

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет (навчально-науковий інститут) радіофізики,  
біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра прикладної електродинаміки

До захисту допущено кафедрою  
прикладної електродинаміки  
протокол № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_  
в.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Вадим ПЛАХТІЙ  
(підпис) (ім'я, прізвище)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_р.

Кваліфікаційна робота  
здобувача \_\_\_\_\_ другого (магістерського) \_\_\_\_\_ рівня вищої освіти  
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОСМУЖКОВОГО СМУГОВОГО  
ФІЛЬТРА ДЛЯ L ТА C-ДІАПАЗОНІВ  
\_\_\_\_\_ (назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) \_\_\_\_\_ 105 Прикладна фізика та наноматеріали  
(код та найменування спеціальності; спеціалізації спеціальності - за наявності)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Радіофізика і електроніка  
(назва освітньої програми)

Виконавець \_\_\_\_\_ Денис Регурецький  
(підпис) (ім'я, прізвище)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ Вадим Плахтій  
(підпис) (ім'я, прізвище)

**РЕФЕРАТ**

Дипломний проєкт містить 30 рисунків, 43 сторінки, 18 бібліографічних посилань.

У роботі проведено дослідження характеристик мікросмужкових смугових фільтрів, призначених для роботи в L- та С-діапазонах частот. За допомогою програмного калькулятора Marki Microwave були визначені початкові параметри резонаторів та коефіцієнтів зв'язку, після чого в середовищі Ansys HFSS побудовані та змодельовані тривимірні електромагнітні моделі фільтрів.

Розглянуто особливості мікросмужкових структур, вплив діелектричних параметрів підкладки та геометрії резонаторів на смугу пропускання, втрати та крутість амплітудно-частотної характеристики. Виконано порівняння теоретичних розрахунків із результатами числового моделювання.

У роботі продемонстровано методику проєктування мікросмужкових фільтрів, а також наведено результати симуляцій S-параметрів, включно з оцінкою S11, S21, групової затримки та добротності резонансних секцій. Отримані результати підтверджують можливість реалізації високоселективних фільтрів у L- та С-діапазонах із використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання.

**МІКРОСМУЖКОВИЙ ФІЛЬТР, СМУГОВИЙ ФІЛЬТР, L-ДІАПАЗОН, С-ДІАПАЗОН, S-ПАРАМЕТРИ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

## **ABSTRACT**

The diploma project contains 30 figures, 43 pages, and 18 bibliographic references.

This work presents a study of the characteristics of microstrip bandpass filters designed for operation in the L and C frequency bands. Initial resonator parameters and coupling coefficients were determined using the Marki Microwave filter design calculator, after which three-dimensional electromagnetic models were constructed and simulated in Ansys HFSS.

The research examines the features of microstrip structures and evaluates how dielectric substrate parameters and resonator geometry influence the passband width, insertion loss, and selectivity of the frequency response. Theoretical calculations were compared with numerical simulation results.

The work demonstrates a complete methodology for designing microstrip filters and provides simulation results for S-parameters, including an analysis of S11, S21, group delay, and resonator quality factors. The obtained results confirm the feasibility of implementing highly selective filters in the L and C bands using modern computer-aided electromagnetic modeling tools.

**MICROSTRIP FILTER, BANDPASS FILTER, L-BAND, C-BAND, S-PARAMETERS, ELECTROMAGNETIC SIMULATION**

## ЗМІСТ

1. Вступ .....	5
Теоретичні основи мікросмужкових фільтрів.....	5
2. Мікросмужкові смугові фільтри С діапазону .....	10
2.1 Фільтр на частоту 5,8 ГГц.....	11
2.2 Фільтр на частоту 6,6 ГГц.....	20
2.3 Фільтр на частоту 4 ГГц.....	24
3. Мікросмужковий смуговий фільтр L-діапазону .....	29
3.1 Оцінка матеріальних параметрів текстоліту FR-4 для цільового діапазону частот.....	29
3.2. Розрахунок та модулювання фільтру з центральною частотою 1 ГГц.....	30
4. Висновки .....	35
ЛІТЕРАТУРА.....	37
Додаток 1.....	39
Додаток 2.....	41

## 1. ВСТУП

Мікросмужкові смугові фільтри відіграють ключову роль у сучасних радіотехнічних системах, оскільки забезпечують формування спектра сигналів, виділення корисних частот та подавлення небажаних завад. Їх популярність зумовлена поєднанням компактності, технологічної простоти та можливості інтеграції з іншими мікрохвильовими компонентами на друкованих платах. У літературі зазначається, що мікросмужкові фільтри стали стандартним елементом у структурі радіопередавачів, приймачів та антенних модулів у широкому частотному діапазоні [1].

L-діапазон (1–2 ГГц) широко застосовується у навігаційних системах, мобільному зв'язку та телеметрії, тоді як C-діапазон (4–8 ГГц) є основою для радіолокації, супутникових каналів передавання даних та ширококутових радіорелейних ліній. Через значні вимоги до лінійності, стабільності та низьких втрат у цих діапазонах особливо важливим є аналіз характеристик мікросмужкових фільтрів. Зростання вимог до пропускної здатності та енергоефективності систем робить дослідження таких фільтрів актуальним завданням сучасної радіофізики й телекомунікацій [2].

### **Теоретичні основи мікросмужкових фільтрів**

#### **Мікросмужкові лінії**

Мікросмужкова лінія — це різновид планарного хвилеводу, де сигнал поширюється уздовж металізованої доріжки, розташованої на діелектричній підкладці з поверненим металевим екраном знизу. Особливістю такого типу ліній є неоднорідний розподіл електромагнітного поля: частково в діелектрику,

частково у повітрі. Тому широко використовується поняття **ефективної діелектричної проникності**, яка визначає фазову швидкість та хвильовий імпеданс лінії [3]. У більшості моделей також враховують частотну дисперсію, що стає суттєвою при роботі на частотах вище 3–4 ГГц.

Хвильовий опір мікросмужкової лінії залежить від ширини провідника, товщини підкладки та її діелектричних параметрів. Правильний розрахунок геометрії лінії є критичним для досягнення необхідних характеристик фільтра, адже від нього залежить як узгодження зі 50-омним трактом, так і поведінка резонаторних секцій.

## Типи смугових фільтрів

У літературі розглядається широкий спектр топологій смугових фільтрів. Одними з найбільш поширених є фільтри на  **$\lambda/2$ -резонаторах**, де довжина резонуючої секції визначає центральну частоту фільтра. Такі структури прості у виготовленні, однак займають відносно велику площу.

**$\lambda/4$ -резонатори** дозволяють зменшити габарити й забезпечують гнучкі можливості реалізації інверсного чи прямого зв'язку між сусідніми секціями. Часто застосовуються конфігурації з **паралельним або послідовним резонансом**, що дає змогу досягати різкої характеристики переходу між смугою пропускання та загородження.

Також значну увагу приділено **кільцевим резонаторам**, які формують компактні та високочастотні фільтри завдяки замкненому контуру струму. Такі структури дозволяють реалізувати додаткові нулі передачі, що покращує селективність [4].

## Основні параметри фільтрів

Для опису характеристик мікросмушкових фільтрів застосовуються **S-параметри**, зокрема S21 (коефіцієнт передачі) та S11 (коефіцієнт відбиття). За ними оцінюють широкий спектр параметрів:

- **добротність резонаторів**, що визначає гостроту резонансу;
- **ширина смуги пропускання** (3-дБ або інша нормована);
- **втрати у смугі пропускання**, що залежать як від діелектричних, так і від провідникових втрат;
- **крутість скатів**, ключовий показник селективності;
- **групова затримка**, що визначає фазові властивості фільтра й важлива для систем із передачею широкосмугових сигналів.

Ці параметри формують сукупність критеріїв, за якими оцінюють якість розробки фільтра [5].

## Огляд матеріалів та технологій виготовлення

### Підкладки

Найпоширенішим матеріалом для друкованих плат є **FR-4**, однак через значні діелектричні втрати він обмежено застосовується у діапазоні понад 3–4 ГГц. На частотах 5–8 ГГц параметри  $\epsilon_r$  та  $\tan\delta$  можуть змінюватися, що впливає на стабільність характеристик фільтруючих структур.

Для високочастотних застосувань переважно використовують матеріали **Rogers RO4003**, **RT/duroid 6002**, **RT/duroid 6006** та інші, що забезпечують низький тангенс діелектричних втрат і стабільні параметри в мікрохвильовій

області [6], [7]. Такі підкладки дозволяють реалізувати фільтри з вищою добротністю та передбачуваними характеристиками.

### **Металізація та вплив шорсткості міді**

У високочастотних структурах провідникові втрати суттєво зростають через **ефект скін-шару**, який обмежує ефективну площу, де протікає струм. Дослідження показують, що шорсткість мідної поверхні може призводити до додаткових втрат через збільшення ефективного шляху струмів, особливо у С-діапазоні [8]. Використання гладкіших фольгованих матеріалів або спеціальних методів металізації дозволяє зменшити ці втрати.

### **Методи синтезу та моделювання мікросмужкових фільтрів**

#### **Класичні методи синтезу**

Проектування смугових фільтрів часто базується на класичних поліномах Чебишова, Баттерворта або еліптичних функціях, що визначають частотну характеристику та рівень нерівномірності в смузі пропускання. Табличні значення нормованих елементів дають змогу розрахувати початкові значення коефіцієнтів зв'язку та добротності резонаторів [9]. Далі проводиться перехід до мікросмужкової реалізації шляхом визначення фізичних довжин та ширин резонаторів.

## Числове моделювання

Для аналізу та оптимізації фільтрів широко застосовуються програмні комплекси **CST Studio Suite**, **ANSYS HFSS**, **ADS/Ansys Designer**, які дозволяють моделювати електромагнітні поля у 2.5D та 3D постановках. Методи скінченних елементів, скінченних різниць у часі та метод моментів забезпечують можливість врахування складних неоднорідностей, паразитних зв'язків та технологічних особливостей конструкції [10].

## Алгоритми оптимізації

Оптимізація є невід'ємним етапом доведення фільтра до необхідних характеристик. У сучасних роботах активно застосовують **генетичні алгоритми**, методи **градієнтного спуску**, технології **розвідкової оптимізації** та інші еволюційні методи. Їх застосування дозволяє автоматично підбирати геометричні параметри резонаторів, щоб досягти цільових S-параметрів при мінімальних втратах і відповідній смузі [11].

## 2. МІКРОСМУЖКОВІ СМУГОВІ ФІЛЬТРИ С ДІАПАЗОНУ

В усій роботі було використано один і той же тип мікросмужкового фільтру, а саме interdigital фільтр. Його основні геометричні параметри наведені на рисунку нижче. А саме  $W_0$  – ширина ліній вводу/виводу електромагнітної енергії,  $W$  – ширина резонаторів,  $L$  – ширина резонаторів,  $e$  – подовження довжини крайнього лівого та крайнього правого резонаторів,  $t$  – точка підключення вхідних та вихідних ліній живлення,  $S_k$  – відстань між  $k$ -м та  $(k+1)$ -м резонаторами, причому резонатори нумеруються зліва направо, починаючи з 1.

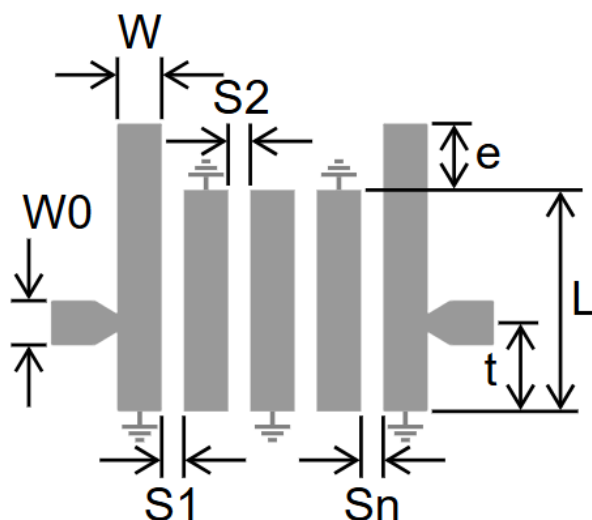


Рис. 1 – Будова та умовні позначення основних геометричних параметрів мікросмужкового смугового фільтру типу interdigital

Для розрахунку приблизних параметрів фільтру гребінчастого типу було використано онлайн ресурс Marki microwave filter design tool [4].

## 2.1 Фільтр на частоту 5,8 ГГц

Для цього діапазону частот частіше всього згадують просто частоту 5,8 ГГц, проте насправді за стандартом IEEE 802.11ac завжди мають на увазі широкий діапазон частот, а саме від 5160 до 5825 МГц [17]. Саме для цього застосування буде запропонований мікросмужковий фільтр на цей діапазон частот. Як і в попередньому розділі цієї роботи, спочатку буде використаний онлайн калькулятор від Marki Microwave [13], а далі отримані геометричні параметри будуть перевірені за допомогою студентської версії електродинамічного симулятора ANSYS HFSS [14].

Попередньо розраховані геометричні параметри фільтру:

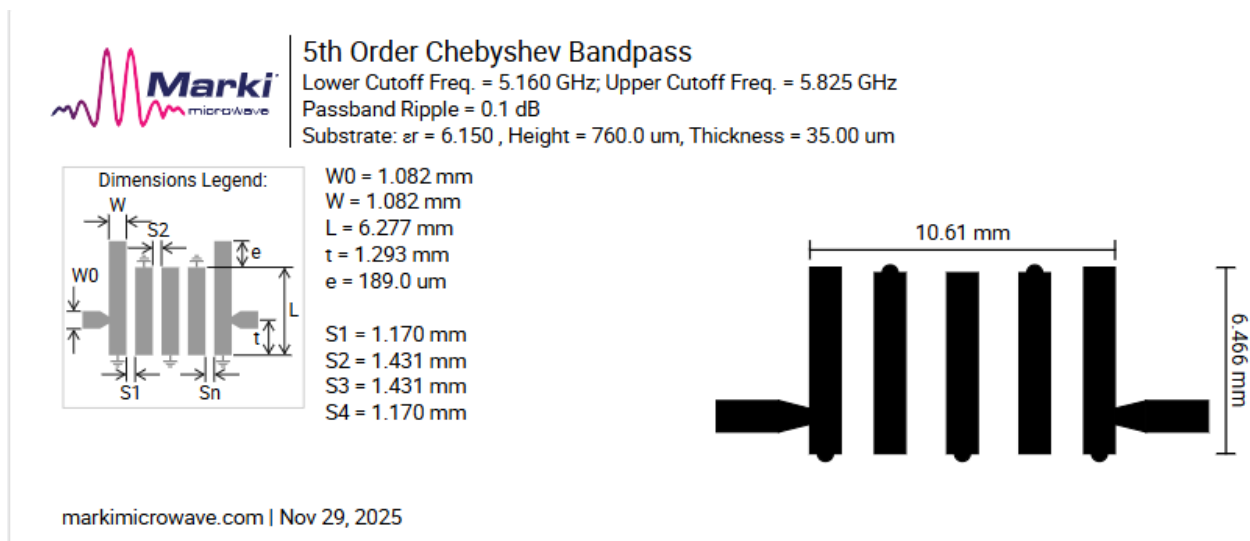


Рисунок 2 – Результат розрахунку фільтру за допомогою калькулятора Marki Microwave для частот від 5160 до 5825 МГц

В цьому випадку і для наведених нижче фільтрів було використано текстоліт Rogers RT/duroid 6006 (tm),  $\epsilon = 6.15$ ,  $\tan\delta = 0.0019$ , висота діелектричка 0,76 мм, товщина металевого шару 35 мкм [18].

Частотні залежності параметрів  $S_{12}$  та  $S_{11}$  прораховані за допомогою калькулятора Marki Microwave

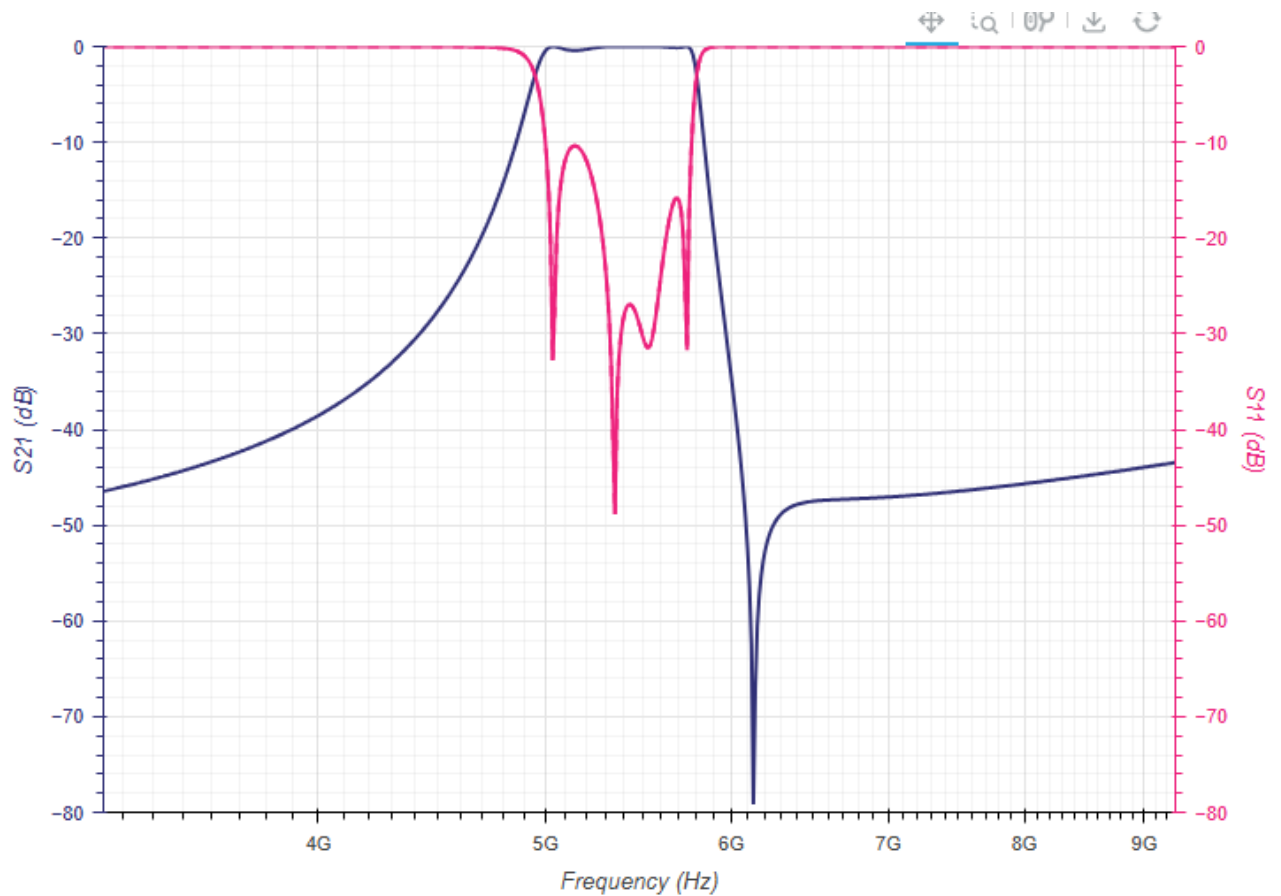


Рисунок 3 - Частотні залежності параметрів  $S_{21}$  та  $S_{11}$  для фільтру для частот від 5160 до 5825 МГц, розраховані калькулятором Marki Microwave.

На основі геометричних параметрів, які були отримані вище, побудована модель в симуляторі HFSS. Вона повністю параметризована для фільтру 5-го порядку, щоб можна було швидко перераховувати на різні діапазони частот.

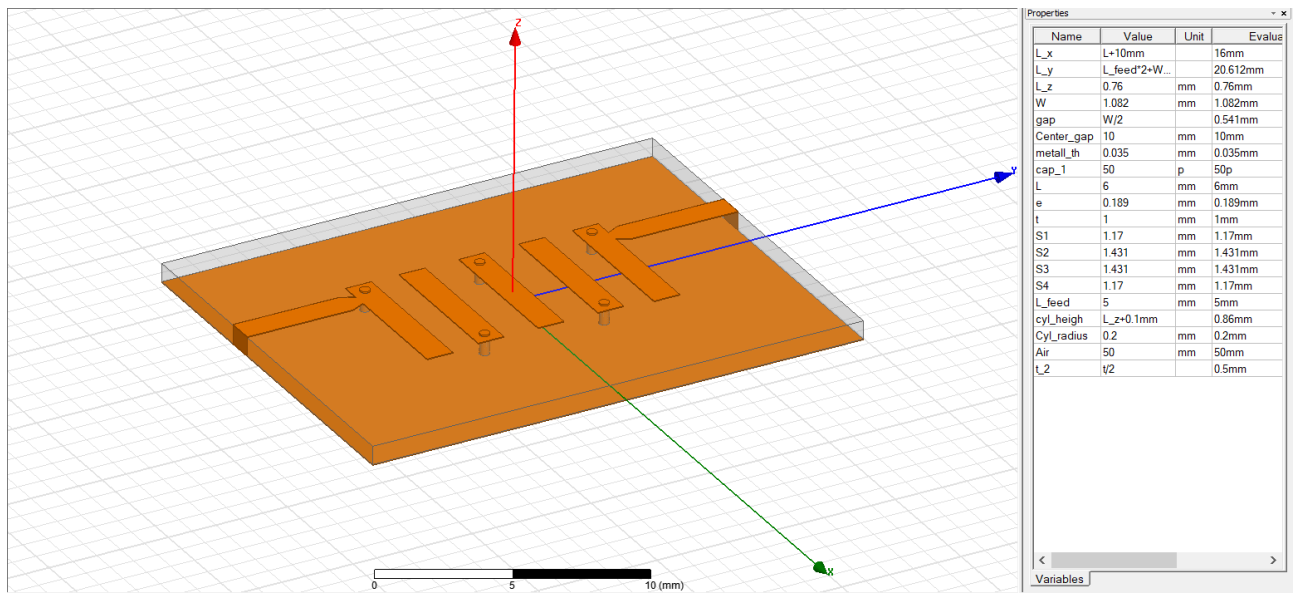


Рисунок 4 – Модель смугового фільтру від 5160 до 5825 МГц з вказаними основними геометричними параметрами в програмі ANSYS HFSS

та пораховані відповідні частотні залежності

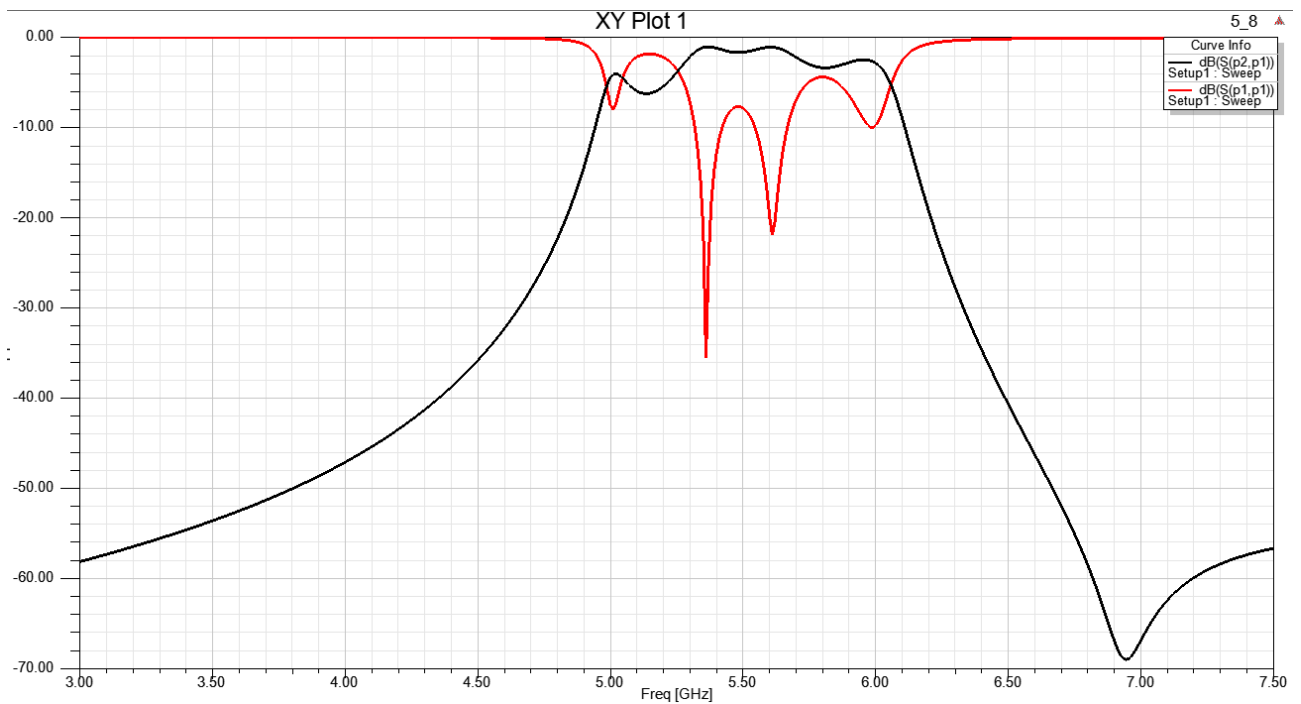


Рисунок 5 – Залежності параметрів  $S_{11}$  та  $S_{21}$  для смугового фільтру від 5160 до 5825 МГц пораховані за допомогою програми ANSYS HFSS

На частоті 5,4 ГГц в площині XY, яка перетинає посередині діелектричний шар текстоліту було побудований модуль комплексного електричного поля  $|E|(x, y, z)$ , який в програмі HFSS позначається як ComplexMagE. Він вимірюється в В/м, а на графіку нижче був представлений в логарифмічному масштабі. З малюнка, представленого нижче, можна бачити, як електрична компонента поля заходить в один порт і через правильно підібрані геометричні розміри мідних відрізків проходить на другий порт.

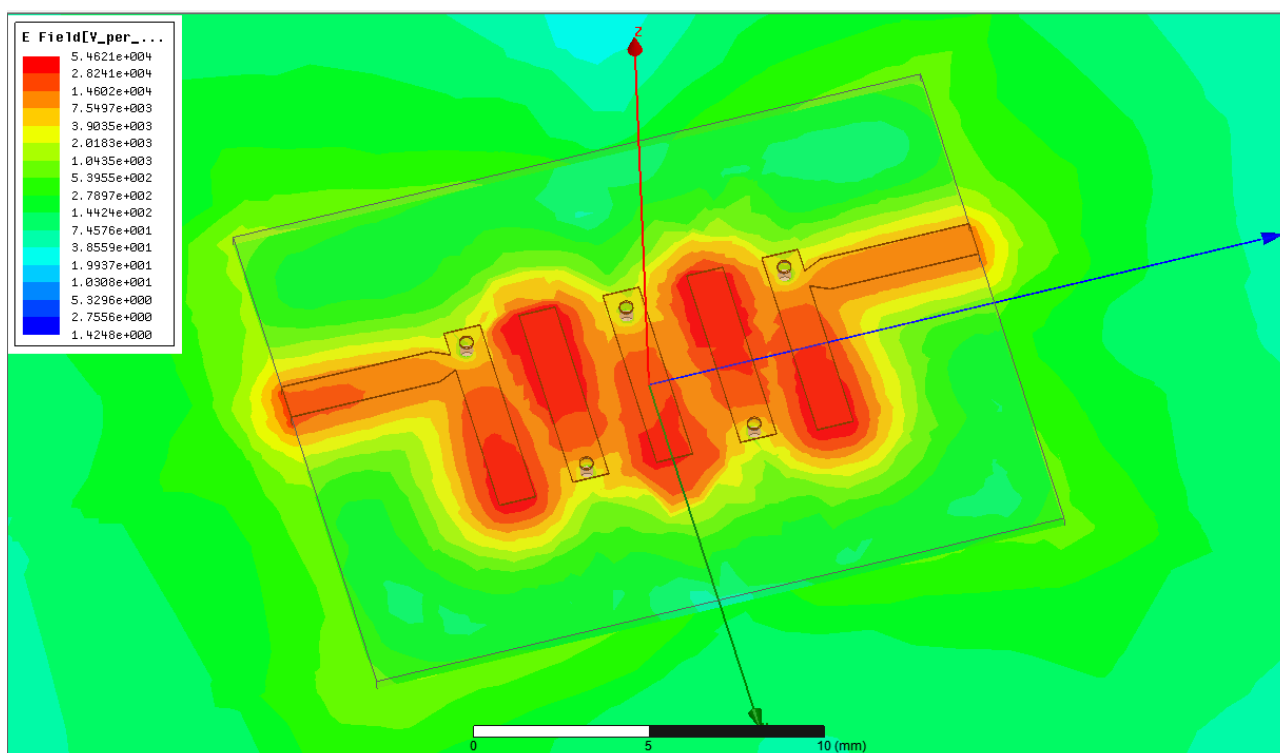


Рисунок 6 – Розподіл амплітуди електричної компоненти поля в фільтрі на частоті 5,4 ГГц.

ANSYS HFSS використовує сітковий метод FEM (Finite-Elemente-Method) [15]. Також детальніше з основними методами розрахунку електродинамічних структур можна ознайомитись в навчальному підручнику [16].

При розрахунку такої електродинамічної структури важливо згадати про точність розрахунку. Розглянемо це питання для вищезгаданого фільтру на

частоти діапазону 5 ГГц. Для методу FEM в програмі ANSYS HFSS коли модель повністю побудована в CAD системі, всі матеріали визначені, граничні умови додані, частотний діапазон вказаний, то симулятор починає розбивати всю розрахункову область на тетраедри і розраховує електродинамічну задачу перший раз, отримуючи значення матриці розсіювання S. В свою чергу, Delta S - це зміна величини S-параметрів між двома послідовними проходами. Якщо величина і фаза всіх S-параметрів змінюються на величину, меншу за значення «Максимальна дельта S за прохід» від однієї ітерації до наступної, адаптивний аналіз зупиняється. В іншому випадку він продовжується до завершення заданої кількості проходів. Наприклад для цієї задачі було визначено достатньою максимальну кількість “проходів” 15, а максимальне значення Delta S рівним 0,02.

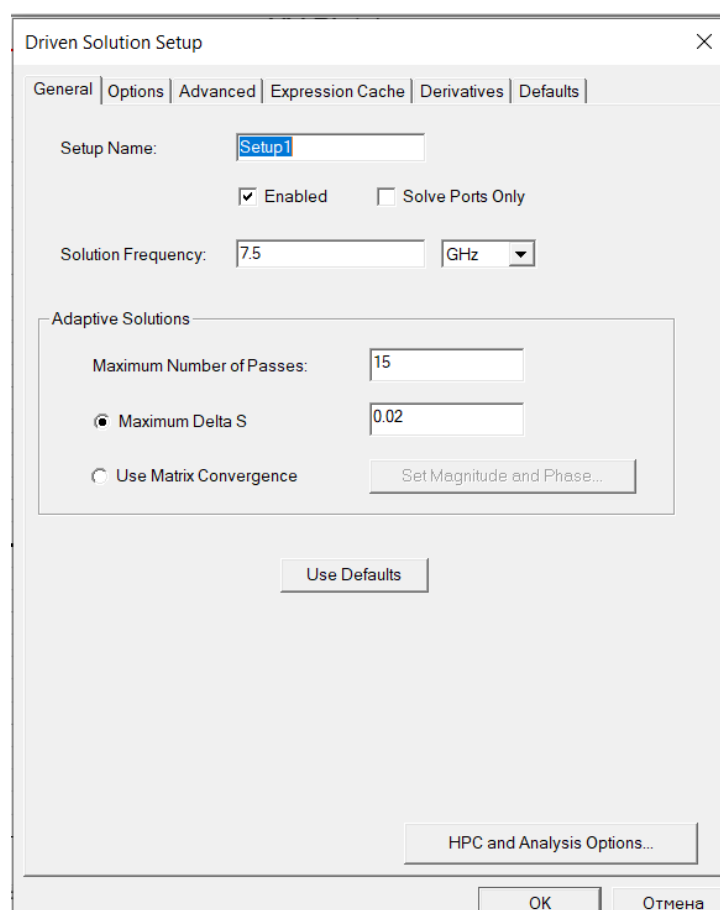


Рисунок 7 – Діалогове вікно програми ANSYS HFSS де налаштовується основні параметри розрахунку, а саме діапазон розрахованих частот та точність розрахунку

Як результат, під час розрахунку можна в реальному часі відслідковувати чи сходиться розв'язок.

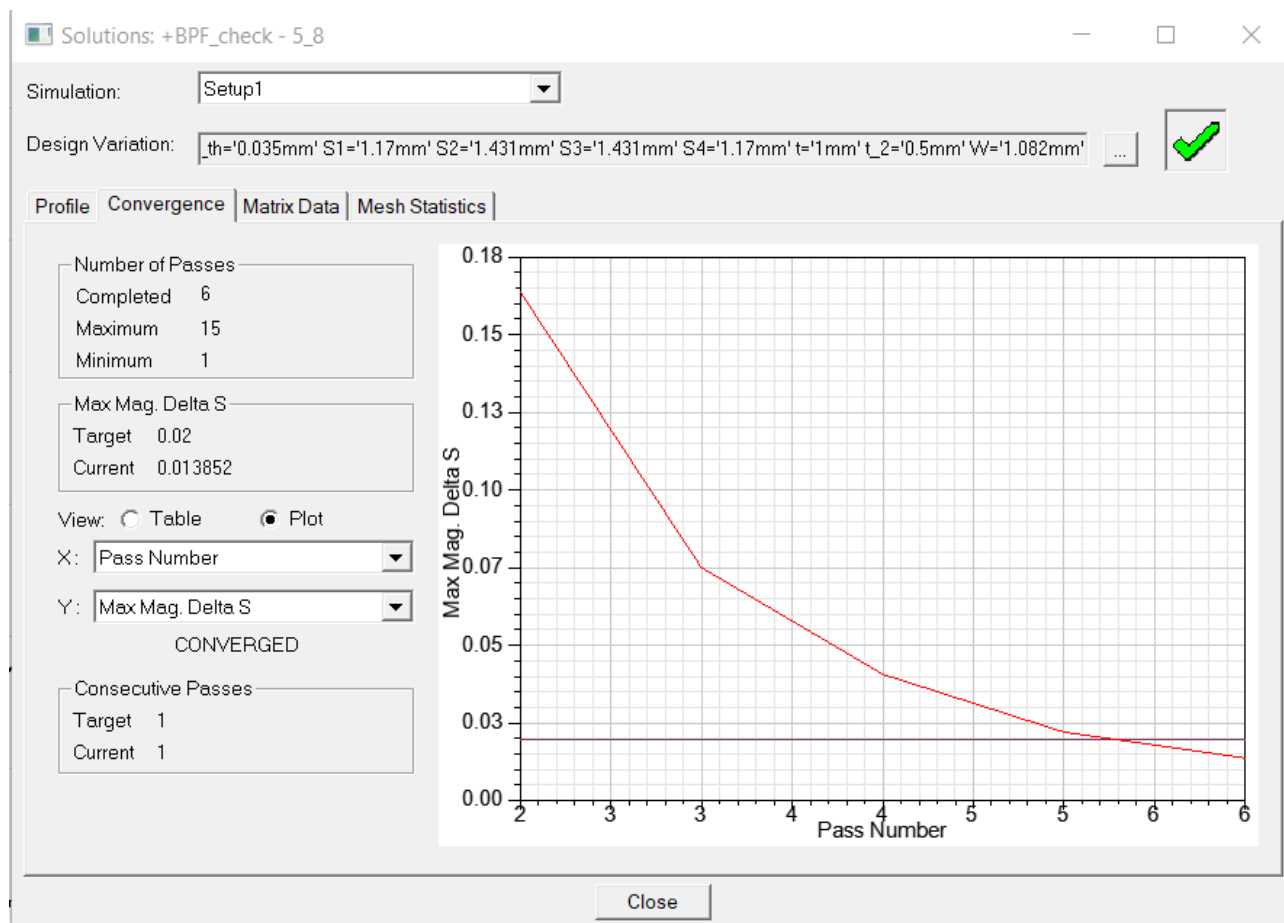


Рисунок 8 – Діалогове вікно програми ANSYS HFSS де зображена залежність параметру delta S від ітерації розрахунку

Після того, як система отримає ту структуру апроксимовану тетраедрами, яка має відповідний допустимі відхилення від попереднього проходу, на ній вже відбуваються розрахунки в усьому частотному діапазоні. Важливо відмітити, що весь процес адаптивного розрахунку і пошуку оптимальної апроксимації моделі здійснюється на частоті, яка або є максимальною частотою, на якій збираємось отримати результати, або вище, для цього прикладу це частота 7,5 ГГц. Від цього значення буде залежати яка буде використана довжина ребра тетраедра при адаптивному розрахунку.

Нижче можна побачити результат розбиття на тетраедри цільової структури

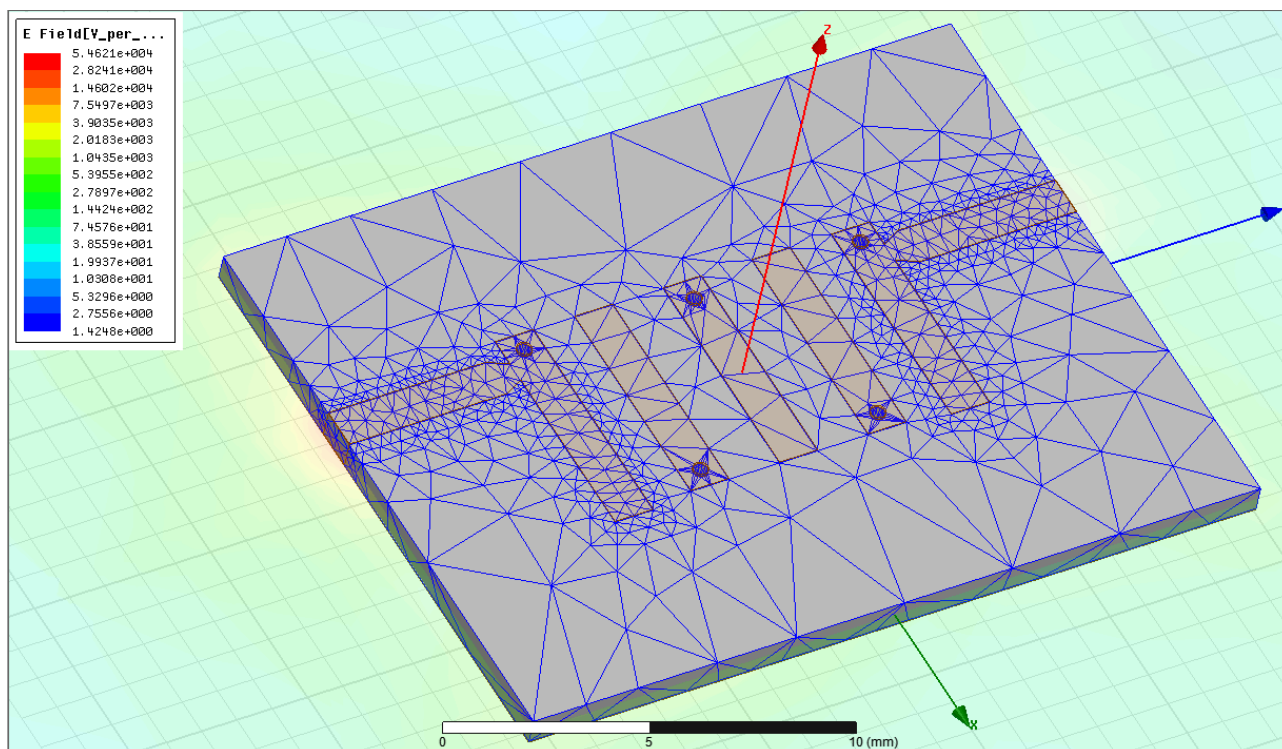


Рисунок 9 – Зображення результату розбиття на тетраедри досліджуваної структури яке було отримано на останній ітерації розрахунку, вид зверху

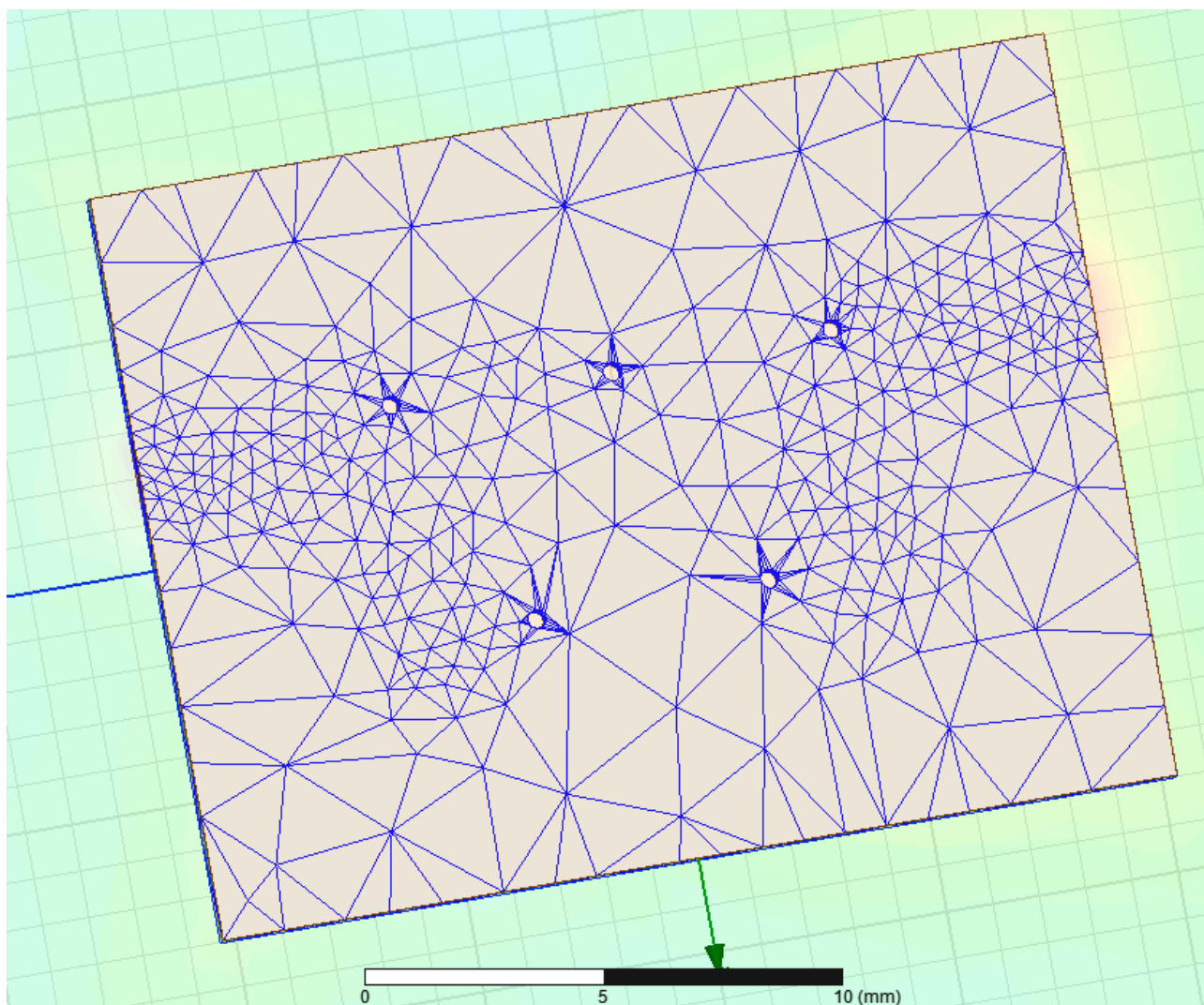


Рисунок 10 – Зображення результату розбиття на тетраедри досліджуваної структури яке було отримано на останній ітерації розрахунку, вид знизу

Видно, що для отримання достовірного результату тетраедри мають менший розмір, де сильніше змінюється електромагнітне поле, а саме де розташовані порти фільтру та перехідні мідні з'єднання, які з'єднують мікросмужки та великий земляний полігон знизу.

Також можна звернути увагу на статистику розбиття структури на тетраедри. В даному випадку повітряний паралелепіпед, який оточує всю структуру отримав 10 тисяч елементів, мідні деталі отримали близько 3,5 тисячі елементів та діелектричний шар, який лежить між мікросмужками та земляним полігоном внизу отримав близько 8 тисяч елементів.

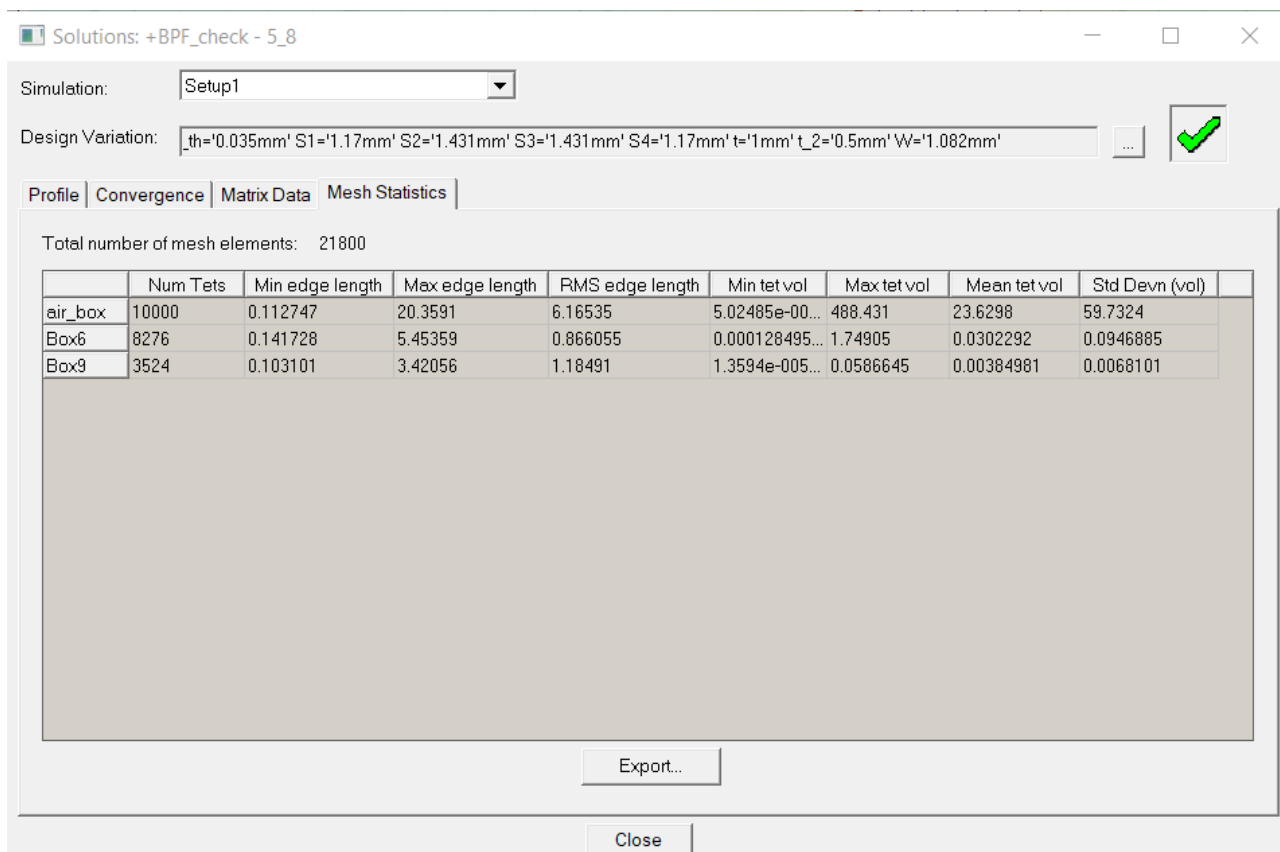


Рисунок 11 – Діалогове вікно програми ANSYS HFSS де зображена статистика розбиття досліджуваної структури на тетраедри

Порівняння параметрів  $S_{21}$ , отриманих за допомогою калькулятора Marki Microwave та ANSYS HFSS представлена на рисунку нижче. Обробка даних, отриманих від ресурсу Marki Microwave та ANSY HFSS була зроблена за допомогою програм написаних на мові Python, вони наведені в Додатку 1 та Додатку 2 відповідно. З результатів моделювання можна сказати, що результати майже повторюють один одного з деякими нюансами. А саме можна спостерігати те, що калькулятор Marki Microwave дає ідеальний параметр  $S_{21}$ , без втрат в робочій смузі частот, тоді як результати розрахунку за допомогою ANSY HFSS демонструє ширшу смугу робочих частот, проте рівномірність вв смузі не зберігається і помітні сильні втрати. Це пов'язано напряму з тим, що калькулятор Marki Microwave не враховує втрати в текстоліті, як відбувається збудження

системи на портах та те, що пристрій знаходиться в повітрі - як це зроблено враховується в ANSYS HFSS. Тому можемо бачити подібні відмінності.

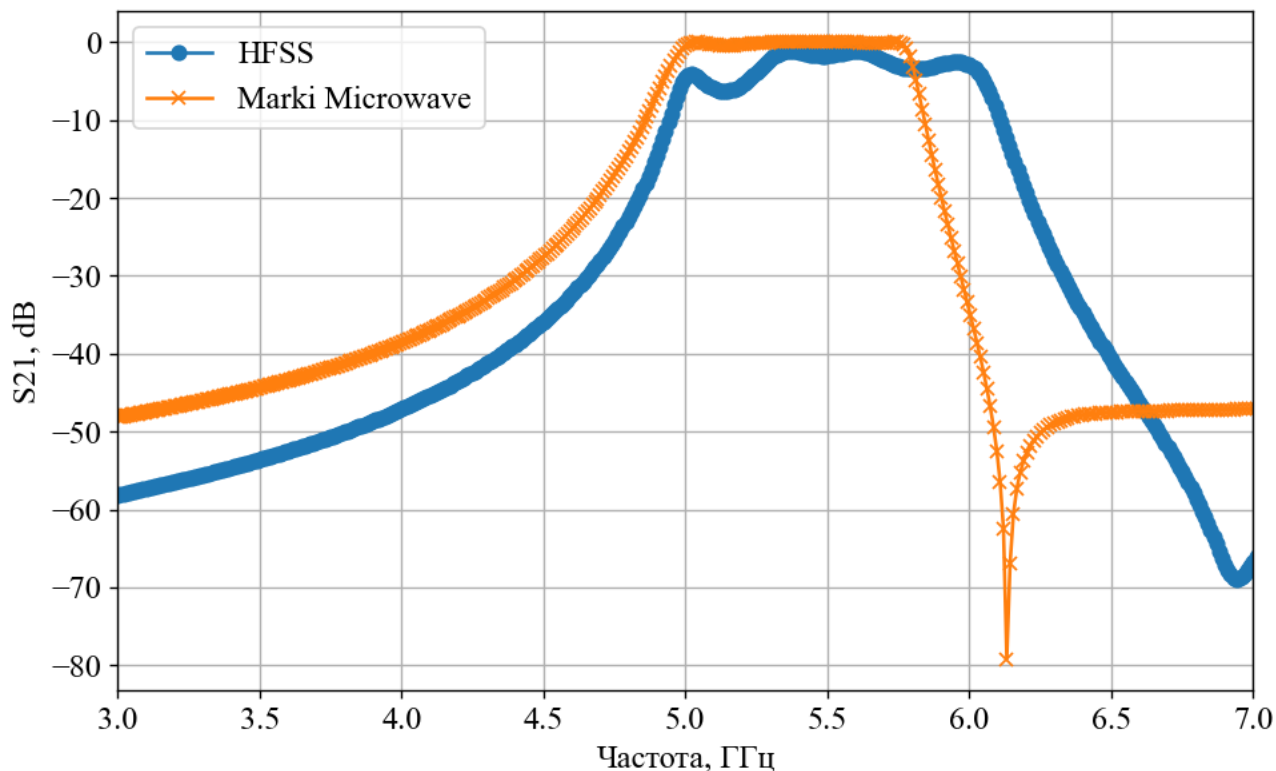


Рисунок 12 – Порівняння параметрів  $S_{21}$  для використаних симуляторів для випадку фільтра частот 5 ГГц.

## 2.2 Фільтр на частоту 6,6 ГГц

Для цього зразку теж був використаний текстоліт з наступними параметрами Rogers RT/duroid 6006 (tm),  $\epsilon = 6.15$ ,  $\tan\delta = 0.0019$ , висота діелектричка 0,76 мм, товщина металевого шару 35 мкм [18]. Задача розрахувати та перевірити мікросмушковий фільтр на діапазон частот 6,5-6,7 ГГц.

За допомогою калькулятора Marki Microwave отримуємо приблизні геометричні параметри фільтру.

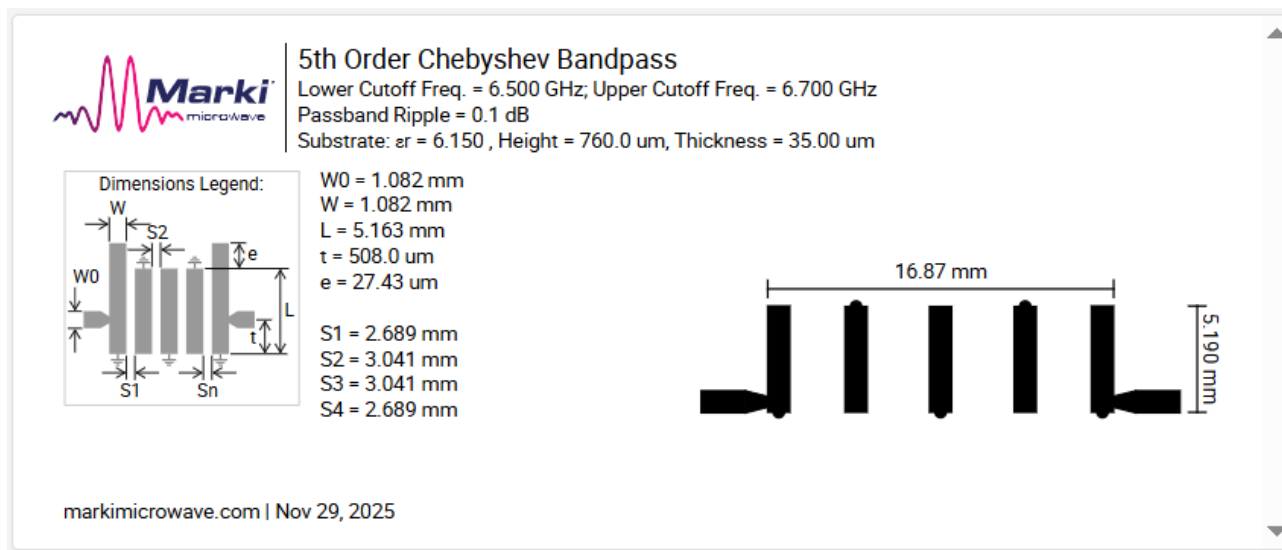


Рисунок 13 – Приблизні розміри фільтру на частоту 6,6 ГГц зі смугою робочих частот рівною 200 МГц.

Також калькулятор нам розраховує параметри матриці розсіювання  $S_{21}$  та  $S_{11}$ :

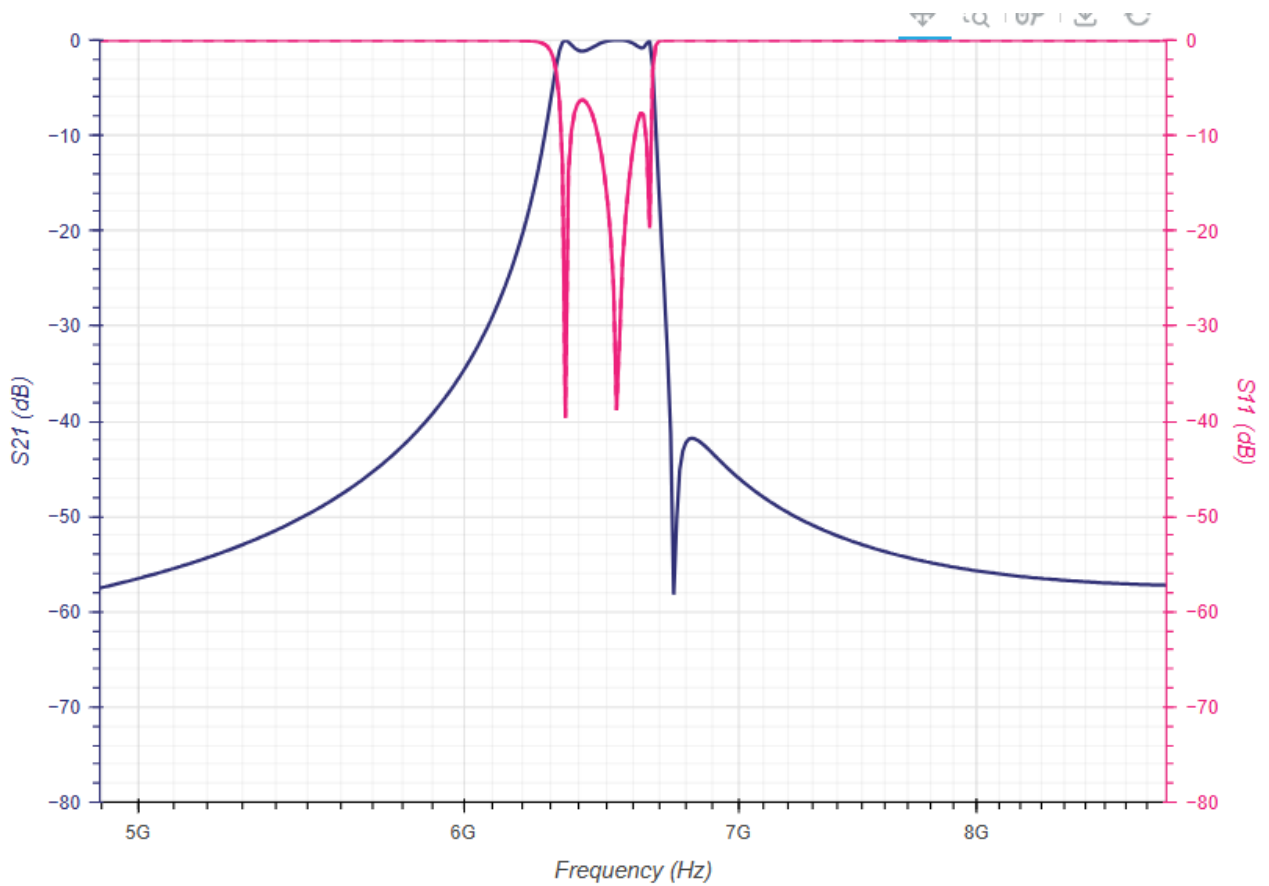


Рисунок 14 – Частотні залежності параметрів  $S_{21}$  та  $S_{11}$  для фільтру 6,6 ГГц розраховані калькулятором Marki Microwave.

На основі отриманих геометричних параметрів була розрахована модель в симуляторі ANSYS HFSS. Тут додатково наведений вид зверху моделі де можна помітити більш детальне розбиття на тетраедри при збільшенні робочі частоти з 5,8 ГГц до 6,6 ГГц, особливо біля граней мікросмужок.

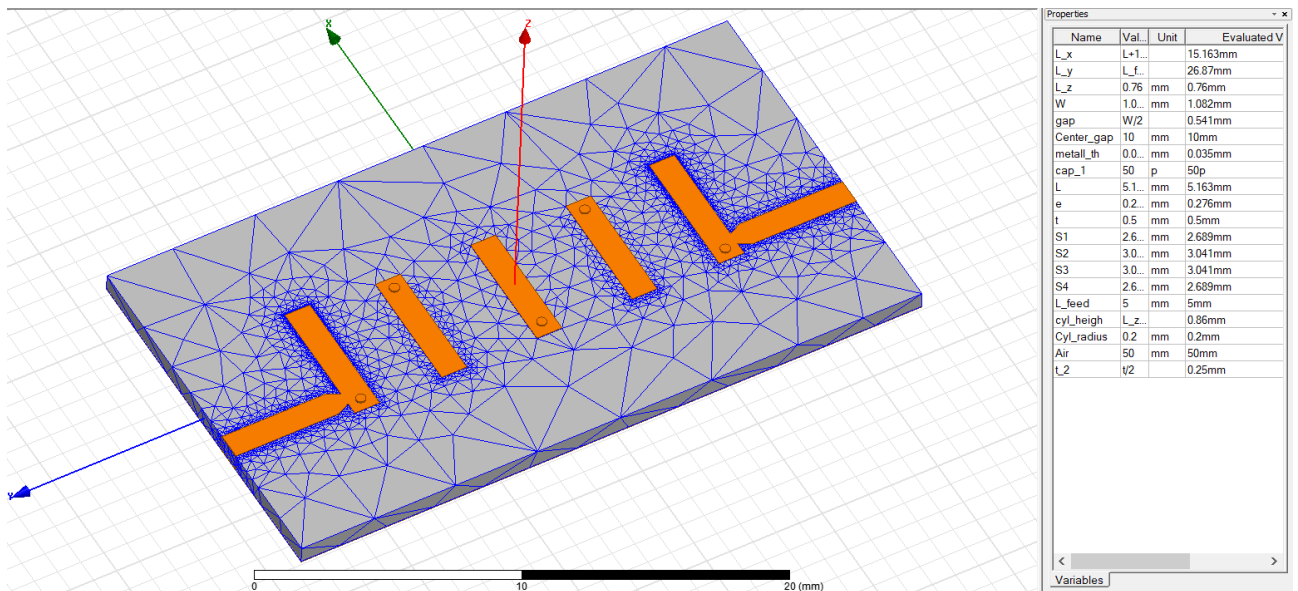


Рисунок 15 – Модель мікросмушкового фільтру на частоту 6,6 ГГц в симуляторі ANSYS HFSS.

Авжеж цікавіше всього поглянути на порівняння результатів моделювання. На рисунку наведеному нижче чітко видно, що на частотах вище 6 ГГц вже складніше повторити ідеалізований варіант частотної характеристики, яка отримується завдяки калькулятору Marki Microwave. Модель фільтру ANSYS HFSS враховуючи втрати та конструктивні мінімальні конструктивні особливості мікросмушкового фільтру показують відповідний результат. Проте цей результат можна авжеж покращити певними оптимізаційними заходами перед виготовленням прототипу.

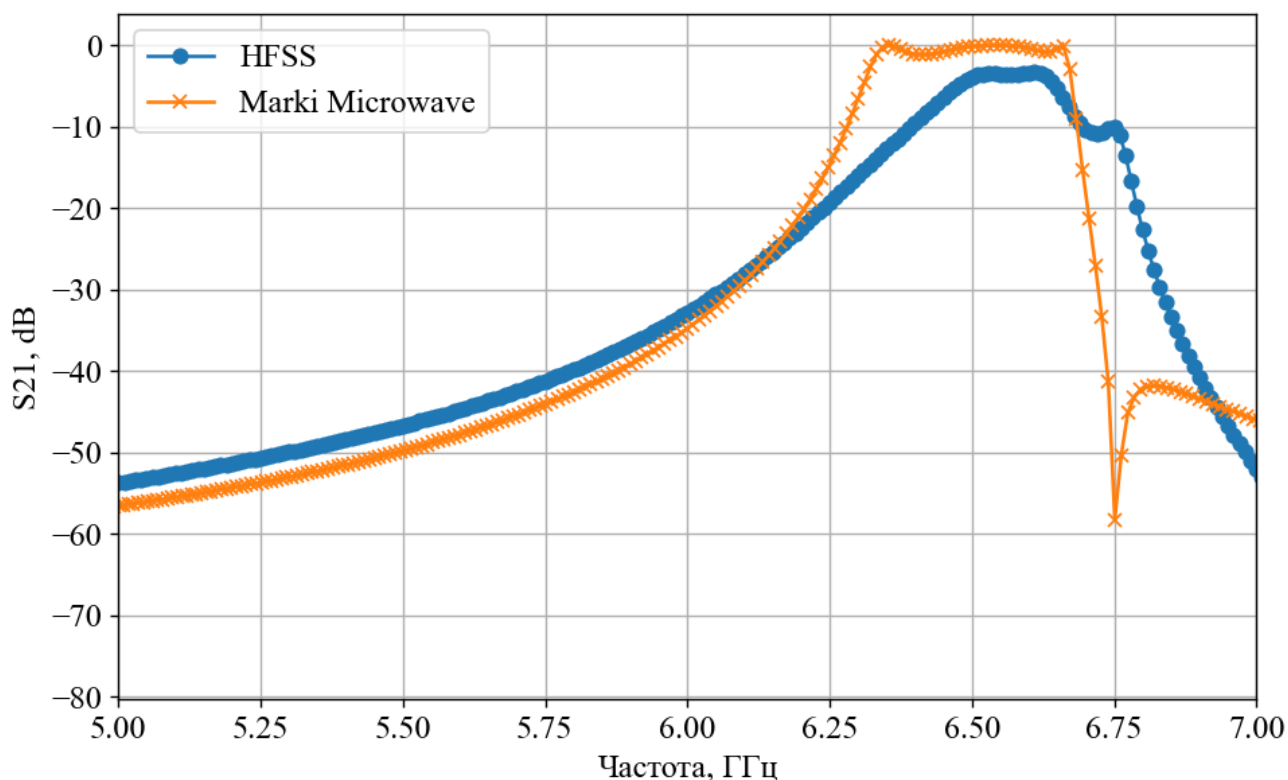


Рисунок 16 – Порівняння параметрів  $S_{21}$  для використаних симуляторів для випадку фільтру частот 6,6 ГГц.

### 2.3 Фільтр на частоту 4 ГГц

Для використання георадарних задач виникла потреба розрахувати фільтр з не широкою смугою пропускання, а саме центральною частотою 4 ГГц та робочим діапазоном частот близько 200 МГц. Маючи модель смугового мікросмушкового фільтру 5-го порядку, який був використаний в попередніх підрозділах. Матеріал той самий - Rogers RT/duroid 6006 (tm),  $\epsilon = 6.15$ ,  $\tan\delta = 0.0019$ , висота діелектричка 0,76 мм, товщина металевого шару 35 мкм.

Спочатку було прораховано розміри структури в калькуляторі Marki Microwave:

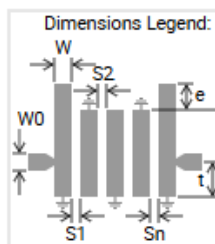


### 5th Order Chebyshev Bandpass

Lower Cutoff Freq. = 3.900 GHz; Upper Cutoff Freq. = 4.100 GHz

Passband Ripple = 0.1 dB

Substrate:  $\epsilon_r = 6.150$ , Height = 760.0  $\mu\text{m}$ , Thickness = 35.00  $\mu\text{m}$



$W0 = 1.082 \text{ mm}$

$W = 1.082 \text{ mm}$

$L = 8.700 \text{ mm}$

$t = 1.090 \text{ mm}$

$e = 84.97 \mu\text{m}$

$S1 = 2.085 \text{ mm}$

$S2 = 2.405 \text{ mm}$

$S3 = 2.405 \text{ mm}$

$S4 = 2.085 \text{ mm}$

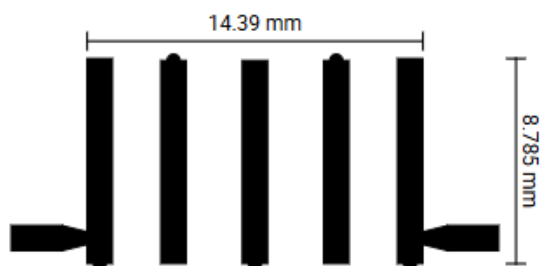


Рисунок 17 – Результат розрахунку фільтру за допомогою калькулятора Marki Microwave для частот від 3900 до 4100 МГц

Попередньо частотні характеристики є задовільними:

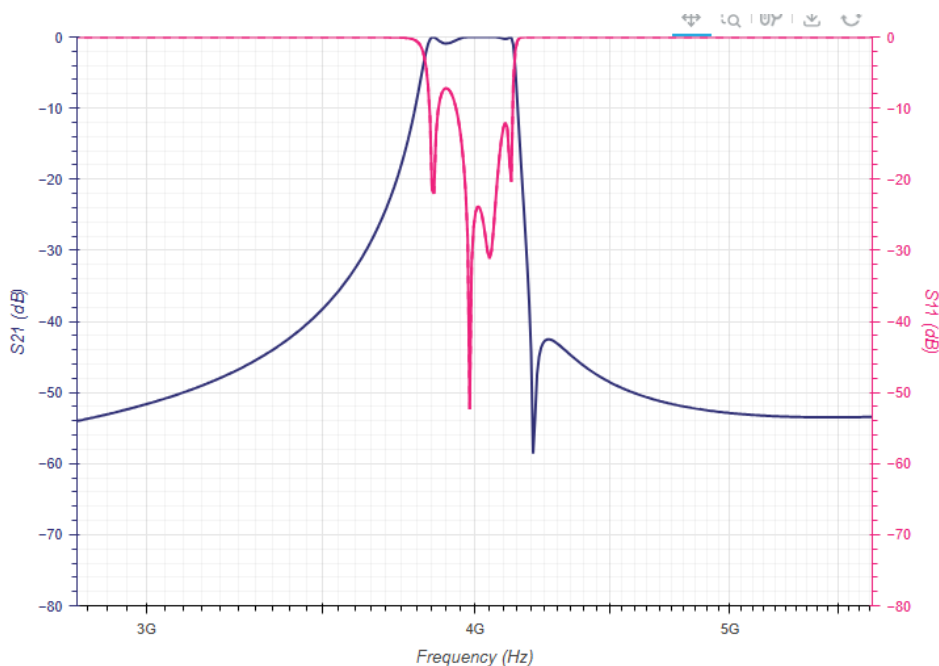


Рисунок 18 – Частотні залежності параметрів  $S_{21}$  та  $S_{11}$  для фільтру для частот від 3900 до 4100 МГц, розраховані калькулятором Marki Microwave

Далі враховуючи параметри вказані вище готуємо модель в ANSYS HFSS:

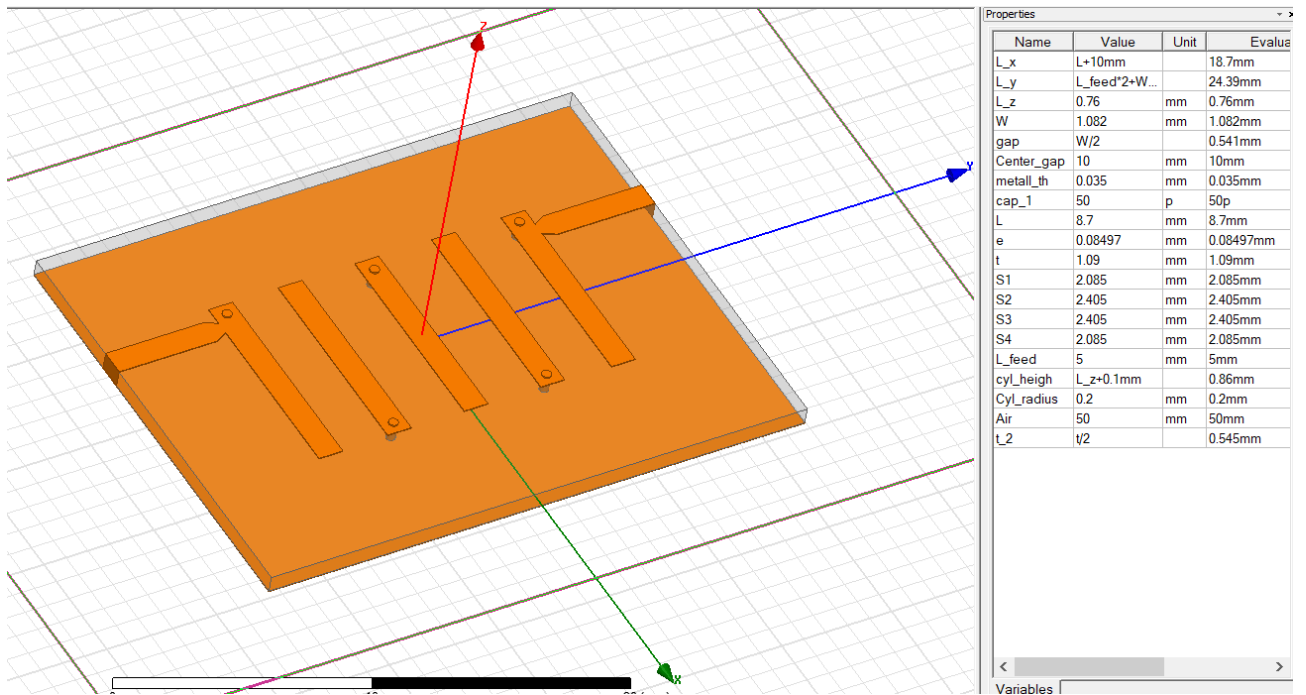


Рисунок 19 – Модель смугового фільтру від 3900 до 4100 МГц з вказаними основними геометричними параметрами в програмі ANSYS HFSS

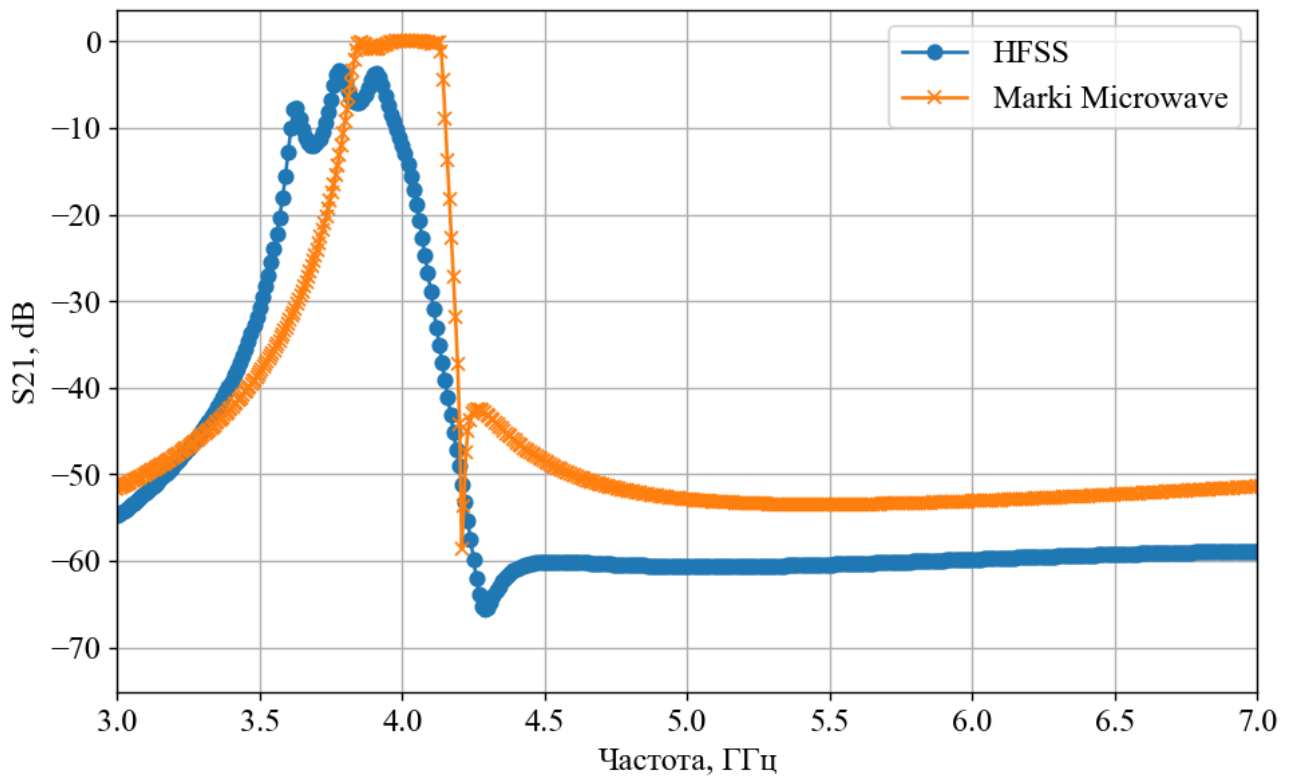


Рисунок 20 – Порівняння параметрів  $S_{21}$  для використаних симуляторів для випадку фільтру частот від 3900 до 4100 МГц

Врати на частоті 4 ГГц склали 12 дБ.

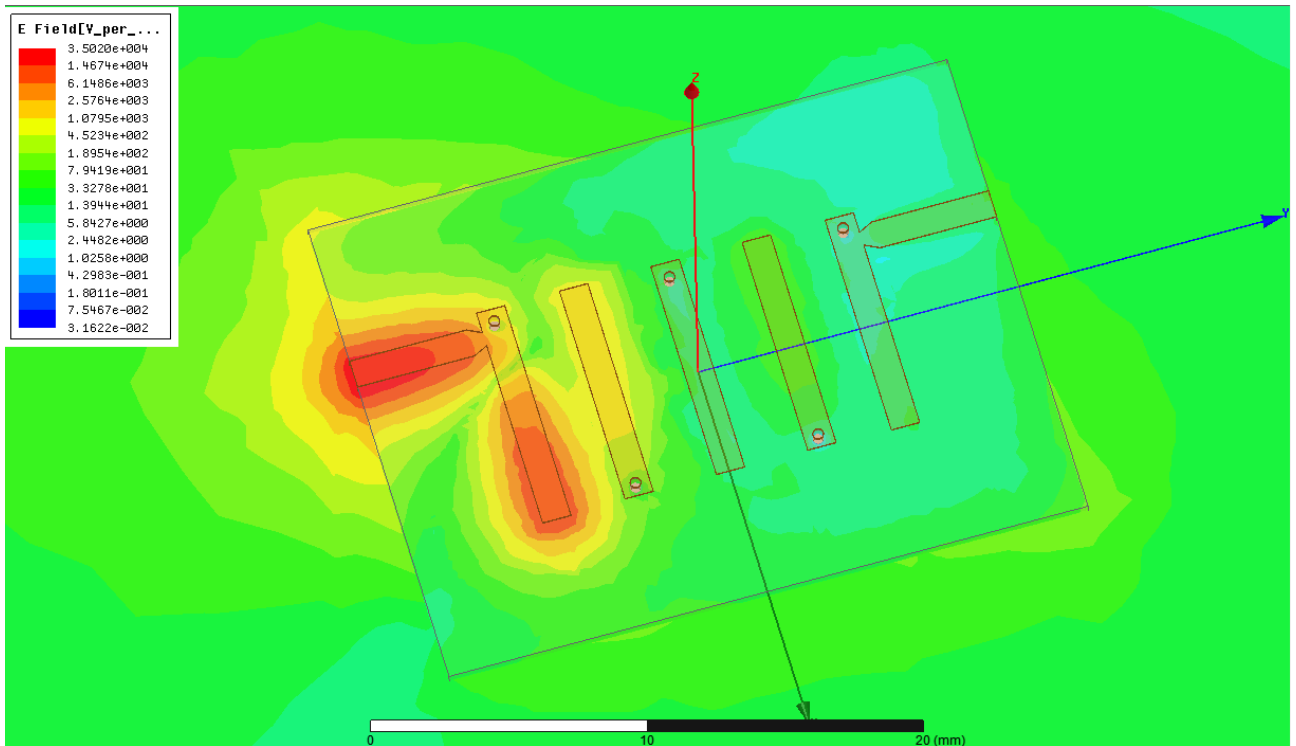


Рисунок 21 – Розподіл поля на частоті 4 ГГц

Пробуємо ще раз, проте збільшуємо смугу з 200 МГц до 1 ГГц:

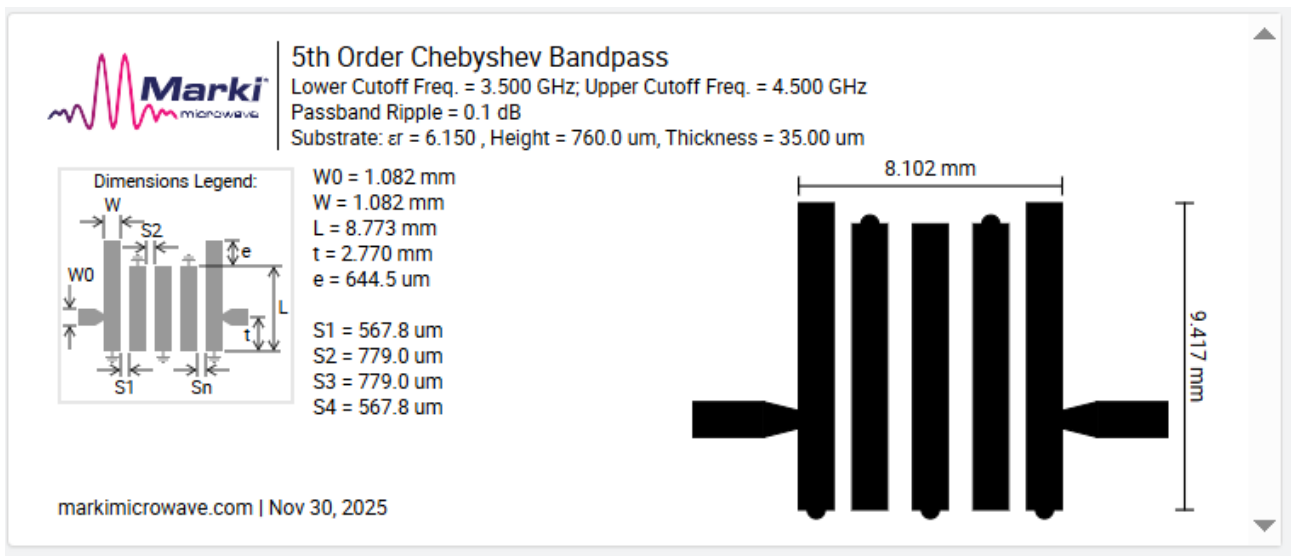


Рисунок 22 – Результат розрахунку фільтру за допомогою калькулятора Marki Microwave для частот від 3500 до 4500 МГц

Моделюємо в ANSYS HFSS враховуючи відповідні зміни і тепер маємо змогу порівняти параметри  $S_{21}$ . Тепер втрати на цільовій частоті 4 ГГц складає 1,8 дБ, що є прийнятним.

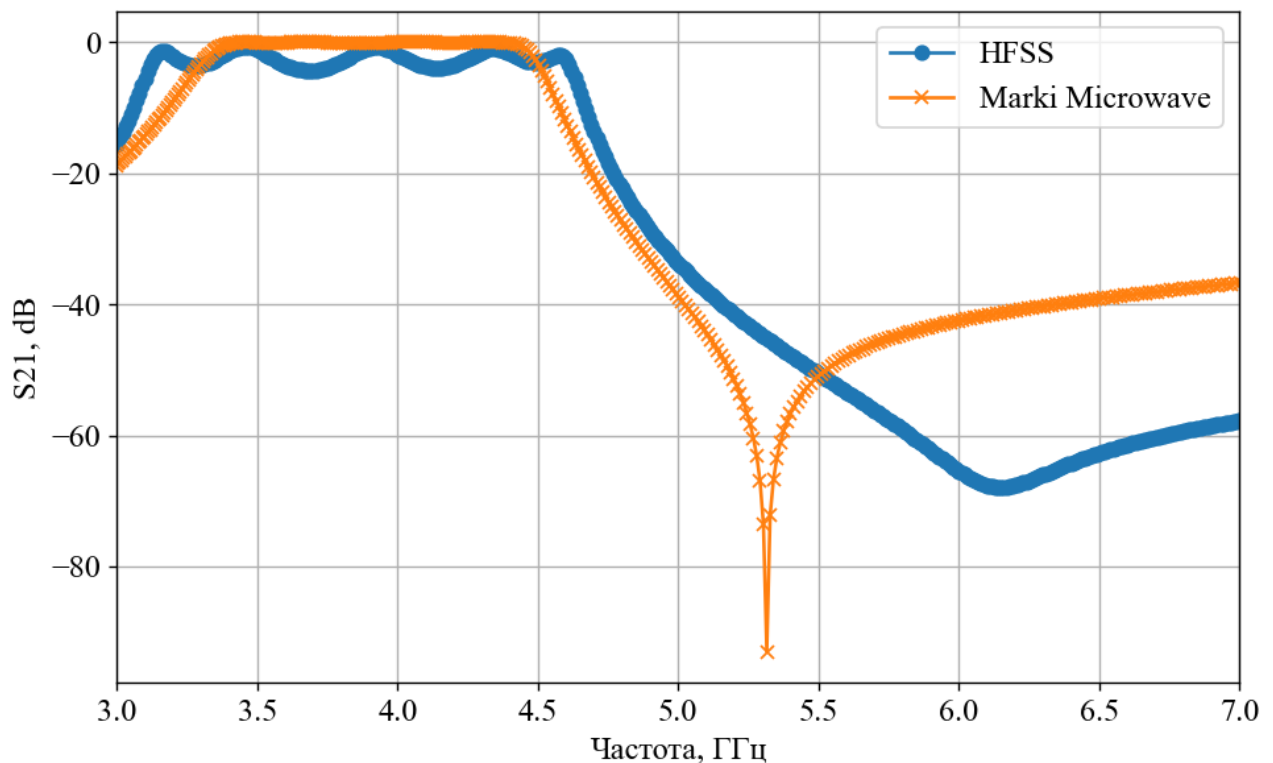


Рисунок 23 – Порівняння параметрів  $S_{21}$  для використаних симуляторів для випадку фільтру частот від 3500 до 4500 МГц.

З вищенаведених графіків можна зробити висновки, що для побудови вузькосмугового фільтру варто використовувати фільтри менших порядків, хоч і онлайн калькулятор Marki Microwave вказує, що все має бути добре. Проте поразивавши задачу в симуляторі ANSYS HFSS, враховуючи більш реалістичну модель, щонайменше врахувавши втрати в діелектрику стає видно, що такий підхід не є ефективним. Це насамперед пов'язано з добротністю кожного контуру в мікросмужковій структурі. Врахувавши втрати результуюча добротність кожного стала менша, і як наслідок частотна характеристика або розпадається, або зсувається від цільового значення.

### 3. МІКРОСМУЖКОВИЙ СМУГОВИЙ ФІЛЬТР L-ДІАПАЗОНУ

#### 3.1 Оцінка матеріальних параметрів текстоліту FR-4 для цільового діапазону частот.

Розділ присвячено розрахунку та моделюванню мікросмужкового фільтру гребінчастого фільтру на L частотний діапазон, а точніше з центральною частотою в 1 ГГц.

Для проектування мікросмужкових високочастотних пристроїв необхідно точно знати матеріальні параметри текстоліту, який планується використовувати. Одним із поширених і недорогих текстолітів є FR-4. Так, в роботі [3] демонструються методи вимірювання діелектричної проникності цього матеріалу за допомогою паралельно зв'язаних мікросмужкових резонаторів.

Результатом роботи [3] була отримана частотна залежність діелектричної проникності для текстоліту FR-4 від виробника NELCO:

$$\varepsilon_r(f) = 0.0002529 * f^3 - 0.00576 * f^2 + 0.01646 * f + 4.211 \quad (1)$$

Ми побудували цю залежність:

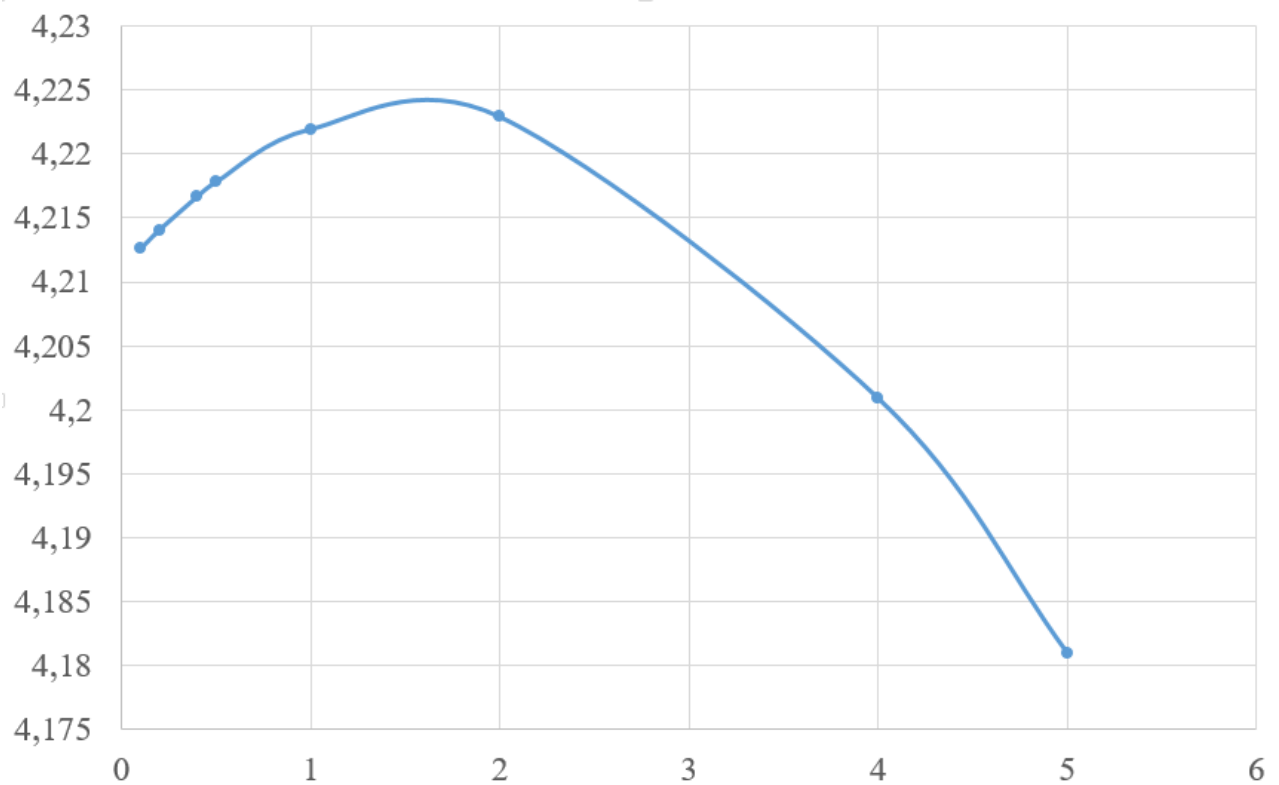


Рисунок 24 – Залежність діелектричної проникності текстоліту FR-4, яку отримали в роботі [3]

Розрахуємо по наближенням, представленим вище значення діелектричної проникності для частоти 1 ГГц  $\epsilon_r = 4,22$ . В подальшому це значення буде використане для розрахунку геометричних параметрів мікросмужкового фільтру.

### 3.2. Розрахунок та модулювання фільтру з центральною частотою 1 ГГц

Цільові параметри фільтру наступні: центральна частота 1 ГГц, смуга робочих частот 100 МГц, висота діелектрика в текстоліті 1,5 мм, товщина мідного шару 35 мкм.

Результатом розрахунку геометричних параметрів наведені на рис. 2.

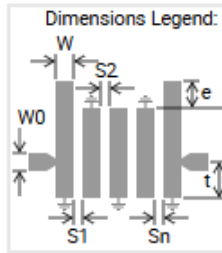


### 5th Order Chebyshev Bandpass

Lower Cutoff Freq. = 950.0 MHz; Upper Cutoff Freq. = 1.050 GHz

Passband Ripple = 0.1 dB

Substrate:  $\epsilon_r = 4.220$ , Height = 1.500 mm, Thickness = 35.00  $\mu\text{m}$



$W_0 = 2.916$  mm

$W = 2.916$  mm

$L = 41.37$  mm

$t = 7.433$  mm

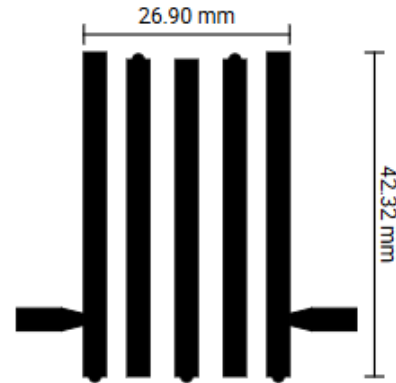
$e = 951.7$   $\mu\text{m}$

$S_1 = 2.767$  mm

$S_2 = 3.395$  mm

$S_3 = 3.395$  mm

$S_4 = 2.767$  mm



markimicrowave.com | Nov 26, 2025

Рисунок 25 – Результати розрахунку смугового фільтру для центральної частоти 1 ГГц.

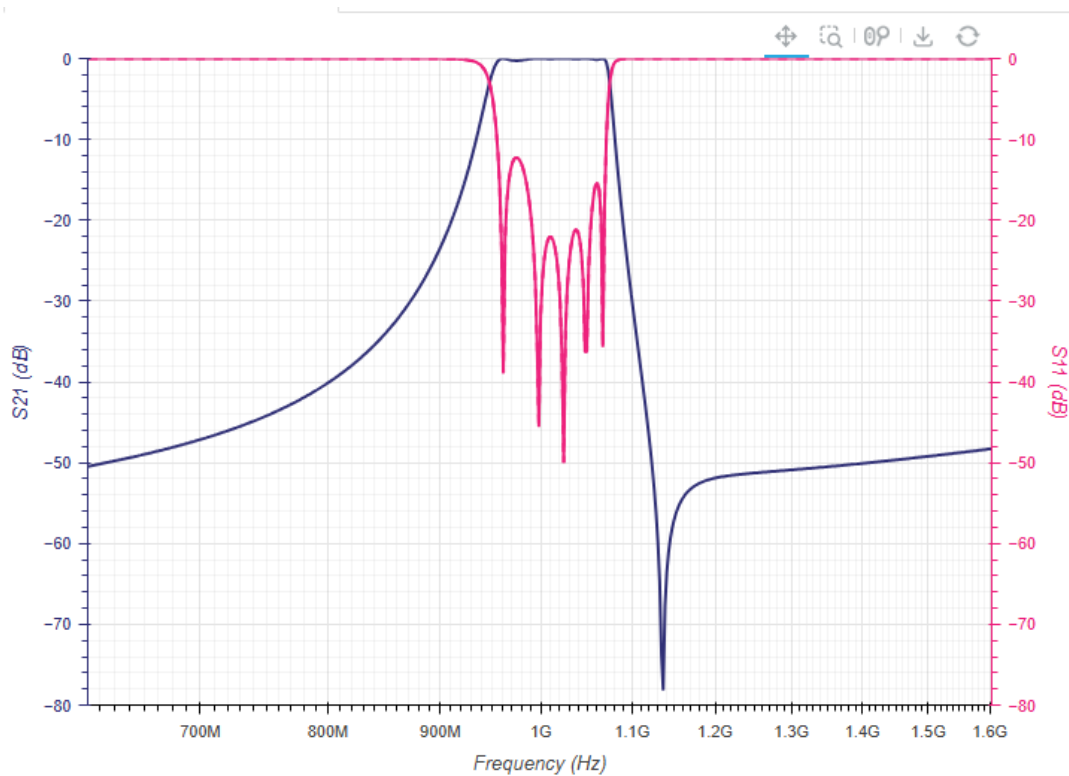


Рисунок 26 – Залежність параметру  $S_{21}$  дБ та  $S_{11}$  дБ для грбінчастого смугового фільтру для центральної частоти 1 ГГц розрахованого за допомогою калькулятора [4]

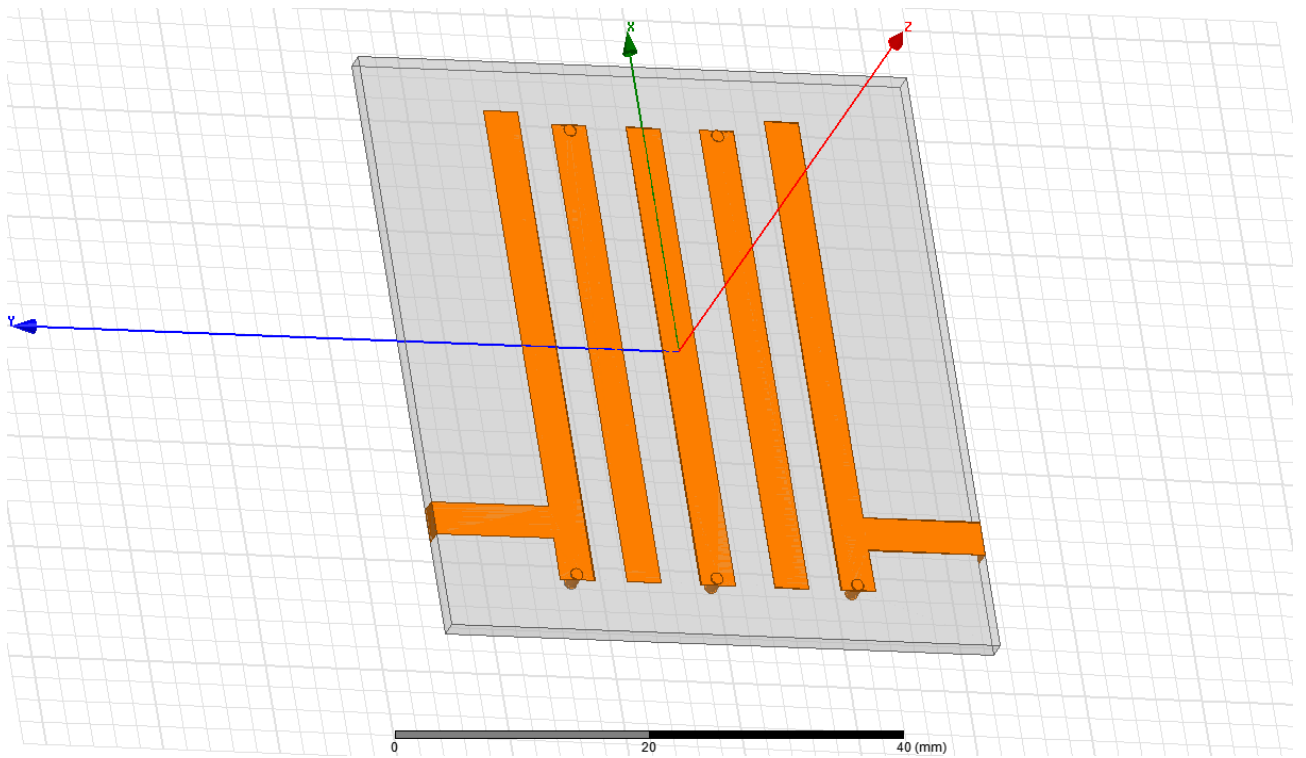


Рисунок 27 – Модель смугового фільтра від 950 до 1050 МГц з вказаними основними геометричними параметрами в програмі ANSYS HFSS

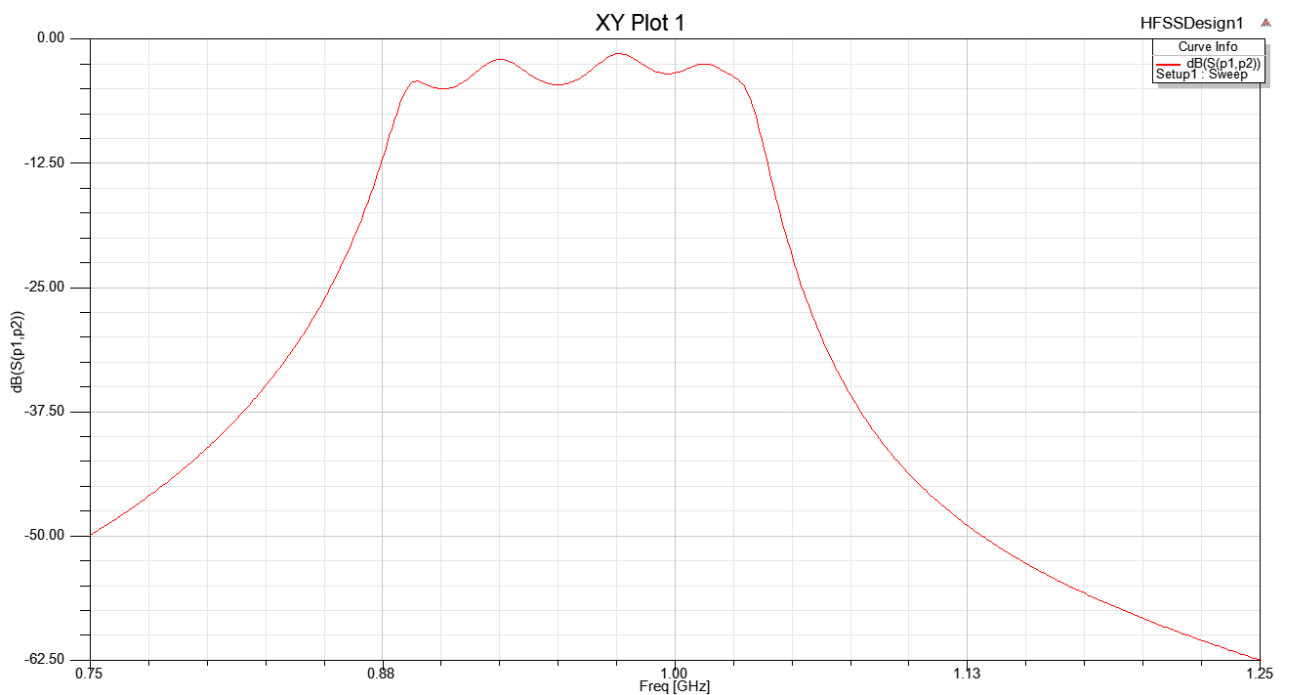


Рисунок 28 – Залежності параметрів  $S_{11}$  та  $S_{21}$  для смугового фільтра від 950 до 1050 МГц пораховані за допомогою програми ANSYS HFSS

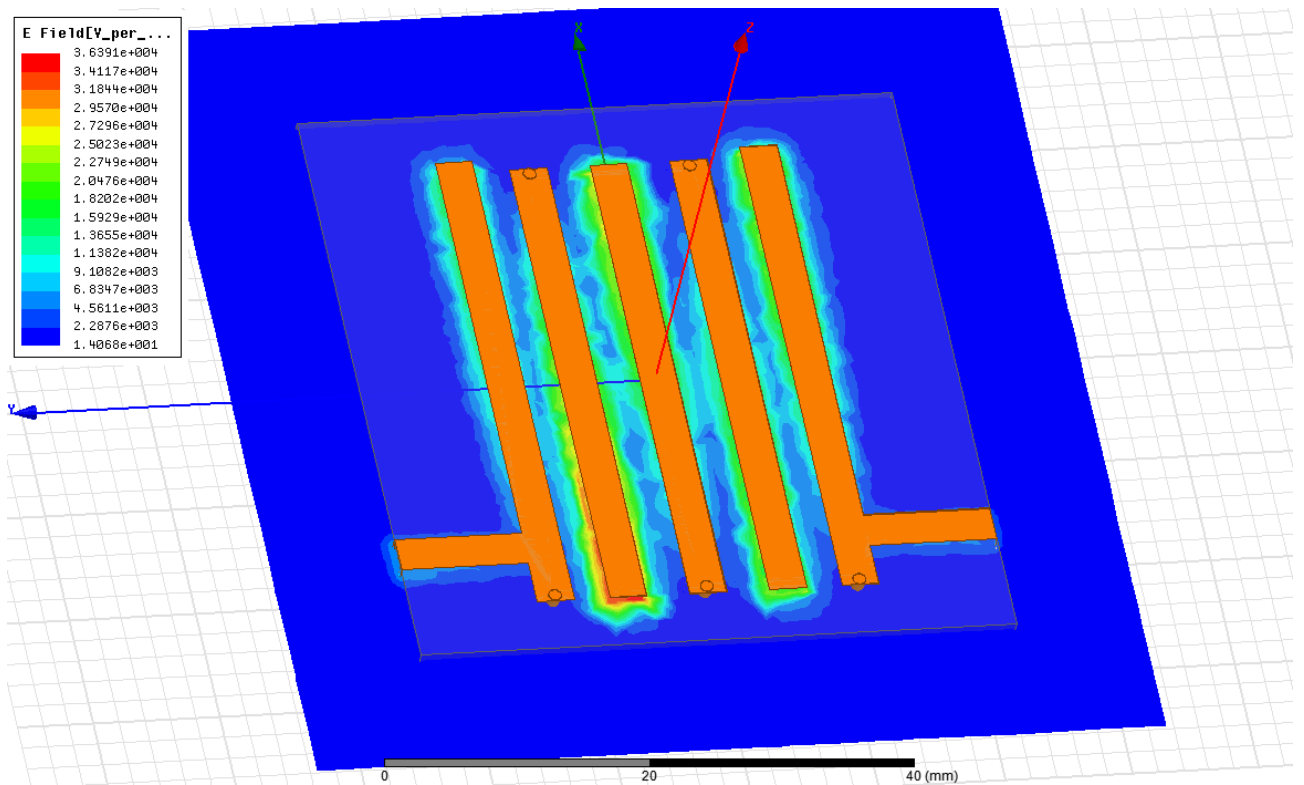


Рисунок 29 – Розподіл амплітуди електричної компоненти поля в фільтрі на частоті 1 ГГц

Як результат на рис. 30 представлено порівняння параметрів  $S_{21}$  для калькулятора Marki Microwave та програми ANSYS HFSS. Можна помітити, що ширина робочої смуги майже співпадає, проте сам діапазон частот був зміщений приблизно на 100 кГц в сторони нижчих частот для ANSYS HFSS. Втрати на частоті 1 ГГц для моделі ANSYS HFSS склали -3,3 дБ, що є прийнятно.

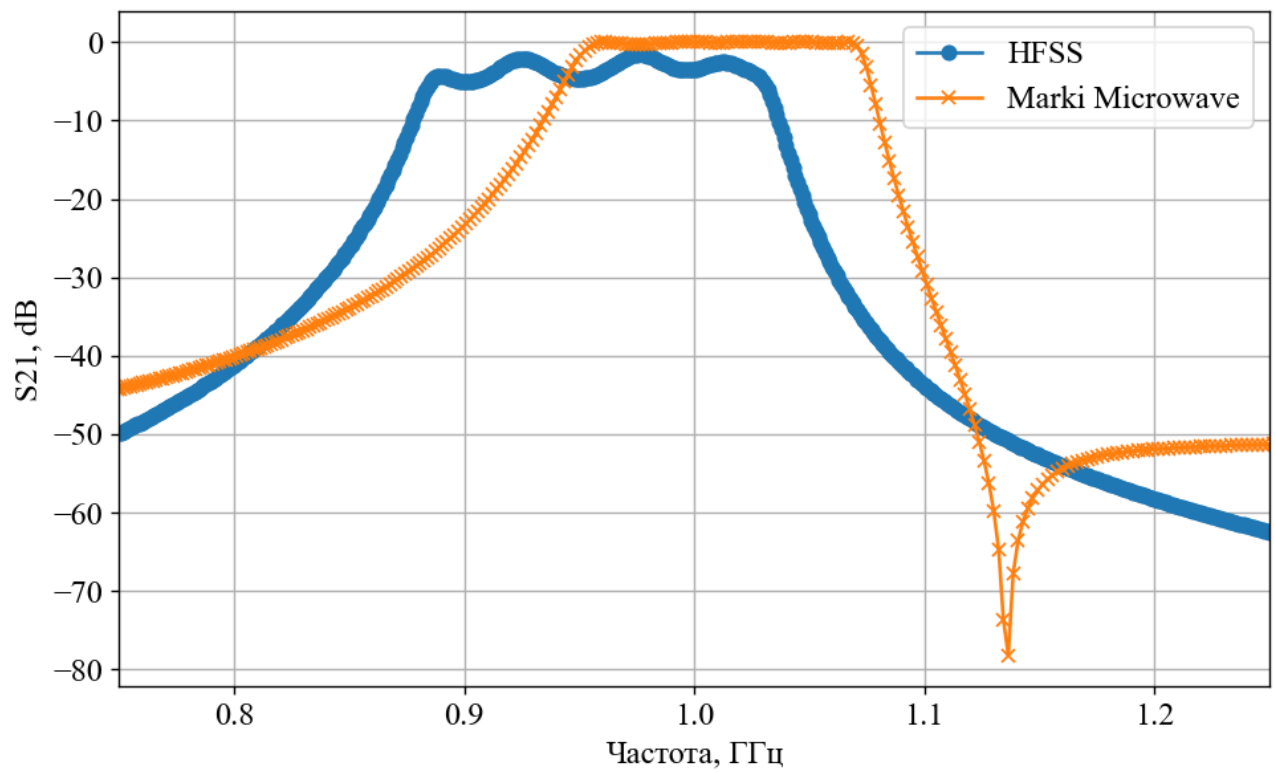


Рисунок 30 – Порівняння параметрів  $S_{21}$  для використаних симуляторів для випадку фільтру для частот від 950 до 1050 МГц

#### 4. ВИСНОВКИ

У межах роботи виконано дослідження мікросмужкових смугових фільтрів для кількох робочих діапазонів — 1 ГГц, 4 ГГц, 5,8 ГГц та 6,6 ГГц. Для кожної частоти були розраховані початкові параметри за допомогою калькулятора Marki Microwave, після чого розроблено й змодельовано повнохвильові 3D-моделі у середовищі ANSYS HFSS.

Порівняння частотних характеристик, зокрема  $S_{21}$ , продемонструвало суттєву різницю між аналітичним розрахунком та повнохвильовим моделюванням. Онлайн-калькулятор Marki Microwave формує ідеалізовану модель без урахування втрат, тоді як HFSS показує реалістичний вплив діелектрика, провідникових втрат та умов збудження. Це дає змогу оцінити поведінку фільтра в умовах, близьких до реального виготовлення та експлуатації.

Особливо показовим став аналіз фільтра на 4 ГГц. Початковий варіант вузькосмугової конструкції продемонстрував значні втрати — близько 12 дБ, що робить її практично непридатною. Після розширення смуги пропускання з 200 МГц до 1 ГГц і повторного моделювання в HFSS втрати зменшилися до 1,8 дБ, що вже відповідає прийнятному рівню. Це підтверджує, що вузькосмугові фільтри високого порядку на мікросмужкових структурах суттєво страждають від зниження добротності резонаторів.

Зниження добротності кожної секції в реальних умовах призводить до спотворення частотної характеристики: – можливого “розпаду” резонансів, – зміщення центральної частоти, – збільшення втрат у смугі пропускання. Таким чином, високий порядок фільтра не завжди гарантує кращу селективність у практичній реалізації, незважаючи на оптимістичні результати аналітичних моделей.

Враховуючи проведені дослідження, можна зробити такі узагальнення:

1. HFSS є необхідним інструментом для достовірної оцінки характеристик мікросмужкових фільтрів, тоді як аналітичні калькулятори варто застосовувати лише для початкової етапної оцінки.

2. У С-діпазоні (4–8 ГГц) різниця між аналітичним прогнозом і реальним моделюванням істотно зростає через підвищений вплив діелектричних та скін-ефектних втрат.

3. Фільтри на 5,8 ГГц та 6,6 ГГц продемонстрували закономірне збільшення втрат та нерівномірності, що узгоджується з очікуваним зниженням добротності на високих частотах.

4. Фільтр на 1 ГГц показав найбільшу відповідність між аналітичними та симуляційними даними, що пояснюється меншим впливом втратних механізмів на низьких частотах.

5. Аналіз фільтра на 4 ГГц довів, що у випадку вузьких смуг пропускання доцільно віддавати перевагу фільтрам нижчих порядків, оскільки складні структури сильно деградують при врахуванні реальних втрат.

6. Розроблені Python-інструменти забезпечили коректну обробку результатів Marki Microwave і HFSS, дозволивши об'єктивно порівняти їх поведінку.

Загалом робота підтверджує, що успішне проєктування мікросмужкових смугових фільтрів вимагає поєднання аналітичних методів та повнохвильового моделювання, а також уважного врахування добротності та втрат на обраних частотах. Проведені дослідження можуть бути використані для створення ефективних фільтрів у L та С діапазонах та слугуватимуть основою для подальших експериментальних робіт.

## ЛІТЕРАТУРА

1. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2012.
2. C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
3. D. M. Pozar, “Microstrip lines and slotlines,” in *Microwave Engineering*, 4th ed. Wiley, 2012.
4. J.-S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Wiley, 2001.
5. R. Ludwig and P. Bretchko, *RF Circuit Design: Theory and Applications*. Prentice Hall, 2000.
6. Rogers Corporation, “RO4000 Series High Frequency Circuit Materials,” Datasheet, 2023.
7. Rogers Corporation, “RT/duroid® 6000 Series: High Frequency Laminates,” Datasheet, 2022.
8. H. Huray, *The Foundations of Signal Integrity*. Wiley, 2009.
9. G. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures*. Artech House, 1980.
10. ANSYS Inc., “HFSS: High Frequency Structure Simulator – Technical Overview,” 2023.
11. S. Koziel and A. Bekasiewicz, *Multi-Objective Design of Antennas Using Surrogate Models*. Springer, 2016.
12. E. L. Holzman, “Wideband measurement of the dielectric constant of an FR4 substrate using a parallel-coupled microstrip resonator,” *IEEE Transactions on*

- Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 7, pp. 3127–3130, Jul. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2006.877061>.
13. “Microstrip Filter Design Tool,” Marki Microwave, 2023. <https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/microstrip-filter-design-tool/>
  14. Ansys, Inc., *Ansys Electronics Desktop Student, Including HFSS*, Canonsburg, PA, USA. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student>
  15. ANSYS, Inc., *ANSYS HFSS Theory and Technical Notes, Release 2024 R1*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2024.
  16. М. В. Андреев, С. Л. Бердник, О. Б. Гниленко, О. О. Дробахін, В. О. Катрич, С. О. Погарський, \*Методи комп’ютерного експерименту в радіофізиці: навчальний посібник\*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. 256 с.
  17. IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 5: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz, IEEE Std 802.11ac-2013, pp. 1–425, Dec. 2013.
  18. Rogers, Inc., “RT/duroid 6006/6010LM High Frequency Laminates — Data Sheet,” Rogers Corporation, Chandler, AZ, USA. [Online]. Available: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/rt-duroid-6006-6010lm-laminate-data-sheet.pdf>

## ДОДАТОК 1

Програма для імпорту та розрахунку параметру  $S_{21}$  в залежності від частоти з сирих даних калькулятора Marki Microwave:

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Шлях до s2p файлу
s2p_file = "filter (1) (1).s2p" # змініть на свій файл

frequencies = []
s21_db = []

# Зчитування файлу
with open(s2p_file, 'r') as f:
    for line in f:
        line = line.strip()
        if line.startswith('!') or line.startswith('#') or line == "":
            continue # пропускаємо коментарі та заголовки
        parts = line.split()
        if len(parts) >= 5:
            freq = float(parts[0])
            s21 = float(parts[3]) # 4-й стовпець – S21 dB
            frequencies.append(freq)
            s21_db.append(s21)
```

```
# Збереження даних у txt

output_file = "s21_data.txt"

with open(output_file, 'w') as f:

    f.write("Frequency(Hz)\tS21(dB)\n")

    for freq, s21 in zip(frequencies, s21_db):

        f.write(f"{freq}\t{s21}\n")

print(f"Дані збережено у {output_file}")

# Побудова графіка

plt.figure(figsize=(8,5))

plt.plot(frequencies, s21_db, label="S21")

plt.xlabel("Frequency (Hz)")

plt.ylabel("S21 (dB)")

plt.title("S21 Parameter")

plt.grid(True)

plt.legend()

plt.tight_layout()

plt.show()
```

## ДОДАТОК 2

Програма для імпорту параметрів  $S_{21}$  отриманих з калькулятора Marki Microwave та ANSYS HFSS:

```
import matplotlib.pyplot as plt

import csv

# --- Налаштування шрифту ---

plt.rcParams['font.family'] = 'Times New Roman'

plt.rcParams['font.size'] = 14

# --- Налаштування ---

csv_file = "5_8.csv" # CSV файл

txt_file = "s21_data.txt" # TXT файл

freq_min = 3.0 # мінімальна частота на осі ГГц

freq_max = 7 # максимальна частота на осі ГГц

# --- Зчитування CSV ---

csv_freq = []

csv_s21 = []

with open(csv_file, 'r') as f:

    reader = csv.reader(f)

    next(reader) # пропускаємо заголовок

    for row in reader:
```

```

if len(row) >= 2:

    freq = float(row[0]) # вже в ГГц

    s21 = float(row[1])

    csv_freq.append(freq)

    csv_s21.append(s21)

# --- Зчитування ТХТ ---

txt_freq = []

txt_s21 = []

with open(txt_file, 'r') as f:

    next(f) # пропускаємо заголовок

    for line in f:

        parts = line.strip().split()

        if len(parts) >= 2:

            freq_hz = float(parts[0])

            s21 = float(parts[1])

            freq_ghz = freq_hz / 1e9 # перетворення в ГГц

            txt_freq.append(freq_ghz)

            txt_s21.append(s21)

# --- Побудова графіка ---

plt.figure(figsize=(8,5))

plt.plot(csv_freq, csv_s21, label="HFSS", marker='o')

```

```
plt.plot(txt_freq, txt_s21, label="Marki Microwave", marker='x')  
plt.xlabel("Частота, ГГц")  
plt.ylabel("S21, dB")  
plt.grid(True)  
plt.legend()  
plt.xlim(freq_min, freq_max)  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```