані з цими перерізами. Збудження кожного хвильового порту індивідуальне.

При проектуванні відгалужувача на нерегулярних лініях були використані хвильові порти, оскільки отримані за допомогою їх результати більш точні.

Використовуючи елемент креслення Rectangle (прямокутник), навпроти ліній живлення накреслено 4 прямокутники і позначено їх як WavePort1, WavePort2, WavePort3, WavePort4.

Після встановлення портів, необхідно визначити граничні умови відгалужувача. Для цього необхідно, використовуючи елемент креслення Rectangle, окреслити периметр спроектованої структури відгалужувача і зазначити його як ідеальний провідник Perfect E, що має нульові тангенціальні складові.

Модель мікросмужкового відгалужувача на неоднорідних лініях, яка спроектована за допомогою системи Ansoft HFSS, зображена на рис. 2.12.

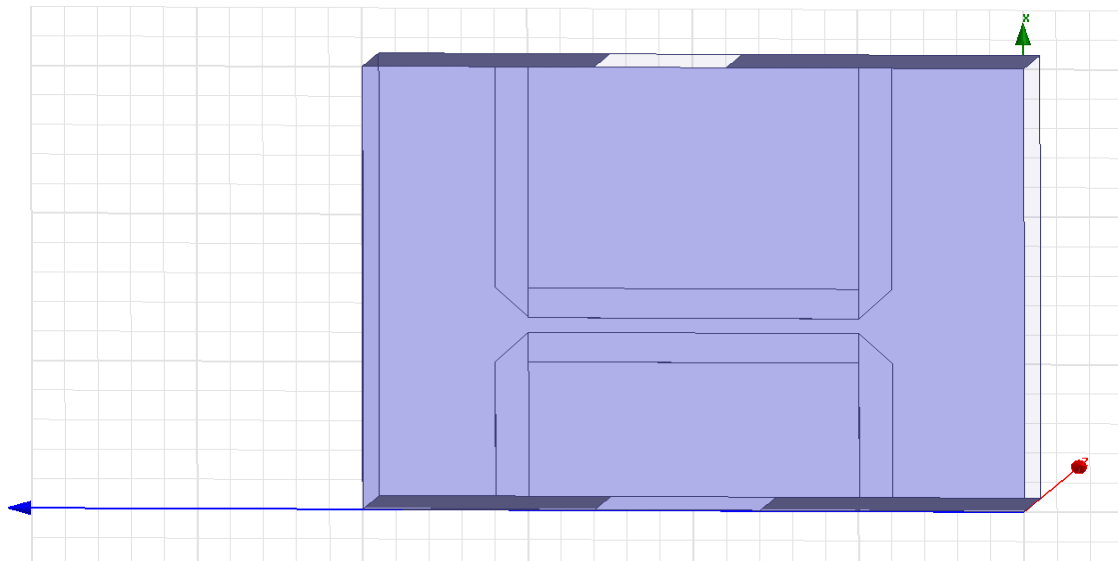


Рисунок 2.12 – Модель мікросмужкового відгалужувача на неоднорідних лініях, створена в системі Ansoft HFSS

Щоб визначити, яким чином система HFSS буде проводити розрахунок структури поля відгалужувача, необхідно визначити параметри вирішення задачі. При встановленні параметрів вирішення задачі, необхідно скористатись командою

Add Solution Setup. За допомогою даної команди можливо встановити частоту, на якій виконується пошук рішення і максимальну кількість ітерацій.

Для того, щоб в установку параметрів включити розгортку за частотою, необхідно скористатись діалоговим вікном Edit Sweep, у якому необхідно вказати діапазон частот.

Перед тим, як розпочати розрахунки, потрібно обрати елементи матриці розсіювання. Для цього, за допомогою діалогового вікна Traces обираємо категорію S-параметрів S(P2,P1) і встановлюємо умову введення елементів матриці у децибелах.

Після того, як всі елементи матриці будуть встановлені, розпочинаємо розрахунок. АЧХ мікросмужкового відгалужувача, що створений в системі Ansoft HFSS, зображена на рис. 2.13.

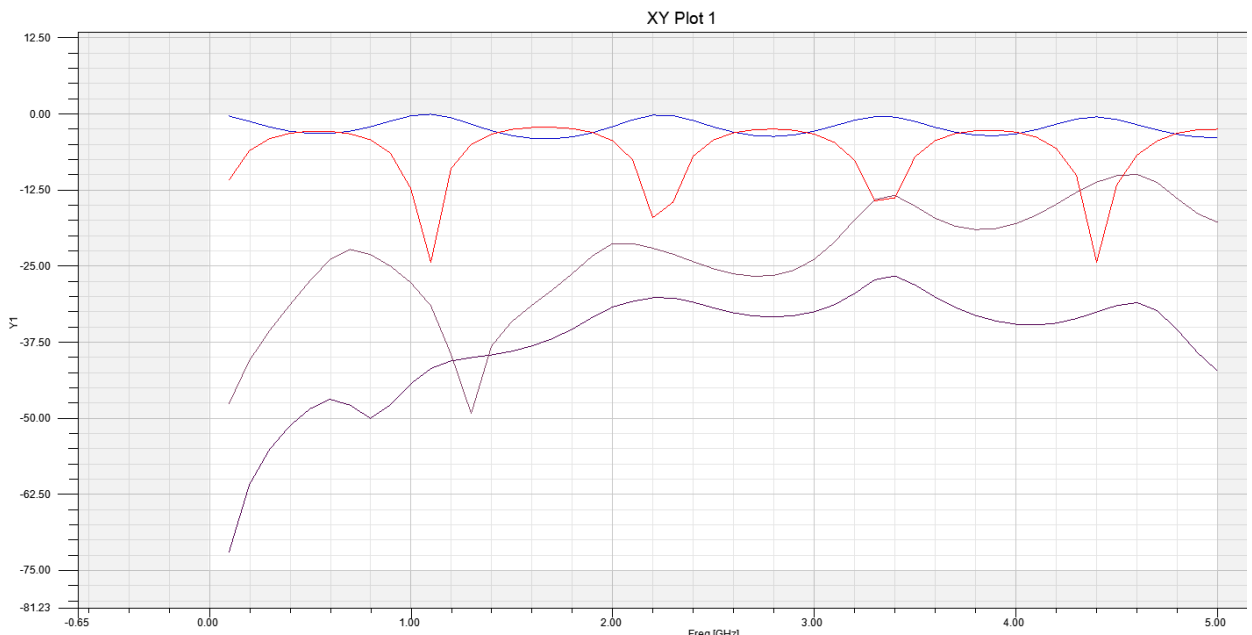


Рисунок 2.13– АЧХ мікросмужкового відгалужувача на нерегулярних лініях в системі Ansoft HFSS

3 СИНТЕЗ МІКРОСМУЖКОВОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА НВЧ НА ОСНОВІ НЕРЕГУЛЯРНИХ ЛІНІЙ

3.1 Проектування мікросмушкового відгалужувача пилкоподібної форми

Є різні методи способів компенсації різноманітних фазових швидкостей. Найкращий результат дають технології повної планарної компенсації, які базуються на фізичному збільшенні довжини шляху хвилі в асиметричному режимі збудження, що збільшує відповідну еквівалентну діелектричну провідність. Цього можна досягти за рахунок застосування пилкоподібної форми зв'язаних ліній.

Але на сьогоднішній день методологія інженерного розрахунку геометрії такого типу відгалужувачів недостатньо розвинута. Внаслідок цього розробка алгоритма проектування відгалужувача з компенсації неоднорідності фазових швидкостей на основі пилкоподібної форми є актуальною задачею.

Побудова основної конструкції здійснюється аналогічно за принципом який представлений у пункті 2.2, але є відмінність полягає в тому що ділянку нерегулярних ліній будується за допомогою команди Create Line. Будуємо прямокутний корпус та заповнюємо його кусочно-ломаними лініями. Та будуємо це ж саме з іншої сторони. Назначаємо ці ділянки ідеальними провідниками. Порти залишаються такими ж самими.

Модель мікросмушкового відгалужувача пилкоподібної форми, яка спроектована за допомогою системи Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.1.

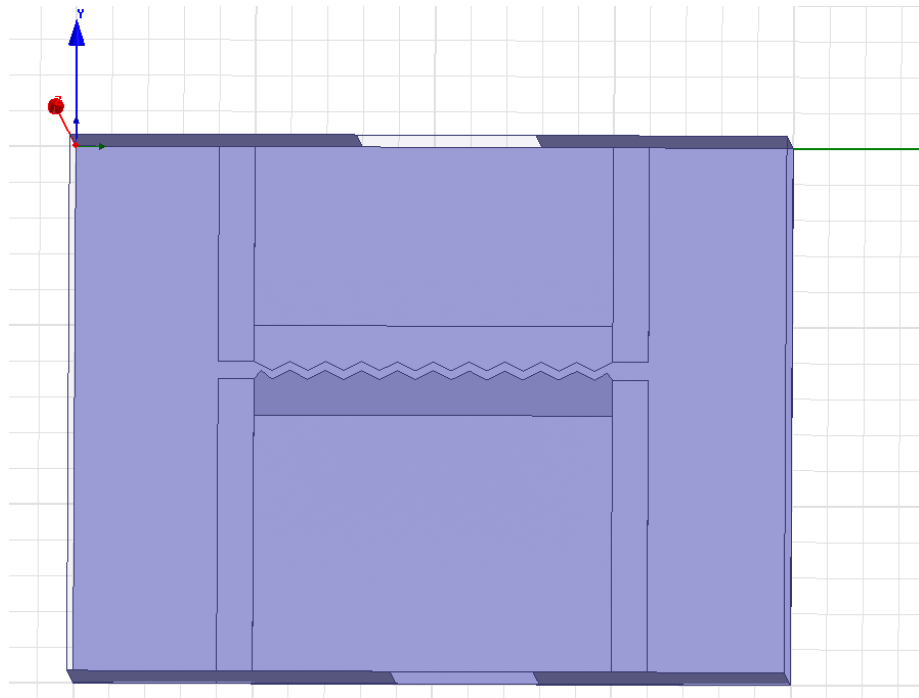


Рисунок 3.1 - Модель мікросмушкового відгалужувача пилкоподібної форми, створена в системі Ansoft HFSS.

Після того, як всі елементи матриці будуть встановлені, розпочинаємо розрахунок. АЧХ мікросмушкового відгалужувача, що створений в системі Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.2.

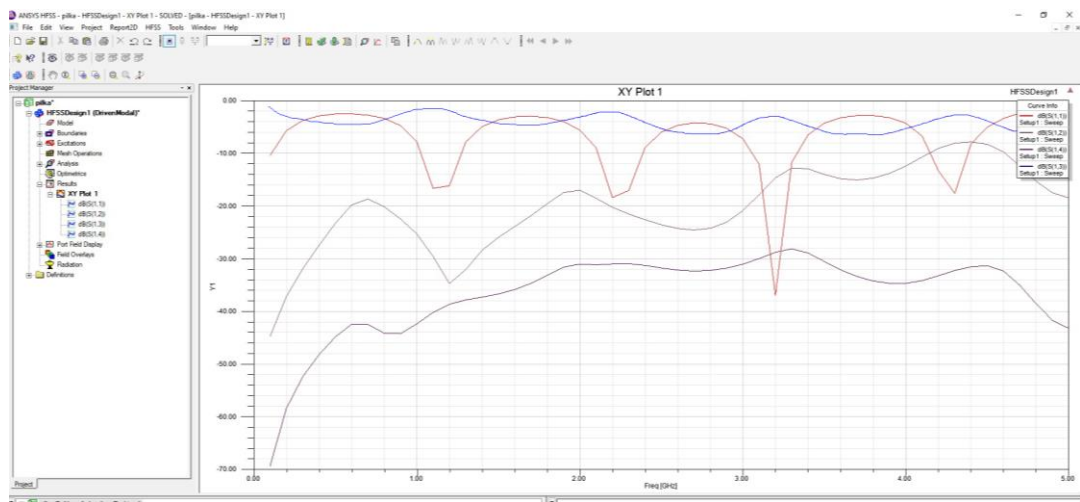


Рисунок 3.2 – АЧХ мікросмушкового відгалужувача пилкоподібної форми в системі Ansoft HFSS

Метод компенсації різниці фазових швидкостей в парному і непарному режимах в мікросмужкових зв'язаних лініях за допомогою введення пилкоподібної геометрії дозволяє досягти високої спрямованості в широкій смузі частот, не використовуючи додаткові зосереджені компоненти, що значно спрощує проектування і виготовлення спрямованих відгалужувачів. Вірність методу підтверджена електродинамічним моделюванням мікросмужкової структури.) пилкоподібна топологія надає результат, близький до традиційної конструкції відгалужувачів на зв'язаних лініях. Це обумовлюється незмінним значенням відстані між зв'язаними лініями.

3.2 Проектування мікросмужкового відгалужувача синусоїдальної форми в системі HFSS

Побудова основної конструкції здійснюється аналогічно за принципом який представлений у пункті 2.2, але є відмінність полягає в тому що нерегулярними лініями слугують декілька видів синусоїд, які будують через команду Draw Equation Based Curve, де вказуємо рівняння, яке має вигляд $A * (\sin(3/(K+1) * (_t))) * (1\text{mm}) + (5\text{mm})$. Наступним кроком є дзеркальне відображення отриманої лінії. Далі з'єднуємо обидві синусоїди з двох боків за допомогою прямих ліній (Draw Line), виділивши які, об'єднуємо командою Unite. Порти залишаються такими ж самими.

Модель мікросмужкового відгалужувача синусоїдальної форми, яка спроектована за допомогою системи Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.3.

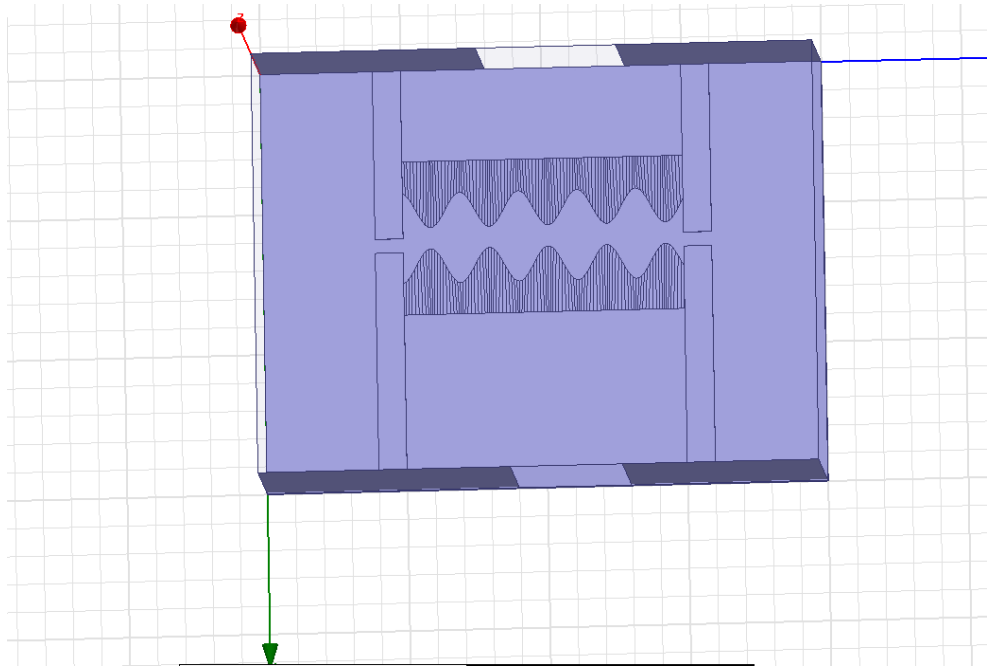


Рисунок 3.3 - Модель мікросмушкового відгалужувача синусоїдальної форми, створена в системі Ansoft HFSS

АЧХ мікросмушкового відгалужувача, що створений в системі Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.4

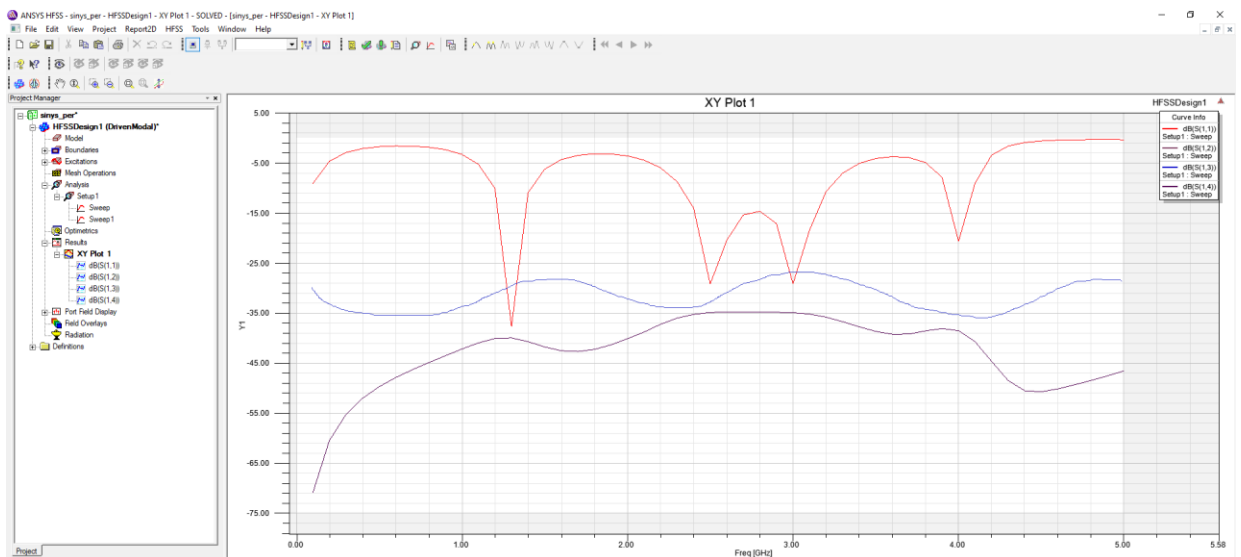


Рисунок 3.4 – АЧХ мікросмушкового відгалужувача на нерегулярних лініях в системі Ansoft HFSS

Топологія на мікросмушкових лініях, що описується синусоїдами (варіант 1) забезпечує відгалужувачу можливість зміни центральної частоти при виборі відповідних значень коефіцієнтів, що може використовуватись для синтезу мікросмушкових відгалужувачів за обраними частотними характеристиками, при цьому довжина ділянки зв'язаних нерегулярних ліній залишається незмінною.

3.3 Проектування мікросмушкового відгалужувача синусоїдальної форми в системі HFSS

Побудова основної конструкції здійснюється аналогічно за принципом який представлений у пункті 2.2, але є відмінність полягає в тому що нерегулярними лініями слугують декілька видів синусоїд, які будуємо через команду Draw Equation Based Curve, де вказуємо рівняння, яке має вигляд $A * (-\sin(3/(K+1)*(_t)))*(1\text{mm})+(5\text{mm})$. Наступним кроком є дзеркальне відображення отриманої лінії. Далі з'єднуємо обидві синусоїди з двох боків за допомогою прямих ліній (Draw Line), виділивши які, об'єднуємо командою Unite. Порти залишаються такими ж самими.

Модель мікросмушкового відгалужувача пілкоподібної форми, яка спроектована за допомогою системи Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.3

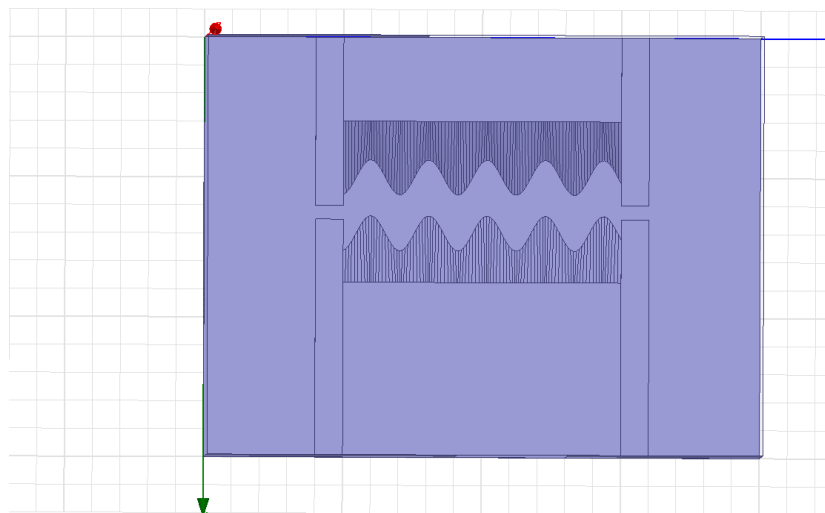


Рисунок 3.5 - Модель мікросмушкового відгалужувача синусоїдальної форми, створена в системі Ansoft HFSS

АЧХ мікросмушкового відгалужувача, що створений в системі Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.6

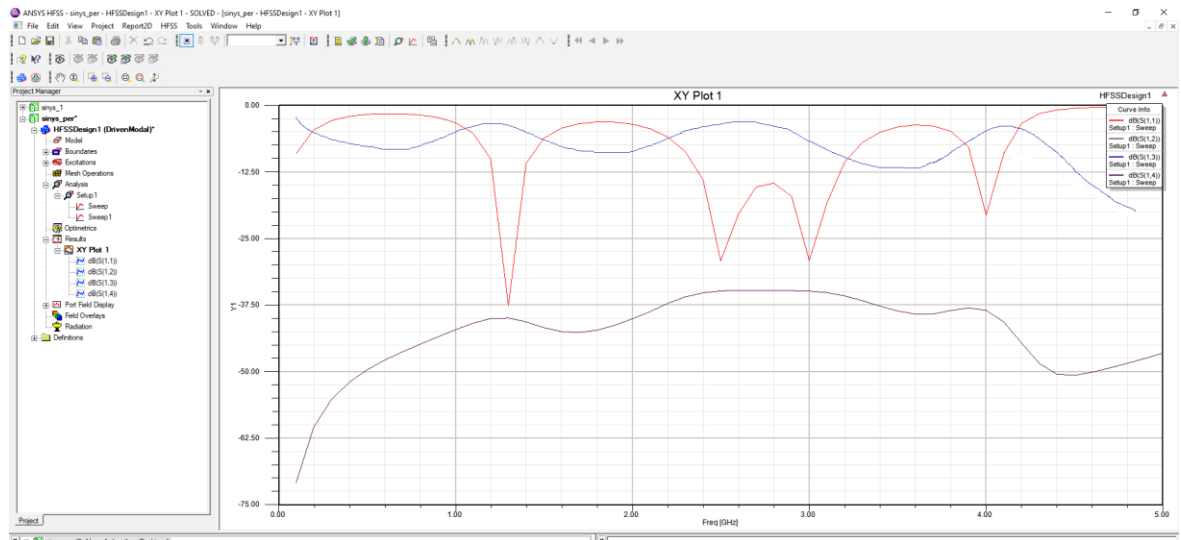


Рисунок 3.6 – АЧХ мікросмушкового відгалужувача на нерегулярних лініях в системі Ansoft HFSS

Топологія на мікросмушкових лініях, що описується синусоїдами (варіант 2), демонструє незадовільні характеристики, що пояснюється постійною зміною відстані між ділянками зв'язаних ліній. Найкращі результати були отримані при малій зміні амплітуди синусоїди, проте в такому разі більш доцільно використовувати традиційні топології для мікросмушкових відгалужувачів, оскільки забезпечувати постійну ширину мікросмушкової лінії простіше з точки зору технологічних процесів.

На нашу думку, продовження досліджень щодо використання нерегулярних ліній у топології мікросмушкових відгалужувачів найбільш доцільно проводити подальшим аналізом топологій із синусоїдальними зв'язаними лініями при постійній відстані між ними.

4 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу

Тема магістерського проекту: проектування мікросмужкового відгалужувача НВЧ із використанням нерегулярних ліній.

Розробка малогабаритних, надійних та якісних відгалужувачів представляє собою дуже важливу задачу. Майже кожен прилад НВЧ включає в себе відгалужувач. Тенденція до мініатюризації апаратури та ускладнення її функцій, широке незгасаюче використання відгалужувачів в різних галузях життя сучасної людини роблять цю розробку актуальною та затребуваною на ринку електронних приладів.

Дослідження мікросмужкових відгалужувачів на основі нерегулярних ліній почалося досить нещодавно та носить інноваційний характер. Основна частина цих досліджень спрямована на вивчення саме відгалужувач нижніх частот. У даній роботі була розглянута можливість проектування відгалужувачів НВЧ.

Дані розробки носять військовий характер та усі дані засекречені.

Питанням дослідження відгалужувачів на нерегулярних лініях присвячено порівняно мало робіт. Загалом матеріал, викладений у навчальній літературі, носить загальний характер, а в різних статтях і публікаціях з даної тематики розглянуті більш вузькі питання проблеми. Однак, потрібний більш детальний облік сучасних умов при дослідженні проблематики зазначеної теми.

Актуальність цієї роботи обумовлена, з одного боку, досить великою зацікавленістю до теми в сучасній науці з боку державних підприємств радіотехнічного спрямування, з іншого боку, її недостатньою розробленістю та попитом на даний вид електронної апаратури.

4.2 Планування розробки програмного продукту

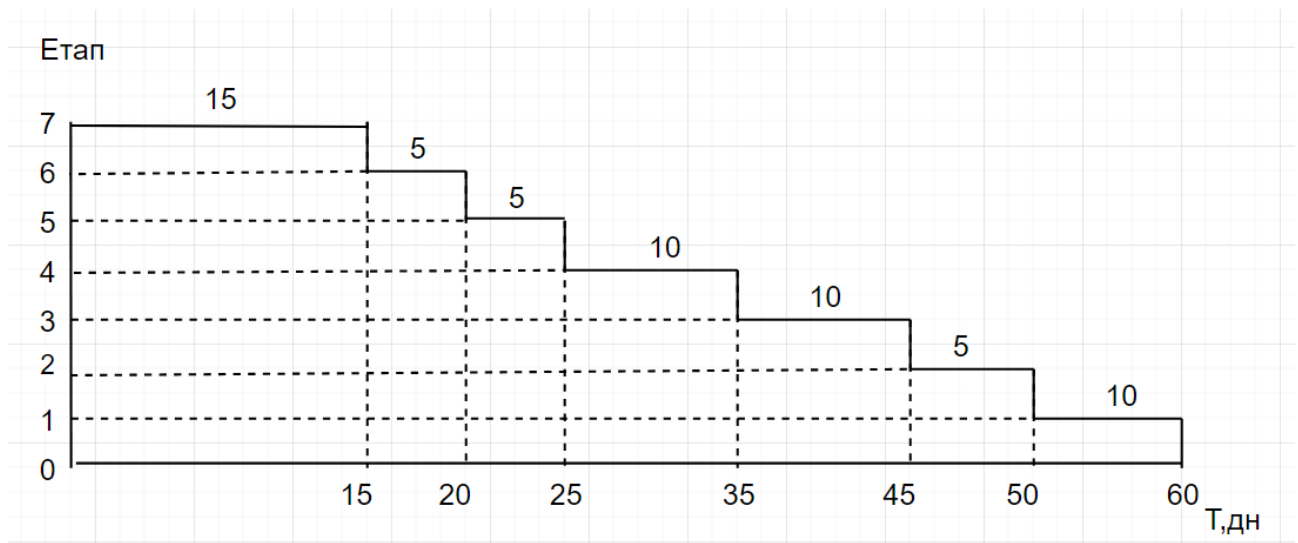
Весь комплекс проектування можна розділити на етапи. Для кожного етапу вказуються трудомісткість, кількість виконавців і тривалість робіт. У науковому дослідженні приймають участь інженер-конструктор протягом 2 місяців і керівник протягом 2 місяців. Завершальним етапом планування розробки програмного продукту є звідний стрічковий графік розробки програмного продукту, побудований за даними таблиці 4.1. Лінійний графік Ганта представлений в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 - Завдання та обов'язки по проектуванню

Найменування роботи	Трудомісткість		Виконавці
	люд.- дні	%к підсумку	
1. Отримання технічного завдання та узгодження ПЗ(розробка теоретичних питань, опрацювання методики розробки ПЗ)	15	25	Керівник Інженер- конструктор
2. Аналіз зібраної інформації	5	8,3	Керівник
3. Аналіз САПР	5	8,3	Інженер- конструктор
4. Виконання розрахунків	10	16,6	Інженер- конструктор
5. Проектування в обраній САПР	10	16,6	Керівник Інженер- конструктор
6. Перевірка результатів розробки	5	8,3	Керівник

7.Оформленні звіту за результатами розробки	10	16,6	Інженер-конструктор
Разом	60	100	

Таблиця 4.2 - Лінійний графік Ганта розробки програмного продукту



4.3 Визначення витрат на проектування

Для визначення витрат на проектування складається калькуляція вартісної вартості робіт, яка включає наступні статті:

- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;
- єдиний соціальний внесок (ЄСВ);
- витрати на спеціальне обладнання;
- матеріали і комплектуючі вироби;
- накладні витрати;
- податки.

4.4 Розрахунок основної заробітної плати

Витрати за цією статтею складаються з планового фонду зарплати всіх категорій працівників, зайнятих в даному проекті. Розрахунок зарплати ведеться на підставі даних про трудомісткості, представлених в табл. 4.3.

Розрахуємо середньоденну ЗП для інженера-конструктора:

$$ЗП_{\text{сд}} = \frac{12\,000}{22,5} = 533,33 \text{ грн.} \quad (4.1)$$

Розрахуємо середньоденну ЗП для менеджера:

$$ЗП_{\text{сд}} = \frac{9\,000}{22,5} = 400,00 \quad (4.2)$$

Результати розрахунків зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Розрахунок основної заробітної плати

Посада виконавця	К-ть, люд.	Посадовий оклад	Середньоденна ЗП	К-ть, днів роботи	Сумарна зарплата, грн.
Керівник	1	12 000,00	533,33	60	55999,80
Інженер-конструктор	1	9 000,00	400,00	60	24000,00
Всього	2				79999,80

4.5 Розрахунок додаткової заробітної плати

Додаткову заробітну плату приймають рівною 10% від основної заробітної плати працівників і розраховують за формулою 3.2:

$$ЗП_{доп} = ЗП_{осн} \cdot 0,1 \quad (4.3)$$

Підставивши величину основної заробітної плати в формулу 4.3, отримуємо:

$$ЗП_{доп} = 79999,80 \cdot 0,1 = 7999,98 \text{ грн}$$

Розрахунок основної і додаткової заробітної плати приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Основна і додаткова заробітна плата

Посада виконавця	Додаткова ЗП, грн.	Основна ЗП, грн.	Сума основної і додаткової ЗП, грн.
Керіник	5599,98	55999,80	61599,78
Інженер-конструктор	2400,00	24000,00	26400,00
Разом	7999,98	79999,80	87999,78

4.6 Відрахування на єдиний соціальний внесок

Вони становлять 22% і беруться від основної та додаткової заробітної плати.

$$ОТ = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot 0,22 \quad (4.4)$$

$$ОТ = (79999,80 + 7999,98) \cdot 0,22 = 19359,95 \text{ грн.}$$

4.7 Визначення затрат на матеріали

У цю статтю включають вартість основних і допоміжних матеріалів, напівфабрикатів, що купуються, і комплектуючих виробів.

Використовується 3 найменування матеріалів: папір пачка 200 листів- 100,00 грн, флеш накопичувач Goodram 16GB Twister Black USB 2.0- 300,00 грн, чорнила для заправки картриджів HP PSC1410 Black, 100 мл – 200,00грн.

Витрати на комплектуючі розраховують за формулою 4.5:

$$M = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot N_i \cdot (1 + K_{m.z.}) - C_{io} \cdot N_{io}), \quad (4.5)$$

де M - витрати на покупки напівфабрикати і комплектуючі вироби, грн.;

$K_{m.z.}$ - коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати;

C_i - ціна і-го найменування напівфабрикату і комплектуючого, грн.;

N_i - потреба в і-му напівфабрикаті і комплектуючому;

C_{io} - вартість зворотних відходів і-го найменування комплектуючого, грн.;

N_{io} - кількість зворотних відходів і-го найменування;

n - кількість найменувань напівфабрикатів і комплектуючих.

$$C_{io} = 0; N_{io} = 0; K_{m.z.} = 0,05;$$

$$M = (1 + 0,05) \cdot (100,00 + 200,00 + 300,00) = 600,00 \text{ грн.}$$

Разом, витрати на матеріали становлять 600,00 грн.

4.8 Витрати на спеціальне обладнання

В дану статтю входять витрати на придбання, транспортування, монтаж і налагодження нестандартного обладнання.

В даному випадку, в даній статті враховуються витрати на оплату машинного часу ПК для проектування. Для чого необхідно скласти кошторис «витрат на утримання і експлуатацію устаткування» виходячи з якої визначиться вартість одного машино-години роботи ПК. У табл. 4.5 наведене обладнання яке використовується при роботі.

Таблиця 4.5 – Спеціальне обладнання

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Загальна вартість, грн.
ПК RTLINE Gaming X47 v36 (X47v36)	шт.	1	20000,0	20000,0
Програмне забезпечення HFSS	шт.	1	65000	65000
Транспортно-підготовчі роботи 5%				4250,00
Разом				89250,00

Амортизаційні відрахування визначають за формулою 4.6:

$$A = \Phi_{\delta} \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (4.6)$$

де Φ_{δ} - балансова вартість обчислювальної техніки, грн. ;

H_a - норма амортизаційних відрахувань на повне відновлення обчислювальної техніки.

Балансова вартість обчислювальної техніки становить 89250,00 грн.

Отримуємо:

$$A = 89250,00 \cdot \frac{50}{100} = 44\,625 \text{ грн}$$

Статтю «Експлуатація обладнання» розраховують підсумовуванням витрат на електроенергію і допоміжні комплектуючі.

$$C_{\varepsilon} = N_n \cdot \Phi_{\varepsilon\phi} \cdot K_{3\varepsilon} \cdot K_{3M} \cdot C_{\varepsilon}, \quad (4.7)$$

де N_n - номінальна потужність ЕОМ, кВт;

$\Phi_{\varepsilon\phi}$ - річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ, машино-год;

$K_{3\varepsilon}$ - середній коефіцієнт завантаження за часом;

$K_{ш}$ - коефіцієнт завантаження по потужності;

C_e - ціна одного кВт-год електроенергії, грн./(кВт-ч).

$$C_e = 0,2 * 1\,750 * 0,9 * 0,7 * 2,68 = 590,94 \text{ грн}$$

$$C_e = \frac{590,94}{12} * 2 = 98,49 \text{ грн.}$$

Зарплата обслуговуючого персоналу розраховується за формулою (4.8):

$$ЗП_{обсл} = ФЗП_p * (1 + K_{відр}) * \frac{t_{обсл}}{Ф_{еф.обсл}} \quad (4.8)$$

де $ФЗП_p$ - річний фонд заробітної плати (основної і додаткової) обслуговуючих робітників, грн.;

$K_{відр}$ - коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальне страхування і в інші фонди;

$t_{обсл}$ - час протягом року, необхідне на технічне обслуговування ПК;

$Ф_{еф.обсл}$ - річний ефективний фонд часу обслуговуючого персоналу.

Машину обслуговує один електромонтер 1 раз за неділю з основною ЗП 5 000 грн./міс. та додатковою ЗП 500 грн./міс.

$$ЗП_{обсл} = \left(\frac{5\,500,00}{22,5} * 9 \right) * (1 + 0,22) = 2\,201,18 \text{ грн}$$

Сума витрат по статті «Поточний ремонт устаткування» дорівнює 3% річних від балансової вартості устаткування.

$$\frac{89250,00 * 0,03}{365} * 61 = 447,47 \text{ грн.}$$

Інші витрати складають 5% від суми попередніх.

$$\frac{(44\,625,00 + 98,49 + 2\,201,18 + 447,47) * 5}{100} = 2\,368,60 \text{ грн.}$$

Зведемо отримані дані в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Кошторис витрат на зміст і експлуатацію устаткування

Найменування статей витрат	Сума, грн.
Амортизація устаткування	44625,00
Експлуатація устаткування	98,49
Зарплата обслуговуючого персоналу з відрахуваннями	2 201,18
Поточний ремонт устаткування	447,47
Інші витрати	2368,60
Всього	49740,74

4.9 Загальновиробничі витрати

До загальновиробничих витрат відносяться витрати на загальне управління і загальногосподарські потреби (заробітна плата апарату управління, канцелярські витрати і так далі), зміст і експлуатацію будинків. Загальновиробничі витрати включаються у вартість розробки програми непрямым шляхом - у відсотках до основної заробітної плати розробників. В даному випадку загальновиробничі витрати складають 40% до основної заробітної плати розробників, що складає 14400,00 грн.

Таблиця 4.7 - Калькуляція кошторисної вартості робіт по розробці програми і ціна програмного продукту

Найменування статей витрат	Сума, грн.
Витрати на матеріали	600,00
Основна ЗП та додаткова ЗП	87999,78
Соціальні відрахування	19359,95
Витрати на оплату машинного часу	18 958,62
Загальновиробничі витрати	14 400,00
Разом витрати	141318,35

4.10 Розрахунок техніко-економічної ефективності моделі

Для теоретичних досліджень у більшості випадків важко чи навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їхню техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників:

- важливості дослідження для народного господарства;
- складності розробки;
- результативності й можливості використання.

Важливість теоретичного дослідження оцінюємо як пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень і ін.

Результативність НДР визначається по повноті рішень поставленого завдання: отриманий результат відповідає планованому, задовільний (часткове рішення) чи негативний.

Аналіз залежності між цими показниками й витратами на їхнє досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічної ефективності теоретичних НДР і визначається за формулою (4.9):

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n * R * T}{B_{\text{НДР}} * t_{\text{НДР}}}, \quad (4.9)$$

де $K_{\text{НДР}}$ – рівень ефективності дослідження (коефіцієнт техніко- економічної ефективності НДР):

J^n - важливість роботи;

R - результативність роботи;

T - технічна складність виконання НДР;

$B_{\text{НДР}}$ - витрати на проведення НДР, років:

n - показник використання результатів НДР:

$n = 0$ - результати НДР не використовуються;

$n = 1$ - результати НДР використовуються частково;

$n = 2$ - результати НДР використовуються в дослідно-конструкторських роботах (ДКР);

$n = 3$ - результати НДР можуть бути використані без проведення ДКР.

Для НДР, у яких $V_{\text{НДР}} > 30$ тис. грн. і $t_{\text{НДР}} \leq 2$ років, можна застосовувати такі значення оцінних факторів наведених в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Значення оцінних факторів

Оцінні фактори	J	R	T	C	t_{ϕ}	n
Припустимі значення	1...4	1...4	1...4	-	-	1...4
Прийняті значення	3	2	2	-	-	2

Згідно значень з таблиці оцінних факторів, отримуємо такий вираз:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{3^2 * 2 * 2}{71,88 * 0,2} = \frac{16}{14,38} = 2,5$$

Таким чином, так як коефіцієнт техніко-економічної ефективності НДР $K_{\text{НДР}} \geq 1$, в нашому випадку рівний $K_{\text{НДР}} = 2,5$, то дослідницька робота вважається ефективною.

Термін окупності $T_{\text{ок}}$ проекту розраховується за формулою (4.10):

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{K_{\text{НДР}}} \quad (4.10)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

4.11 Висновки

В даному розділі був проведений аналіз і обґрунтування економічної ефективності науково-дослідної роботи. Дана проектна робота з урахуванням

реалізації конструювання не має повноцінних аналогів у нашій країні. Розраховано, що для проведення дослідження необхідно близько 60 днів.

Обґрунтованість ефективності дослідження підтверджується розрахованим коефіцієнтом економічної ефективності, який становить – 2,5.

Під час проведення розрахунків були розраховані витрати на реалізацію проекту. Розрахунок витрат і економічної ефективності показав, що розроблений проект окупиться через чотири місяці.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

В даній магістерській роботі розглядаються методи побудови мікросмужкових пристроїв та пропонуються способи їх оптимізації в системах автоматизованого проектування. Основним виконавцем цього виду робіт є інженер-конструктор .

Основними потенційними небезпеками при проведенні робіт в кабінеті є такі:

- небезпека ураження електричним струмом, внаслідок недотримання правил електробезпеки або виходу з ладу електроприладів;

- порушення роботи кістково-м'язового апарату внаслідок тривалих статичних навантажень при роботі з ПК.

- нервово-психічні перевантаження внаслідок постійного контакту з клієнтами, колегами по роботі, керівництвом при вирішенні робочих питань, які носять конфліктний характер і призвести до емоційного дискомфорту, , емоційної нестабільності та захворювань нервової системи;

- незадовільні ергономічні характеристики робочого місця внаслідок нерационального планування робочого місця, що призводить до механічних травм, уражень електричним струмом та порушень кістково-м'язового апарату;

- негативний вплив недостатнього освітлення робочої зони на зір та продуктивність роботи працюючого, внаслідок несправності освітлювальних приладів або неправильного проектування освітлювальної системи;

- негативний вплив незадовільних параметрів повітряного середовища робочої зони на здоров'я працюючого, внаслідок неправильного проектування системи вентиляції або несправності її несправності;

-негативний вплив підвищеного рівня шуму на психоемоційний стан працюючого, який пов'язаний з використанням застарілої периферійної техніки, кондиціонерів, копіювальної техніки, освітлювальних приладів;

-небезпека загоряння у зв'язку із несправністю електричного обладнання, недотримання, або порушення правил протипожежної безпеки обслуговуючим персоналом, що може призвести до пожежі.

5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Кабінет, в якому знаходяться співробітники, відносяться до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом.

Обладнання, яке використовується в даних кабінетах є споживачем електроенергії, яке живиться від змінного струму 220 В від мережі з заземленою нейтраллю, та відноситься до електроустановок до 1000В закритого виконання. Згідно ПУЕ(«Правила устрою електроустановок») виконані такі групи заходів з електробезпеки:

- конструктивні заходи забезпечують захист від випадкового дотику до струмопровідних частин за допомогою їх ізоляції та захисних оболонок. Так як згідно з НПАОП40.1-1.32-01«Правила устрою електроустановок. Электрооборудование специальных установок» приміщення лабораторії відноситься до класу пожеженебезпечної зони П-Па 97(приміщення, в яких містяться тверді горючі речовини), тому передбачений ступінь захисту ізоляції обладнання IP44.

- схемно-конструктивні заходи призначені для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих оболонок, які можуть опинитися під напругою в результаті аварій.

- організаційні заходи. Експлуатація електроустановок і електроустаткування проводиться відповідно до ДНАОП1.1.10-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» та ДНАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Згідно вимог НПАОП0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», з метою попередження можливих травмувань, з усіма працівниками, прийнятими на роботу, а також у період роботи проводяться навчання, інструктажі з питань: охорони праці (вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий); надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків; правилам поведіння при виникненні аварій або навчання з правил електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу на отримання та підвищення групи з електробезпеки.

Відповідно до вимог розділу «Мінімальні вимоги з охорони праці», директиви ЕС90/270ЕЕС виконані основні вимоги до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене блимання;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;-екрани вільні від відблисків і відбиття;
- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів.

Нервово напруження впливає на серцево-судинну систему, збільшуючи артеріальний тиск і частоту пульсу, а також на терморегуляцію організму та емоційні стани працівника. Особливу роль в запобіганні втоми працівників відіграють професійний відбір, організація робочого місця, правильне робоче положення, ритм роботи, раціоналізація трудового процесу, використання емоційних стимулів, впровадження раціональних режимів праці та відпочинку тощо. З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, передбачені перерви в роботі -15 хвилин кожні 2 години, а також спеціально обладнане приміщення -кімната відпочинку. Для запобігання кістково-м'язових порушень у зв'язку з тривалою статичною

напругою м'язів спини, шиї, рук і ніг проводиться виконання фізичних вправ 2-3 рази протягом робочого часу.

5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни

Заходи щодо санітарії розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм і правил ДСанПІН «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечних факторів виробничого середовища важкості та напруженості трудового процесу».

До санітарно-гігієнічних умов відноситься:

- мікрокліматичні умови та їх забезпечення (яка t° в кабінеті)
- освітленість робочої зони;
- рівень шуму в робочій зоні;
- виробнича вібрація;
- електромагнітні поля та їх випромінювання згідно ДСанПІН;
- іонізуюче випромінювання та іонізуючий спектр

поля(випромінювання від моніторів)

- вимоги щодо моніторів;
- вимоги до приміщень
- вимоги до обладнання та організація робочих місць;
- важкість та напруженість праці;
- вимоги до режиму праці та відпочинку;
- вимоги до медичних оглядів.

Роботи в приміщеннях лабораторії належать до категорії Іб – легка робота, тому встановлені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

- у холодний період року: температура 21-23°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

- у теплий період року: температура 22-24°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

В проекті передбачено: устрій системи водяного опалення приміщення

для забезпечення необхідної температури повітря в холодний період року відповідно ДБН В.2.5-67-2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Для забезпечення необхідного повітрообміну в теплий період року передбачено влаштування штучної механічної загально-обмінної вентиляції відповідно до ГОСТ 12.4.021-75 "ССБТ. Системи вентиляційні. Загальні вимоги".

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» в офісних приміщеннях використовується природне та штучне освітлення. Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, використовуються сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі або штори.

Штучне освітлення в приміщенні здійснено системою загального рівномірного освітлення. Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити 300-500 лк. Визначимо число та потужність світильників для забезпечення заданого значення освітленості. Розрахунок проводиться методом світлового потоку. Необхідно розрахувати систему загального рівномірного освітлення з люмінесцентними лампами для приміщення кабінету, в якому виконуються зорові роботи високої точності. Розміри приміщення: довжина $a = 12$ м, ширина $b = 10$ м, висота $H = 4,2$ м. Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $\rho_{ст} = 70\%$, $\rho_{с} = 50\%$,

$\rho_{п} = 30\%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,8$ м. Мінімальна освітленість приміщення, в якому проводять зорові роботи становить $E = 300$ лм. Як освітлювальні прилади приймаємо світильники типу ЛПО (з двома лампами), які доцільно використовувати в нашому випадку.

Розрахуємо кількість рядів світильників у приміщенні N_p :

$$N_p = \frac{B}{(H - h_p) \cdot [L/h]}, \text{ шт}; \quad (5.1)$$

де: B – ширина приміщення, м;

H – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні, м;

$[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника.

$$N_p = \frac{10}{(4,2-1)*1,4} = 3.$$

Визначимо максимально припустиму відстань між рядами світильників

L_{max} :

$$L_{max} = \frac{B}{N_p}, \text{ м}; \quad (5.2)$$

де: B – ширина приміщення, м;

N_p – кількість рядів світильників у приміщенні, шт.

$$L_{max} = \frac{10}{3} = 3,3 \text{ м.}$$

Розрахуємо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею h :

$$h = \frac{L_{max}}{[L/h]}, \text{ м}; \quad (5.3)$$

де: L_{max} – максимально припустима відстань між рядами світильників м;

$[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника.

$$h = \frac{3,3}{1,4} = 2,3.$$

Знайдемо висоту звисання світильника від стелі h_3 за формулою:

$$h_3 = H - h_p - h, \text{ м}; \quad (5.4)$$

де: H – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні, м;

h – висота підвісу світильника над робочою поверхнею, м.

$$h_3 = 4,2 - 0,8 - 2,3 = 1,1 \text{ м.}$$

Визначимо значення індексу приміщення i , що характеризує співвідношення розмірів освітлювального приміщення і висоти розміщення світильників:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}; \quad (5.5)$$

де: A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

h – висота підвісу світильника над робочою поверхнею, м.

$$i = \frac{12 \cdot 10}{50,6} = 2,3.$$

Визначимо сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному приміщенні Φ_Σ :

$$\Phi_\Sigma = \frac{E_H \cdot A \cdot B \cdot k_s \cdot z}{\eta}, \text{ лм}; \quad (5.6)$$

де: E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

k_z – коефіцієнт запасу;

$z = 1,1$ – для люмінісцентних ламп низького тиску;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

$$\Phi_a = \frac{300 \cdot 12 \cdot 10 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,6} = 99000 \text{ лм.}$$

Визначимо умовну загальну кількість світильників у приміщенні N_{cv}^* :

$$N_{cv}^* = \frac{A \cdot B}{L_{\max}^2}, \text{ шт.}; \quad (5.7)$$

де: A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

L_{\max} – максимально припустима відстань між рядами світильників, м.

$$N_{cv}^* = \frac{120}{10,89} = 11 = 12 \text{ шт.}$$

Розрахуємо світловий потік умовного джерела світла Φ_l^* :

$$\Phi_l^* = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N_x}, \text{ лм.}; \quad (5.8)$$

де: Φ_{Σ} – сумарний світловий потік освітлювальної установки, лм;

* $N_{л}$ – загальна кількість ламп у світильнику, яка розраховується за формулою:

$$N_{л}^* = N_{св}^* \cdot n, \text{ шт}, \quad (5.9)$$

де: n – кількість ламп у світильнику

$$N_{л}^* = 12 \cdot 4 = 48 \text{ шт.}$$

$$\Phi_{л}^* = \frac{99000}{96} = 1031,25 \text{ Лм.}$$

Вибираємо тип стандартної лампи з найближчим значенням фактичного світлового потоку лампи $\Phi_{л}$ і знайти коефіцієнт m (співвідношення між розрахунковим світловим потоком лампи * $\Phi_{л}$ та фактичним світловим потоком вибраної стандартної лампи $\Phi_{л}$):

$$m = \frac{\Phi_{л}^*}{\Phi_{л}}. \quad (5.10)$$

$$m = \frac{1031,25}{1500} = 0,68 = 1$$

Визначимо оптимальну (фактичну) кількість світильників у приміщенні $N_{св}$:

$$N_{св} = N_{св}^* \cdot m, \text{ шт}; \quad (5.11)$$

$$N_{св} = 12 \cdot 1 = 12 \text{ шт.}$$

Визначимо фактичну кількість ламп у приміщенні $N_{л}$:

$$N_{л} = N_{св} \cdot n, \text{ шт}; \quad (5.12)$$

де: $N_{св}$ – оптимальна (фактична) кількість світильників у приміщенні, шт;
 n – кількість ламп у світильнику, шт.

$$N_{л} = 12 * 4 = 48 \text{ шт.}$$

Визначимо загальну розрахункову освітленість E_p у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп:

$$E_p = \frac{\Phi_{л} \cdot N_{л} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot k_3 \cdot z}, \text{ лк}; \quad (5.13)$$

де: $\Phi_{л}$ – фактичний світловий потік вибраної стандартної лампи, лм;

$N_{л}$ – фактична кількість ламп у приміщенні, шт;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

k_3 – коефіцієнт запасу;

z – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості.

$$E_p = \frac{1500 * 48 * 0,6}{10 * 12 * 1,5 * 1,1} = 218,18 \text{ лк.}$$

Розрахуємо загальну потужність освітлювальної установки P_{Σ} :

$$P_{\Sigma} = N_{\lambda} \cdot P_{\lambda}, \text{ Вт}; \quad (5.14)$$

де: N_{λ} - фактична кількість ламп у приміщенні, шт;

P_{λ} - потужність вибраної стандартної лампи (додаток В), Вт.

$$P_{\Sigma} = 48 \cdot 30 = 1440 \text{ Вт.}$$

Далі я виконала ескіз розташування світильників над робочою поверхнею на плані приміщення, враховуючи розмір світильника -0,9м (рис.5.1.).

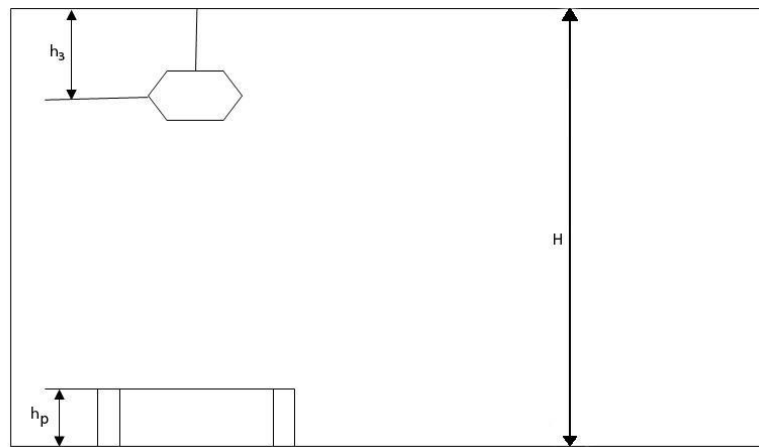


Рисунок 5.1 – Ескіз розташування світильників над робочою поверхнею

Щоб виконати ескіз розміщення світильників, повинні виконуватись умови :

$$L_A = \frac{A}{N_{\text{св}} / N_p}, \text{ м}; \quad (5.15)$$

$$L_A = \frac{12}{4} = 3 \text{ м.}$$

$$l_A = L_A / 2, \text{ м}; \quad (5.16)$$

$$l_A = 3 / 2 = 1,5 \text{ м.}$$

$$L_B = B / N_p, \text{ м}; \quad (5.17)$$

$$L_B = 10 / 3 = 3,33 \text{ м.}$$

$$; l_B = L_B / 2, \text{ м.} \quad (5.18)$$

$$l_B = 3,33 / 2 = 1,6 \text{ м.}$$

Ескіз представлений на рис.5.2.

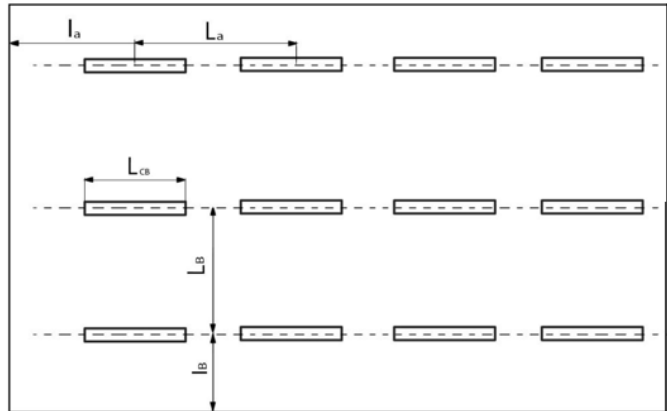


Рисунок 5.2 - Розміщення світильників ЛПО у приміщенні

5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

5.4.1 Заходи з пожежної безпеки

Розробку заходів з пожежної безпеки починають з аналізу речовин і матеріалів, що використовуються при роботі на об'єкті, з метою визначення класу можливої пожежі (А, В, С, D, F) згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» та категорії його пожежної небезпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою».

Комплекс протипожежних заходів для виробничого приміщення (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в

Україні» та та НАПБ В.01.056-2013/111 «Правила будови електроустановок. Пожежна безпека електроустановок. Інструкція».

Обчислювальний центр, згідно ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» відноситься до категорії «П-Па», а клас можливої пожежі, згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)», визначається як «А».

У разі виникнення пожежі у конструкторського бюро обладнаному ПК з ВДТ для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері. Згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания», відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Обладнання, силові та освітленні мережі конструкторського бюро обладнаного ПК з ВДТ відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», та мають ступінь захисту ізоляції обладнання IP44 яка відповідає класу пожежо небезпечної зони П-Па до якої належить приміщення.

З технічних та організаційних заходів запобігання пожеж в конструкторського бюро обладнаному ПК з ВДТ передбачені наступні протипожежні заходи. На силовому обладнанні, силових та освітлювальних колах, згідно вимог пункту 3.1 «ПУЕ», встановлені захисні пристрої, що вимикають джерело живлення від ділянки електричного кола, у якій виникло коротке замикання.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні конструкторського бюро обладнаному ПК з ВДТ встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВК6». Яка забезпечує виявлення

теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Оскільки приміщення конструкторського бюро яке обладнане ПК з ВДТ має площу 39 м², відповідно до вимог п. 3.8 розділу «Типові норми належності вогнегасників» ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 2 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м² площі приміщення). Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

Розробка заходів з пожежної безпеки полягає у визначенні порядку дій, що спрямовані на збереження обладнання, матеріальних ресурсів в умовах виникнення загорянь, організації ліквідації осередків загорянь, евакуації персоналу, забезпечення можливої участі у попередженні пожежі спеціалізованих пожежних підрозділів, мінімізації збитків виробництва.

зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою».

5.4.2 Заходи з цивільного захисту

Для реалізації системних заходів для модернізації та вдосконалення управління системою цивільного захисту прийнято низку важливих нормативно-правових актів України. Базовим документом, що забезпечив оптимізацію законодавства у сфері цивільного захисту і заклав нормативну базу для створення єдиної державної системи цивільного захисту, став прийнятий Верховною Радою України Кодекс цивільного захисту України, який затверджено Указом Президента України від 02 жовтня 2012 року № 5403-VI та введено в дію з 01 липня 2013 року.

Цивільний захист – це функція держави, яка спрямована на захист населення, територій, та майна від надзвичайних ситуацій шляхом запобігання таких ситуацій, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний

час та в особливий період. Цивільний захист забезпечується з урахуванням особливостей, визначених Законом України «Про основи національної безпеки України», суб'єктами, уповноваженими захищати населення, території, навколишнє природне середовище і майно, Кодексом цивільного захисту – у мирний час, а також в особливий період – у межах реалізації заходів держави щодо оборони України.

Основні принципи забезпечення цивільного захисту:

- гарантування та забезпечення державою конституційних прав громадян на захист здоров'я, життя, та власності;
- комплексного підходу до вирішення завдань цивільного захисту;
- пріоритетності завдань, спрямованих на рятування життя та збереження здоров'я громадян;
- централізації управління, єдиноначальності, підпорядкованості, статутної дисципліни оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, аварійно-рятувальних служб;
- гласності, прозорості, вільного отримання та поширення публічної інформації про стан цивільного захисту, крім обмежень, встановлених законом;
- добровільності – у разі залучення громадян до здійснення заходів цивільного захисту, пов'язаних з ризиком для їхнього життя і здоров'я;
- відповідальності посадових осіб органів державної влади та органів місцевого самоврядування за дотримання вимог законодавства з питань цивільного захисту;
- виправданого ризику та відповідальності керівників сил цивільного захисту за забезпечення безпеки під час проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

Основні завдання сил цивільного захисту:

- проведення робіт та вжиття заходів щодо запобігання надзвичайним ситуаціям, захисту населення і територій від них;
- проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт;

- гасіння пожеж;

- ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій в умовах екстремальних температур, задимленості, загазованості, загрози вибухів, обвалів, зсувів, затоплень, радіоактивного, хімічного забруднення та біологічного зараження, інших небезпечних проявів;

- проведення піротехнічних робіт, пов'язаних із знешкодженням вибухонебезпечних предметів, що залишилися на території України після воєн, сучасних боєприпасів та підричних засобів (крім вибухових пристроїв, що використовуються у терористичних цілях), крім територій, які надані для розміщення і постійної діяльності військових частин, військових навчальних закладів, підприємств та організацій Збройних Сил України, інших військових формувань;

- проведення вибухових робіт для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій та ліквідації їх наслідків;

- проведення робіт щодо життєзабезпечення постраждалих;

- надання екстреної медичної допомоги постраждалим у районі надзвичайної ситуації і транспортування їх до закладів охорони здоров'я;

- здійснення перевезень матеріально-технічних засобів, призначених для проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та надання гуманітарної допомоги постраждалим внаслідок таких ситуацій;

- надання допомоги іноземним державам щодо проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;

- проведення аварійно-рятувального обслуговування суб'єктів господарювання та окремих територій, на яких існує небезпека виникнення надзвичайних ситуацій.

Сили цивільного захисту можуть залучатися до проведення відновлювальних робіт.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було проаналізовано особливості проектування відгалужувачів як елементів мікросмужкових пристроїв. Було проведено огляд існуючих структур мікросмужкових відгалужувачів. Результати, в порівнянні з даними із статей, виявилися близькими, що свідчить про правильність запропонованої методики моделювання.

Змодельовано 4 види відгалужувачів: відгалужувач на зв'язаних лініях, відгалужувач пилкоподібної форми, та 2 відгалужувача що описуються синусоїдами.

За результатами проведеного моделювання даних топологій мікросмужкових відгалужувачів можна зробити наступні висновки:

- пилкоподібна топологія надає результат, близький до традиційної конструкції відгалужувачів на зв'язаних лініях. Це обумовлюється незмінним значенням відстані між зв'язаними лініями. Метод компенсації різниці фазових швидкостей в парному і непарному режимах в мікросмужкових зв'язаних лініях за допомогою введення пилкоподібної геометрії дозволяє досягти високої спрямованості в широкій смузі частот, не використовуючи додаткові зосереджені компоненти, що значно спрощує проектування і виготовлення спрямованих відгалужувачів. Вірність методу підтверджена електродинамічним моделюванням мікрополоскової структури.

- топологія на мікросмужкових лініях, що описується синусоїдами (варіант 1) забезпечує відгалужувачу можливість зміни центральної частоти при виборі відповідних значень коефіцієнтів, що може використовуватись для синтезу мікросмужкових відгалужувачів за обраними частотними характеристиками, при цьому довжина ділянки зв'язаних нерегулярних ліній залишається незмінною.

- топологія на мікросмужкових лініях, що описується синусоїдами (варіант 2), демонструє незадовільні характеристики, що пояснюється постійною зміною

відстані між ділянками зв'язаних ліній. Найкращі результати були отримані при малій зміні амплітуди синусоїди, проте в такому разі більш доцільно використовувати традиційні топології для мікросмужкових відгалужувачів, оскільки забезпечувати постійну ширину мікросмужкової лінії простіше з точки зору технологічних процесів.

На нашу думку, продовження досліджень щодо використання нерегулярних ліній у топології мікросмужкових відгалужувачів найбільш доцільно проводити подальшим аналізом топологій із синусоїдальними зв'язаними лініями при постійній відстані між ними.

Проведено аналіз програмного забезпечення, що використовувалося в магістерській роботі. За допомогою системи електродинамічного моделювання і проектування Ansoft HFSS було спроектовано конструкції відгалужувачів нерегулярних ліній та проаналізовано їх АЧХ.

Наведено економічне обґрунтування магістерської роботи. Запропоновано заходи з охорони праці при проведенні проектних робіт по викладеним в роботі методикам проектування мікросмужкових пристроїв НВЧ діапазону.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Частотно – селективные устройства для систем радиолокации, радионавигации и связи / А.С. Волошин, Я.Ф. Бальва, А.М. Сержантов. – ИРЭ НАН, Красноярск. 2008 – 20 с.
2. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, том 1 / Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.: Пер с англ. Под общ. ред. Алексеева Л.В. и Кушнира Ф.В. – М.: “Связь”, 1971. – 439 с.
3. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем / М.З. Згуровский, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук и др.: В 2 т.– К.: ИВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003 - Т.2:Устройства передающего и приёмного трактов. Проектирование устройств и реализация систем.– 616 с.
4. <https://jak.koshachek.com/articles/mikropoloskovaja-linija-ce.html>
5. https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/6786/1/Micro_elka1_Bond.pdf
4. Фильтры и цепи СВЧ. Пер. с англ. Л.В. Алексеева, А.Е. Знаменского, В.С. Полякова М, “Связь”, 1976. – 248 с.
5. Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев. Миниатюрный фильтр с двумя полосами пропускания на микрополосковых двухмодовых резонаторах// Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып. 18. С.31-40
6. Д.Н. Клименко, Б.И. Иванов. Компактный микрополосковый фильтр с повышенной селективностью на плавно-нерегулярных линиях передачи// Ползуновский вестник №2/2 2011. – 285-289с.
7. А. Косолапов, “Материалы фирм Taconic и Neltec для СВЧ - устройств”, Компоненты и технологии №7, 2005.
8. Банков С.Е., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 250 с.
9. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 256 с.

- 10 Економіка підприємства: Підручник /За за. ред. С.Ф.Покропивного. - Вид. 2-ге, перероб. та доп. - К.: КНЕУ, 2000. - 528 с.
11. Конспект лекцій з дисципліни „Основи охорони праці”/ Укл. О.М. Савчук. – Запоріжжя: ЗДТУ, 2000. – 140 с.
12. Кобевник В. Ф. Охрана труда. – К.: Высшая школа, 1990. – 287 с.
13. Перевощикова В.Я. Аварийно-спасательные и другие неотложные работы. Основы организации и технологии ведения АСДНР с участием нештатных аварийно-спасательных формирований. – М.: Институт риска и Цивільна оборона. Підручник. - К.: Знання, 2007. - 430 с.
14. Шоботов В.М. Цивільна оборона: Навчальний посібник: Вид. 2-ге, перероб. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. - 438 с.
15. Порядочний Л.В., Заплатинський В.М. Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільна оборона: навчальний посібник. - К.: 2003 - 301 с.