

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 125 «Кібербезпека»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Термодинамічні основи квантової фізики: Лабораторний практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 125 «Кібербезпека» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О.П. Живков. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 123 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №_від __.__.2020р.)
за поданням Вченої ради Фізико-технічного інституту (протокол № 3_від 30.03.2020р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладач: *Живков Олександр Петрович*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Мачуський Євгеній Андрійович*, канд. техн. наук

Рецензент: *Орлов Анатолій Тимофійович*, канд. техн. наук, професор

Цикл лабораторних робіт з дисципліни “ Термодинамічні основи квантової фізики ” складається з шести робіт. Цикл лабораторних робіт охоплює основні розділи теоретичного курсу. Виконання даного циклу робіт на ПК з використанням сучасного програмного забезпечення (AWR Microwave Office), дозволить набути навички сучасних методів проектування та досліджень мікрохвильових мікрострічкових структур на базі комірок метаматеріалів, що допоможе кращому засвоєнню теоретичних положень, викладених в лекціях, навчальній та науковій літературі.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

Зміст

Вступ.....	4
Рекомендована література.....	5
Вимоги до виконання лабораторних робіт.....	6
Лабораторна робота №1. Розрахунок смугового фільтра.....	9
Лабораторна робота №2. Проектування ліній затримки.....	30
Лабораторна робота №3. Проектування діляника потужності.....	47
Лабораторна робота №4. Проектування фільтра верхніх частот.....	70
Практична робота №1. Проектування фільтра нижніх частот.....	93
Лабораторна робота №5. Проектування малошумного підсилювача.....	98
Практична робота №2. Пристрої надвисоких частот на базі метаматеріалів.....	113
Додаток 1.....	125

Вступ

Метою вивчення дисципліни «Термодинамічні основи квантової фізики» є формування у студентів системи знань про особливості фізичних процесів випромінювання та поширення електромагнітних хвиль у різноманітних середовищах, технічних пристроях, направляючих та трансформуючих електромагнітні хвилі.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні:

ЗНАТИ:

- призначення фізичних величин, що використовуються для характеристики поля, електродинамічних структур та електромагнітних процесів;
- основні фізичні властивості електромагнітного поля (ЕМП), методи аналізу електромагнітних явищ, закономірностей випромінювання та поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ) в різноманітних середовищах та спрямовуючих структурах;
- фізичні явища, процеси та закономірності в електронних пристроях НВЧ;

ВМІТИ:

- проводити якісний аналіз електромагнітних процесів у будь яких електродинамічних структурах та антенах;
- розрахувати поля випромінювання, поля в вільному просторі та різних середовищах, а також в основних електродинамічних структурах, вибираючи геометричні розміри цих структур;
- володіти технікою дослідження полів у вільному просторі та замкнених електродинамічних структурах;
- розробляти рекомендації щодо призначення та експлуатації антен, елементів і пристроїв НВЧ на основі довідкових даних;
- визначати характеристики і параметри при альтернативному виборі необхідних антен, елементів і пристроїв НВЧ.

Виконання лабораторних робіт дозволяє отримати практичні навички розрахунку ЕМП і його основних при випромінюванні ЕМВ, поширенні їх в

різних діелектричних середовищах і лініях передачі, а також розрахунку елементів і пристроїв хвилеводних трактів телекомунікаційних систем.

Задання на контрольні роботи розроблені для кожного модуля дисципліни та індивідуально для кожного студента. Видача індивідуального варіанту здійснюється викладачем через старосту групи після начитки двох третин лекційного матеріалу.

Виконання робіт поряд з набуттям практичних навичок контролюють якість самостійної підготовки учнів протягом семестру і їх виконання є підставою для допуску до заліків по обом модулям.

Рекомендована література

а) Література основна.

1. Шокало В.М. Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації.- Харків: ХНУРЕ; Коллегіум, 2012.- 456 с.
2. Шокало В.М., Правда В.І. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Основи теорії електромагнітного поля.- Харків: ХНУРЕ; Коллегіум, 2009.- 286 с.
3. Дж. Б. Мэрион. Физика и физический мир. Пер. с английского под ред. Е.М. Лейкина. - М.- Мир, 1975.- 624 с
4. Интернет-ресурс youtube «Механическая вселенная».
5. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 3 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела.- М. - Наука, 1987.- 320 с.
6. Дмитриев Е.В. Основы моделирования в Microwave office.- Методическое пособие.- 2010 г. – 174 с.
7. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И. Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов/ Под ред. Г.М. Зверева. - К. - М.: Аверс, 2012.- 360 с.
8. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48933-9_56
9. М. Е. Ilchenko, A. P. Zhivkov. Bridge Equivalent Circuits for Microwave Filters and Fano Resonance. in: Advances in Information and Communication Technologies. Springer, 2019, pp. 278-298

10. Fano Resonances in Optics and Microwaves / Ed. E. Kamenetskii, A. Sadreev and A. Miroschnichenko.- Springer, 2018

11. М. Лауэ. История Физики. – М.- Гостехиздат, 1956.

12. Коваль Ю.О., Гринченко Л.В., Милютченко І.О., Рибін О.І. Основи теорії кіл: Підручник для студентів ВНЗ. Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2006. 668 с.

б) Література допоміжна.

1. А. С. Подстригаев. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ: ПРАКТИКУМ, Брянск 2015

2. Методическое пособие: Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Воронеж, 2004

3. В. В. Фриск Использование пакета Microwave Office для моделирования электрических цепей на персональном компьютере. - Москва СОЛОН-Пресс 2010.- 106 с.

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Загальні рекомендації

Лабораторні роботи (ЛР) для студентів денної форми навчання включають два розрахункових завдання, відповідно по одному на кожен досліджуваний модуль. Для кожного студента передбачений свій варіант в рамках кожного завдання. Орієнтовний обсяг виконуваних контрольних робіт становить 15 ... 20 сторінок формату А4.

Вимоги до оформлення

1.. Лабораторні роботи можуть бути оформлені звичайному учнівському зошиті або віддруковані на аркушах формату А4. Вони повинні бути акуратно оформлені і розбірливо написані. Для зауважень викладача на кожній сторінці залишаються поля. Всі сторінки повинні бути пронумеровані.

2. На обкладинці зошита чи титульному аркуші вказуються: прізвище, ім'я, по батькові; група, дисципліна.

3. Малюнки і графіки повинні бути виконані акуратно (краще за допомогою персонального комп'ютера). Графіки можна будувати і на міліметровці із зазначенням розмірностей по осях.

4. Застосовувані розрахункові формули повинні проводитись по тексту роботи з обов'язкової розшифровкою літерних позначень.
5. Розрахунки необхідно виконувати до трьох значущих цифр після коми.
6. В кінці кожної роботи вказується використана література.
7. Кожна лабораторна робота повинна бути підписана автором.

Оцінка якості виконання робіт відповідно до вимог Болонської системи

‘Кожна ЛР складається з ряду самостійних частин (розділів), зв'язаних загальною постановкою задачі та охоплюючи всі три теми дисципліни. Максимальна кількість балів - 65.

Критерії оцінювання:

- розрахунки виконані правильно, у повному обсязі, відповідають варіанту завдання й вимогам оформлення текстових і графічних матеріалів, які прийняті на кафедрі для курсових робіт проектів і дипломів. У роботі є повні розділи самоперевірки, змістовні висновки - 65 балів;

- розрахунки виконані правильно, у повному обсязі, відповідають варіанту завдання, але є, незначні відхилення від вимог оформлення текстових і графічних матеріалів (не більше двох відхилень), які прийняті на кафедрі для курсових робіт проектів і дипломів. У роботі є не повна самоперевірка, (самоперевірка відсутня не більше ніж на один пункт завдання), і/або поверхневі висновки - 45 бала (відповідає звичайній оцінці «добре»);

- розрахунки виконані правильно, відповідають варіанту завдання, але не в повному обсязі, (відсутній хоча б один пункт завдання), є відхилення від вимог оформлення текстових і графічних матеріалів (не більше чотирьох відхилень), які прийняті на кафедрі для курсових робіт проектів і дипломів. У роботі є не повна самоперевірка, (самоперевірка відсутня не більше ніж на два пункти завдання), і/або поверхневі висновки - 35 балів;

- менш 35 балів ЛР не приймається й відправляється на доробку.

Лабораторна робота по кредитному модулю

Зразок оформлення титульного аркуша пояснювальної записки

Міністерство освіти і науки України



Фізико-технічний інститут

Кафедра фізико-технічних засобів захисту інформації

дисципліна «Термодинамічні основи квантової фізики»

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

“Розрахунок фільтра низких частот ”

Варіант №....

Виконав: студ. гр. _____
(шифр групи)

(прізвище, ініціали)

(підпис)
захистив роботу «__» _____ 20 __ р.
з оцінкою _____

(підпис викладача)

Київ 20 _

Лабораторна робота №1. Розрахунок смугового фільтра

Мета роботи: Проектування смугово-пропускаючого фільтра з використанням утиліти iFilter і програми Microwave Office зі складу програмного пакету AWR Design Environment.

Опис методу проектування

1. Створення схемної моделі фільтра в iFilter.
2. Експорт схемної моделі фільтра в програму Microwave Office.
3. Оптимізація схемної моделі фільтра з метою отримання заданих частотних характеристик.
4. Отримання топології фільтра.
5. Створення електромагнітної моделі фільтра на основі його топології.
6. Виконання електромагнітного аналізу фільтра.

Теоретичні відомості

Смуговий фільтр (рис. 1.1.) — електронний фільтр, що пропускає сигнали в певному (діапазоні/смузі) частот, і послаблює (вирізає) сигнали частот за межами цієї смузи. Наприклад, смуговий фільтр на 1800 - 1900 МГц пропускає тільки сигнали, частота яких лежить в інтервалі 1 800 - 1 900 МГц. При цьому частота 1 800 МГц називається нижньою частотою зрізу, а 1 900 МГц — верхньою частотою зрізу. На цих частотах придушення сигналу повинно складати 3 дБ (0.707 від сигналу на центральній частоті).

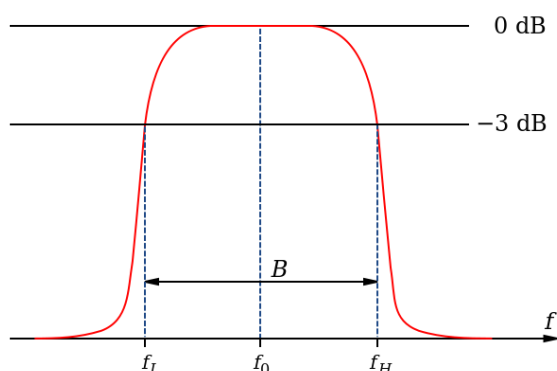


Рис. 1.1. Одна із схем смугового фільтра

Приклад аналогового електронного смугового фільтра являє собою схему RLC (рис. 1.2.). Ці фільтри також можуть бути створені шляхом об'єднання нижніх частот фільтра з фільтром верхніх частот.

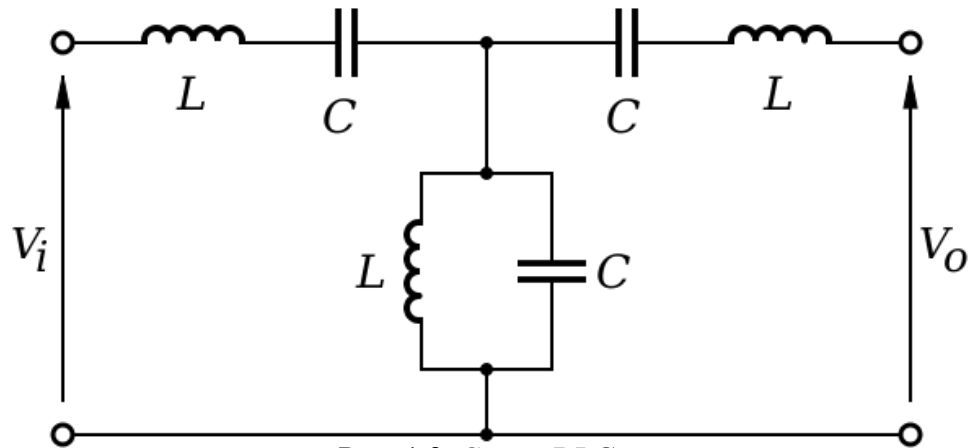


Рис..1.2. Схема RLC

На практиці смуговий фільтр не є ідеальним. Фільтр не повністю послабляє всі частоти за межами необхідного діапазону частот; зокрема, є де частоти послаблюються, але не відкидаються. Це, як правило, затухання на октаву. Конструкція фільтра прагне зробити спадання якомога вужчим. Часто це досягається за рахунок смуги пропускання або стоп-діапазону пульсації.

Оптичні смугові фільтри поширені в фотографії і театральному освітленні . Ці фільтри мають прозору форму кольорової плівки або листа.

Добротність: Смуговий фільтр може бути охарактеризований його добротністю. Високий-Q фільтр матиме вузьку смугу пропускання, а низький-Q фільтр буде мати широку смугу пропускання.

Застосування: Смугові фільтри широко використовуються в бездротових передавачах і приймачах. Основна функція такого фільтру в передавачі - обмежити ширину смуги вихідного сигналу до смуги частот, виділеної для передачі. Це запобігає від перешкод інших станцій. Смуговий фільтр також оптимізує відношення сигнал-шум і чутливість приймача.

Шляхом заміни змінної P в передавальній функції ФНЧ на змінну $(1 / \Delta\Omega) (P + 1 / P)$ можна отримати АЧХ смугового фільтра. В результаті цього перетворення АЧХ фільтра нижніх частот в діапазоні $0 \leq \Omega \leq 1$ переходить в праву частину смуги пропускання смугового фільтра ($1 \leq \Omega \leq \Omega_{MAX}$). Ліва частина смуги

пропускання є дзеркальним відображенням в логарифмічному масштабі. (рис. 1.3). Обчислення нормованих частот зрізу смугового фільтра, на яких його коефіцієнт передачі зменшується на 3 дБ, може бути здійснено з:

$$\Omega_{MAX / MIN} = \sqrt{(\Delta\Omega)^2 + 4} \pm \frac{1}{2} \Delta\Omega \quad (1.1)$$

Формули, яка виходить при:

$$\Delta\Omega = \Omega_{MAX} - \Omega_{MIN} \quad \Omega_{MAX} \cdot \Omega_{MIN} = 1$$

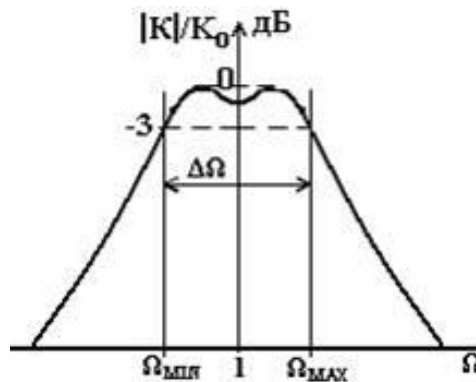


Рис. 1.3 Смуговий фільтр другого порядку

Передавальна функція ПФ другого порядку має вигляд:

$$K(P) = \frac{K_0}{1 + \frac{1}{\Delta\Omega} \left[P + \left(\frac{1}{P} \right) \right]} = \frac{K_0 \Delta\Omega P}{1 + \Delta\Omega P + P^2} \quad (1.2)$$

Основною характеристикою такого фільтра є коефіцієнт передачі K_P на резонансній частоті ($K_P = K_0$) і добротність Q .

$$Q = \frac{f_p}{f_{MAX} - f_{MIN}} = \frac{1}{\Omega_{MAX} - \Omega_{MIN}} = \frac{1}{\Delta\Omega} \quad (1.3)$$

$$K(P) = \frac{(K_P / Q)P}{1 + (1/Q)P + P^2} \quad (1.4)$$

З (1.4) отримаємо вирази для АЧХ і ФЧХ смугового фільтра другого порядку:

$$|K| = \frac{(K_P / Q)P}{\sqrt{1 + \Omega^2(1/Q^2 - 2) + \Omega^4}}; \quad (1.5)$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\Omega}$$

Отримати смуговий фільтр можна, включивши послідовно фільтри нижніх і верхніх частот. Максимальна величина добротності, яка може бути отримана, при такій побудові фільтра дорівнює $Q = 1/2$.

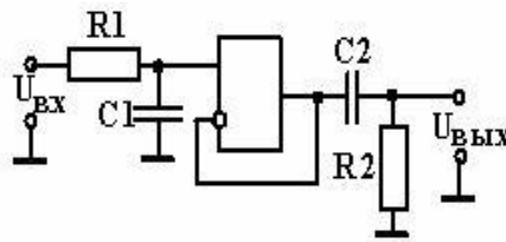


Рис.1. 4 Пасивний смуговий фільтр другого порядку

На рис. 1.4 показана схема пасивного LRC - фільтр. Передавальна функція дорівнює:

$$K(p) = \frac{pRC}{1 + pRC + p^2 LC} \quad (1.6)$$

Резонансна частота фільтра

$$f_p = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

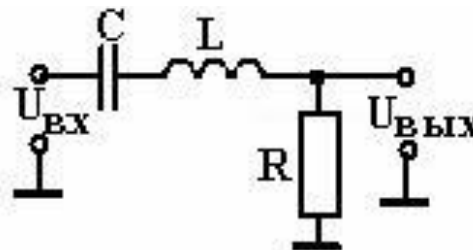


Рис. 1.5. Нормований вид

Передавальна функція (1.6) може бути переписана в:

$$K(p) = \frac{R\sqrt{C/L}p}{1 + R\sqrt{CL}p + p^2} \quad (1.7)$$

$$Q = (1/R)\sqrt{L/C} \text{ и } Kp = 1.$$

Для реалізації пасивного смугового фільтра з низькою резонансною частотою потрібна велика індуктивність. Для схемної реалізації можна використовувати операційний підсилювач з частотно-залежним зворотним RC - зв'язком. Приклад ПФ зі складним негативним зворотним зв'язком показаний на рис. 1.6 . Приймавши $C1 = C2 = C$ отримаємо передавальну функцію у вигляді:

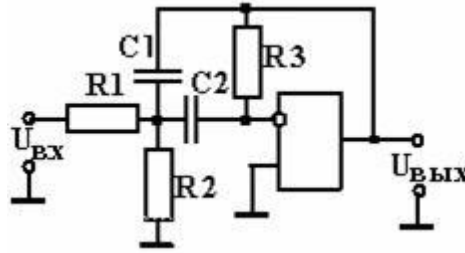


Рис. 1.6. Активні смугові фільтри

$$K(P) = \frac{-\frac{R2R3}{R1+R2}C\omega_p P}{1 + \frac{2R1R2}{R1R2}C\omega_p P + \frac{R1R2R3}{R1+R2}C^2\omega_p^2 P^2} \quad (1.8)$$

Згідно з (1.4) маємо:

$$\frac{R1R2R3}{R1+R2}C^2\omega_p^2 = 1, \quad (1.9)$$

Звідси отримаємо, що:

$$f_p = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R1+R2}{R1R2R3}}. \quad (1.10)$$

Підставивши (1.10) в (1.8) і прирівнявши відповідні коефіцієнти до коефіцієнтів у формулі (1.4) можна отримати, що :

$$-K_p = \frac{R3}{2R1}; Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R3(R1+R2)}{R1R2}} = \pi \cdot R3 \cdot C \cdot f_p. \quad (1.11)$$

смуга пропускання:

$$f_{MAX} - f_{MIN} = \frac{f_P}{Q} = \frac{1}{2\pi R_3 C} \quad (1.12)$$

Таким чином, смуга пропускання не залежить від R 1 і R 2, а КР не залежить від R2. Тому можна змінювати резонансну частоту fP, змінюючи R2 без зміни коефіцієнта передачі КР.

Розглянемо приклад розрахунку смугового фільтра (рис. 1.7.). Нехай необхідно отримати ПФ з резонансною частотою fP = 10 Гц, добротність Q = 100 і коефіцієнт передачі на резонансній частоті КР = -10. ПРИ ЦЬОМУ Частота зрізу Fmin ≈ Буде 9,95 Гц і fP ≈ 10,05 Гц. Задаємо довільно значення ємності конденсатора C = 1 мкФ. Тоді з формул отримаємо R3 = Q / (πfPC) = 3,18 МОм; Де R1 і R3 / (- 2кр) = 159 кОм. З Формули отримаємо:

$$R2 = -КР / (2Q^2 + КР) = 79,5 \text{ Ом.}$$

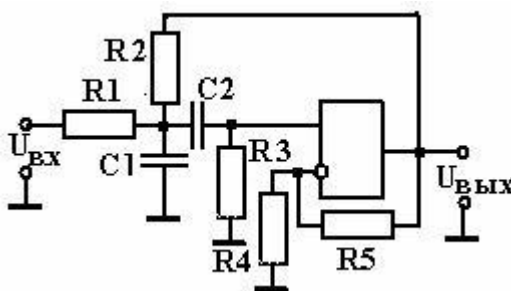


Рис. 1.7. Приклад схеми смугового фільтра з позитивним зворотним зв'язком

Часто виникає необхідність застосування вузькосмугових LC-фільтрів, наприклад, на вході радіоприймальних пристроїв. Основні труднощі, при цьому, полягають в забезпеченні мінімального загасання в смузі пропускання фільтра і максимального за його межами. У пропонованому фільтрі використовується принцип складання напруг збуджених контурів, котушки яких розташовані на одному сердечнику, - фертовому, що має два отвори (на таких сердечниках намотані симетрувальні трансформатори кімнатних телевізійних антен, наприклад, типу «вуса», є такі сердечники і на платах в деяких типах підсилювачів активних ТВ антен).

Автором випробуваний фільтр, що має котушку зв'язку з антеною і чотирьох контурний (рис.1.8).

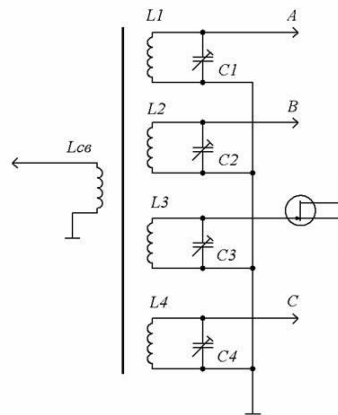


Рис. 1.8. Фільтр, що має котушку зв'язку з антеною і чотирьохконтурний вид

Причому, котушка зв'язку намотана в одному отворі, на зовнішній стороні сердечника, а контурні котушки, також на зовнішній стороні, - в іншому. Фільтр застосовувався на вході приймача для зв'язку через штучні супутники Землі та мав середню частоту 29, 450 МГц, смугу пропускання за рівнем 0,7 - 550 КГц. На рис.1.9 показаний варіант фільтра з навантаженням польовим транзистором, до точок А, В, С можуть бути підключені додаткові навантаження. Котушка зв'язку

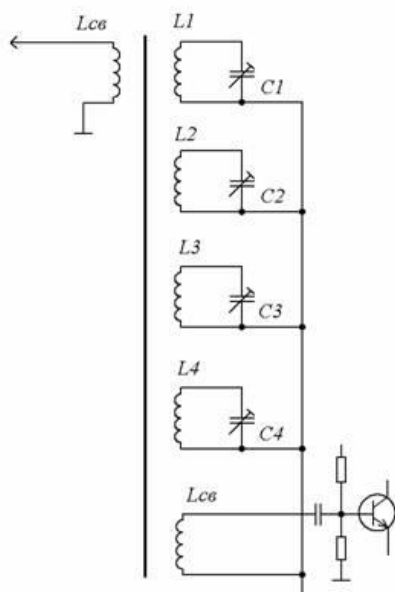


Рис. 1.9. Смушковий фільтр.

має 2, 5 витка (два рази пропустити в отворі кільця) монтажний провід МГ (діаметр внутрішньої жила 0,6 мм), контурні котушки намотується складені вчетверо і злегка скручений дріт ПЕЕГО - 0,18 - 3, 5 витка (три раз провести крізь кільце). Після намотування, будь-який кінець котушки зв'язку і однойменні кінці контурних котушок зачищаються від ізоляції, скручуються і припаюються на корпус,згідно рис. 1.9. До котушці зв'язку підключається антена, до контурних - конденсатори, в даному випадку КПК-МП 5 ... 20 пФ, ротори яких з'єднуються з корпусом пайки. Один з контурів (будь-який) включається в ланцюг затвора

польового транзистора повністю, через розділовий конденсатор, якщо каскад охоплений АРУ, або безпосередньо, якщо АРУ немає. Слід зазначити, що навантаження фільтр, в даному випадку, має бути високоомний.

При необхідності підключити фільтр до низькоомного навантаження (рис 1.9)., Потрібно взяти два ідентичних сердечника і намотати контурні котушки в двох суміжних отворах, - взаємне положення сердечників може бути будь-яким, - а в крайніх отворах - котушки зв'язку з антеною і входом каскаду на біполярному транзисторі. Якщо між сердечниками залишити фіксований зазор, то, вводячи в нього феритове осердя, можна регулювати індуктивність контурних котушок (всіх відразу), що дозволить, замість, громіздкого підлаштування конденсаторів, застосувати компактні конденсатори постійної ємності.

Практична частина

Лабораторна робота №1

Розрахунок смугового фільтра

Вихідні дані

Вихідними даними для виконання лабораторної роботи є:

- нижня і верхня частоти зрізу фільтра f_{c1} , f_{c2} ;
- мінімальне загасання L_z з в смузі загородження на частотах f_{z1} , f_{z2} ;
- матеріал діелектрика.

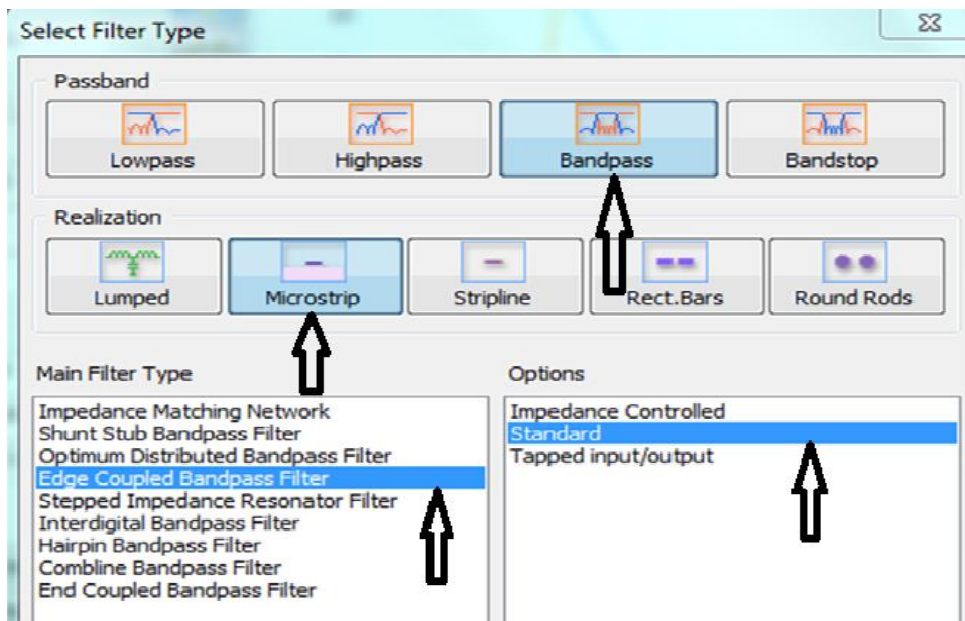
$$f_{c1} = 5 \text{ ГГц} \quad f_{c2} = 6 \text{ ГГц} \quad L_z = 30 \text{ дБ} \quad f_{z1} = 4 \text{ ГГц} \quad f_{z2} = 7 \text{ ГГц} \quad \text{ФЛАН-2,8}$$

Таблиця 1.1. Параметри для марки матеріалу : ФЛАН-5,0

Марка матеріалу	Відносна діелектрична проникність ϵ_r	Тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$	Товщина підкладки h , мм	Товщина фольги, мкм
ФЛАН-2,8	$2,8 \pm 0,2 / 2,8$	0,004	1,0	35

1. Створення схемної моделі фільтра в утиліті iFilter

Для виконання завдання скористаємося додатком **iFilter**, що входять до складу програми MWO. Для цього переходимо в категорію **Wizards** → **iFilter Filter Wizard**.



Для створення смугасто-проникного фільтра встановіть налаштування відповідно до рисунку нище:

Passband — смугасто-проникний тип фільтра;

Realization — реалізація; в даному випадку на мікрополосковій лінії;

Edge Coupled Bandpass Filter — тип фільтра (фільтр з напівхвильових резонаторах з чвертьхвильовим електромагнітним зв'язком).

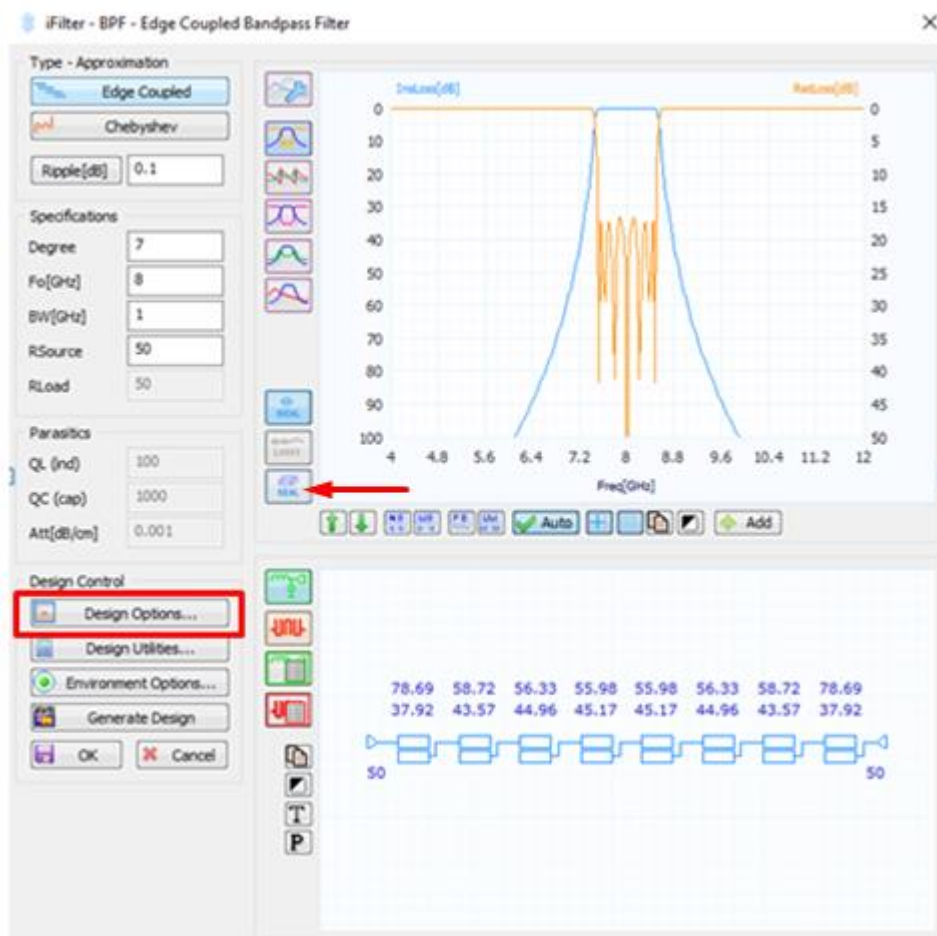
Наступний крок - налаштування параметрів фільтра. Для задання частотних характеристик фільтра налаштуйте наступні поля:

Degree — порядок фільтра (кількість реактивних елементів);

Fo [GHz] — середня частота пропускання фільтра. Обчислюється як середнє геометричне значення $f_0 = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}}$; В данному випадку $f_0 = \sqrt{5 \cdot 6} = 5,47$

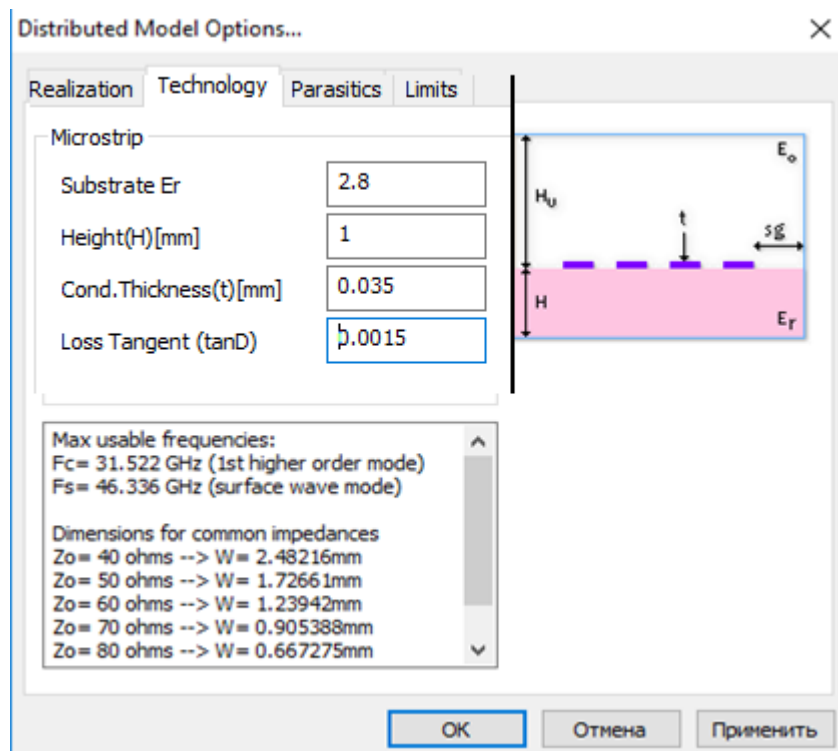
BW [GHz] — ширина смуги пропускання фільтра; В данному випадку $BW = 6 - 5 = 1$

RSource — опір джерела сигналу (50 Ом).

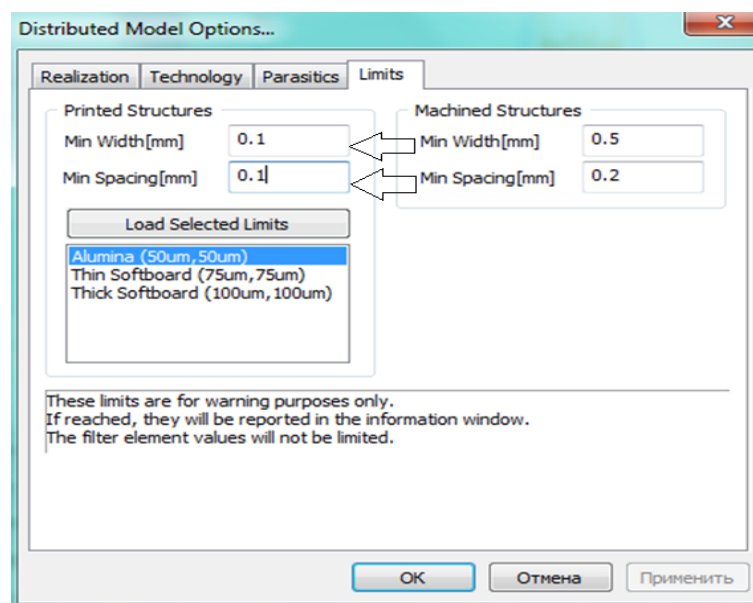


Далі натисніть на кнопку **REAL** та налаштуйте вкладку **Design options**.

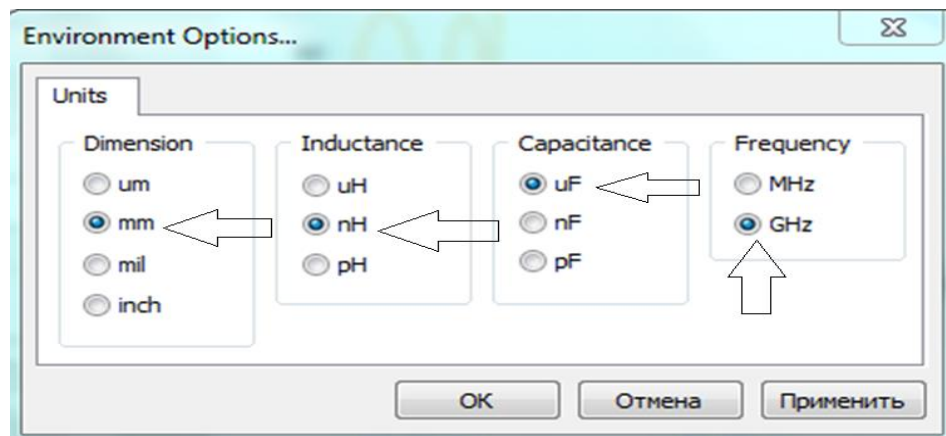
У вкладці **Technology** налаштуйте поля відповідно до марки використовуваного матеріалу.



У вкладці **Limits** задайте ширину провідників і проміжків між ними відповідно до технічних обмежень.



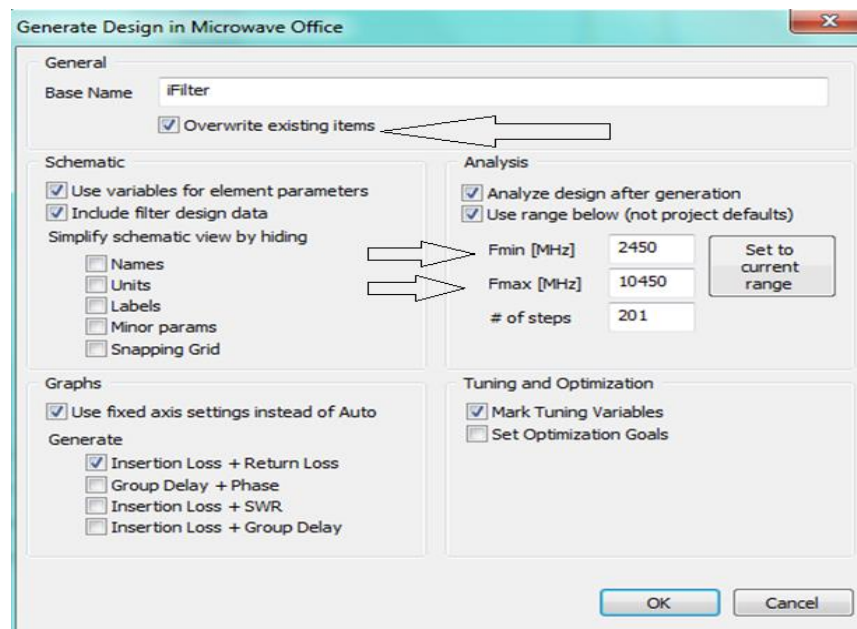
Перейдіть у вкладку **Environment Options** і встановіть її відповідно до рисунку:



2. Експорт схемної моделі фільтру в програму Microwave Office

Перейдіть у вкладку **Generate Design** і налаштуйте її відповідно до рисунку **Fmin** і **Fmax** необхідно налаштувати відповідно до смуги пропускання фільтру, вибравши діапазон з запасом. Ці значення відповідають нижній та верхній межі модельованої області частот.

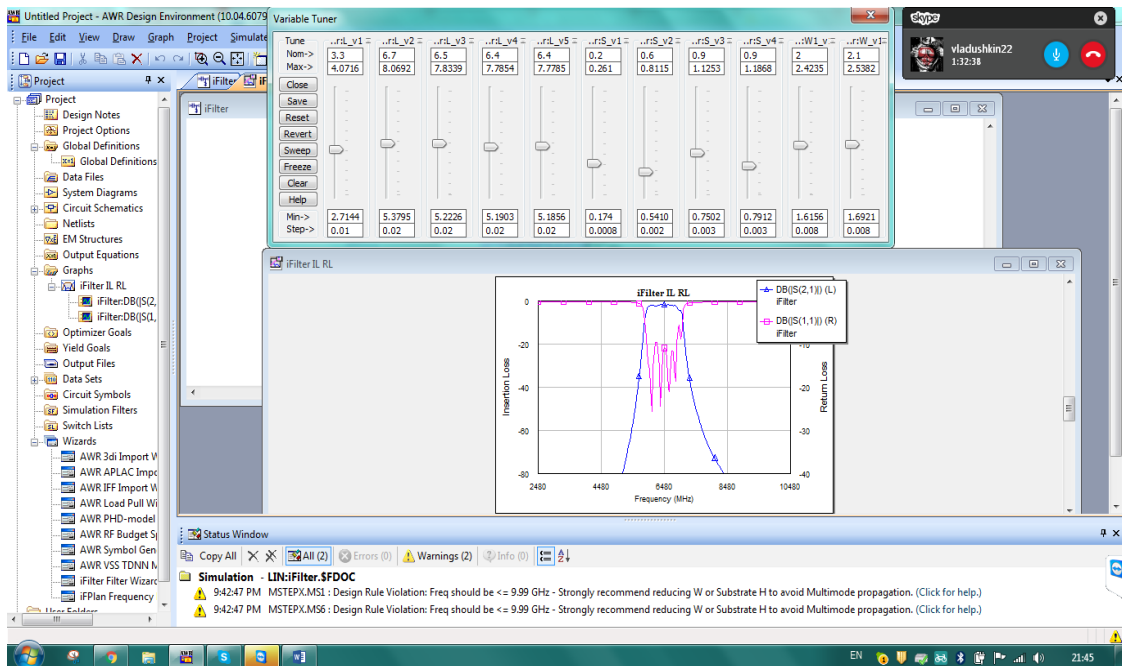
Натисніть **OK** і отримаєте графік та схемну модель фільтра.



3. Оптимізація схемної моделі фільтра з метою отримання заданих частотних характеристик

Оптимізуємими характеристиками схемної моделі є габаритні розміри елементів фільтра (вони задаються для оптимізації при імпорті схеми в середу Microwave Office з додатка iFilter).

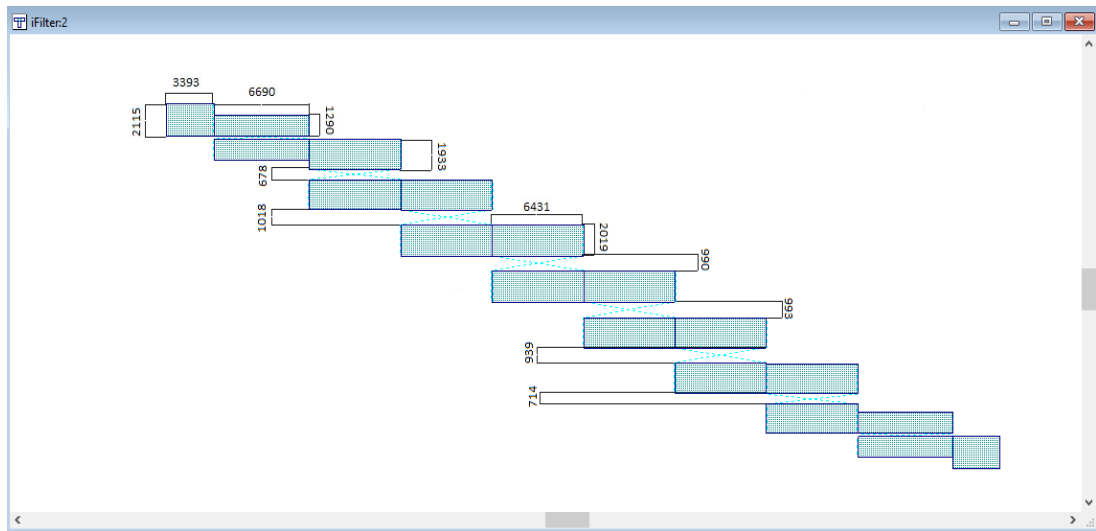
Для оптимізації натисніть F9. Відкриється меню налаштування Tuner.



Округліть значення до десятих, і якщо отримані характеристики фільтра не відповідають заданим, ви можете, змінюючи значення в цьому вікні, домогтися необхідного результату. При цьому необхідно задати крок для всіх параметрів 0,1 мм, що відповідає округленню з урахуванням типових технологічних допусків.

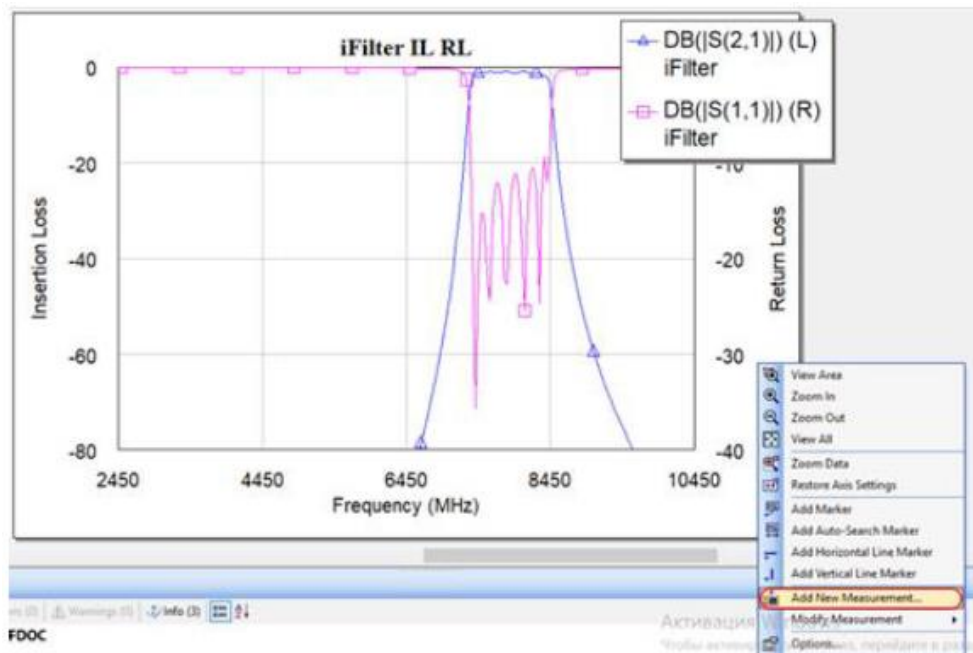
4. Отримання топології фільтра

Відкрийте вікно схемної моделі і натисніть на значок **View Layout** на панелі інструментів. Відкриється вікно топології схемної моделі. Натисніть на панелі інструментів **Edit** і виберіть **Select All**, щоб виділити всю топологію. Натисніть на панелі інструментів **Snap Together**, щоб виправити відображення топології.

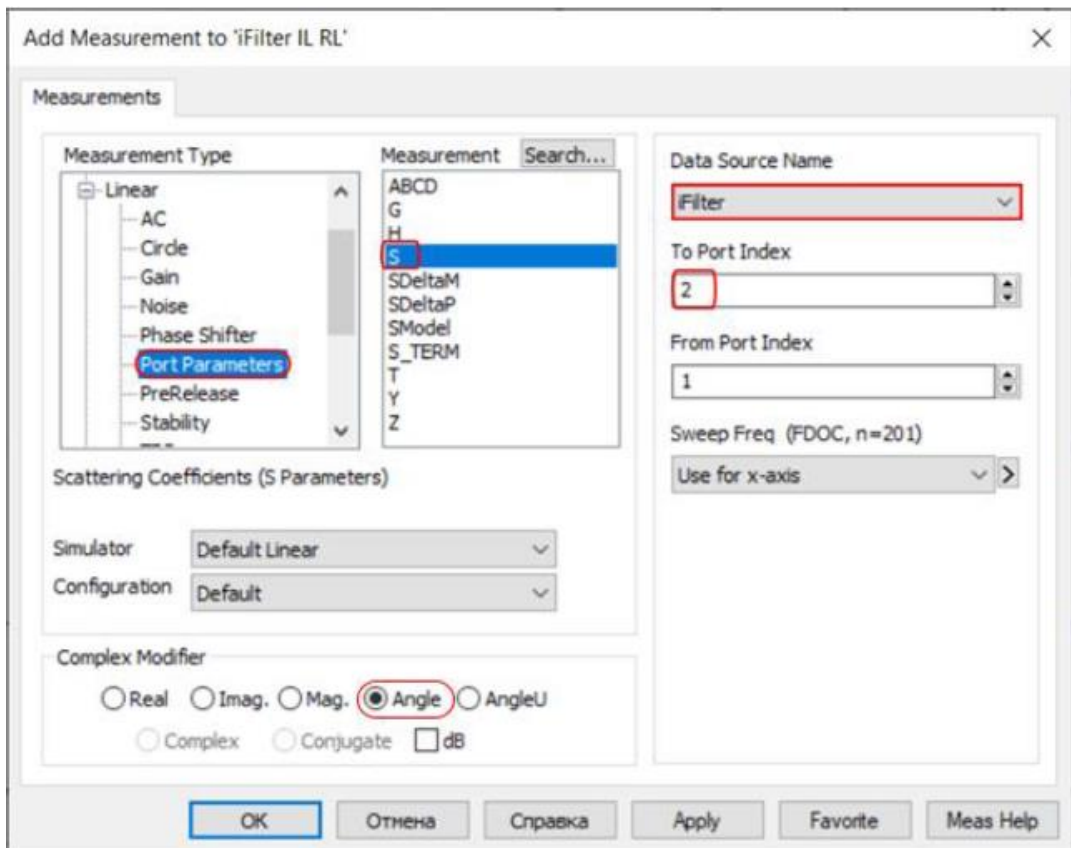


5. Отримання фазочастотної характеристики фільтра та групової затримки

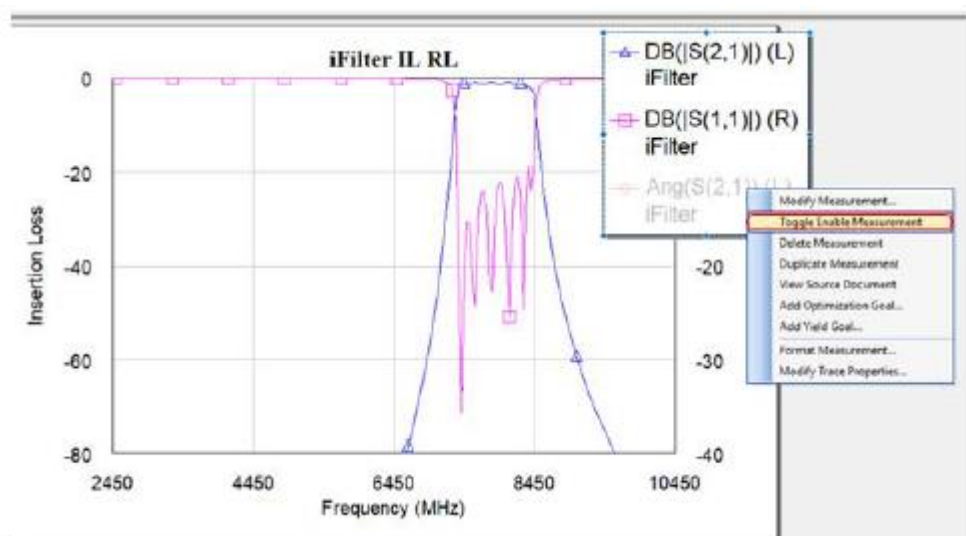
Для отримання фазочастотної характеристики смугопропускного фільтра зайдіть у вікно графіка та нажавши правою клавiшею миші виберемо вкладку **Add new Measurement**.

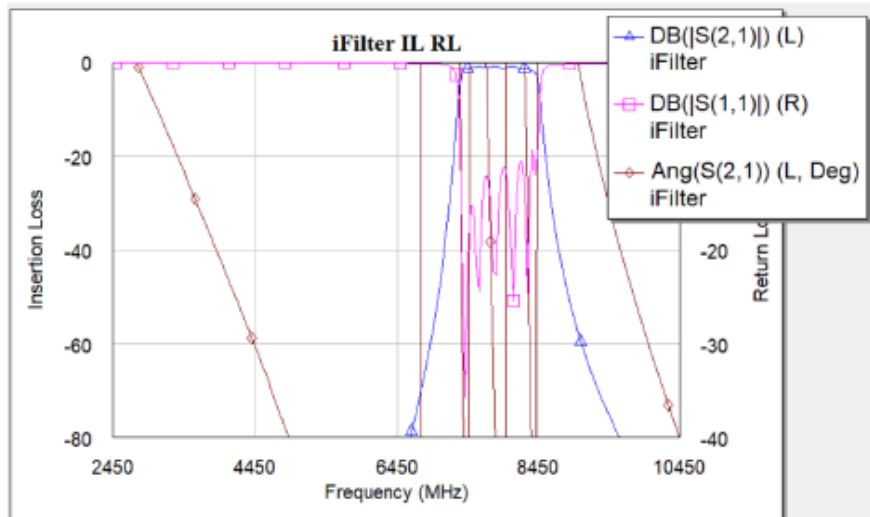


У вікні **Add Measurement to 'Назва_фільтра'** налаштуємо параметри відповідно до рисунку нижче. Після чого натискаємо **OK**.

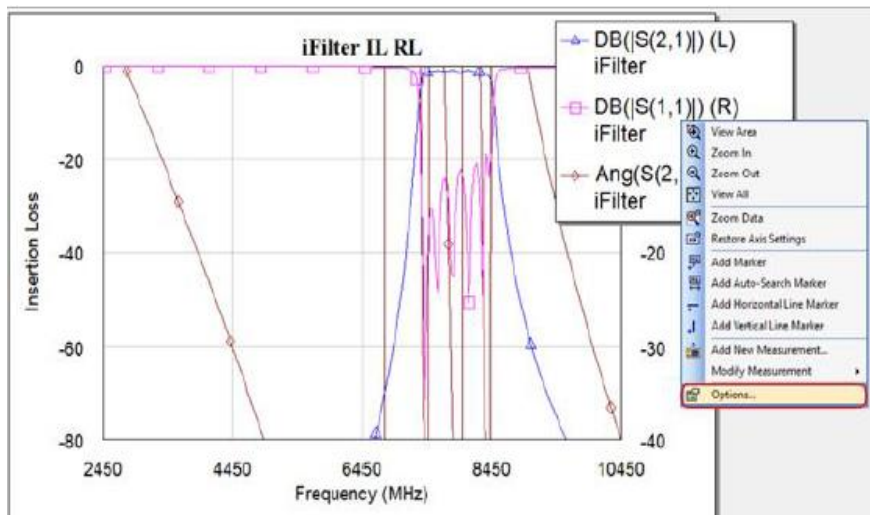


Натиснемо правою клавішею миші на область з назвою **Ang(S(2,1))(L)iFilter** і оберемо **Toggle Enable Measurement** після чого натиснемо на значок (**Analyze**) на панелі інструментів. Після чого маємо отримати графік відповідно до рис. (Якщо не вийде повторіть цю операцію декілька раз)

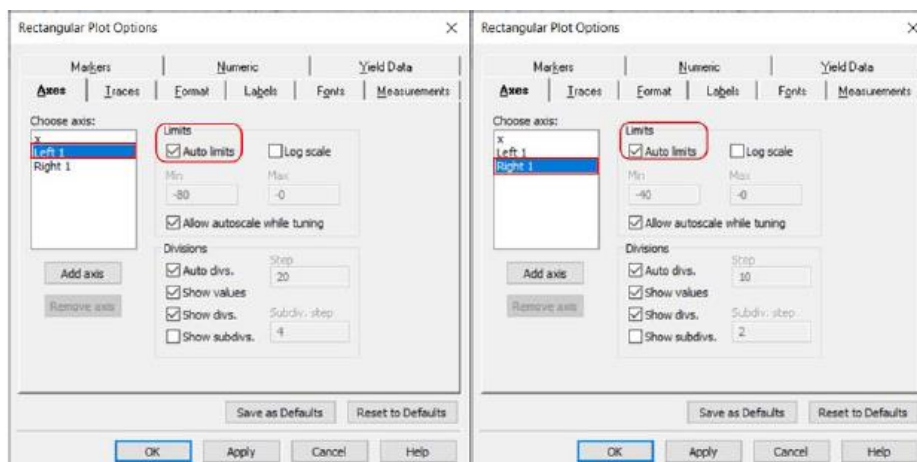




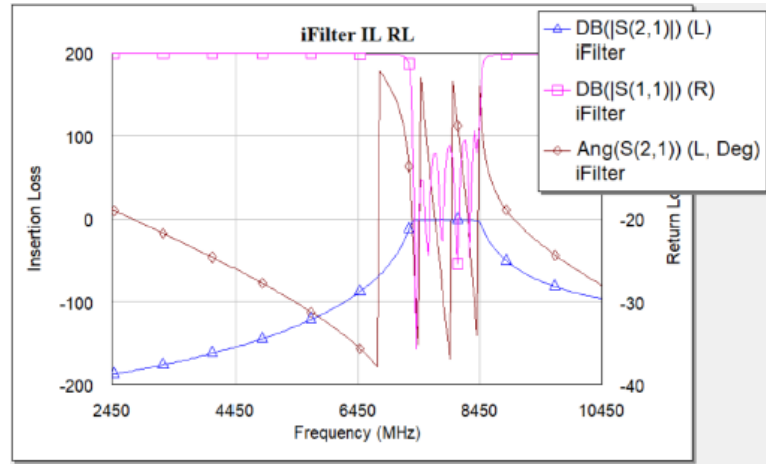
Після чого змінимо масштаб натиснувши правою клавішею миші на вікно графіку та обравши пункт **Options**.



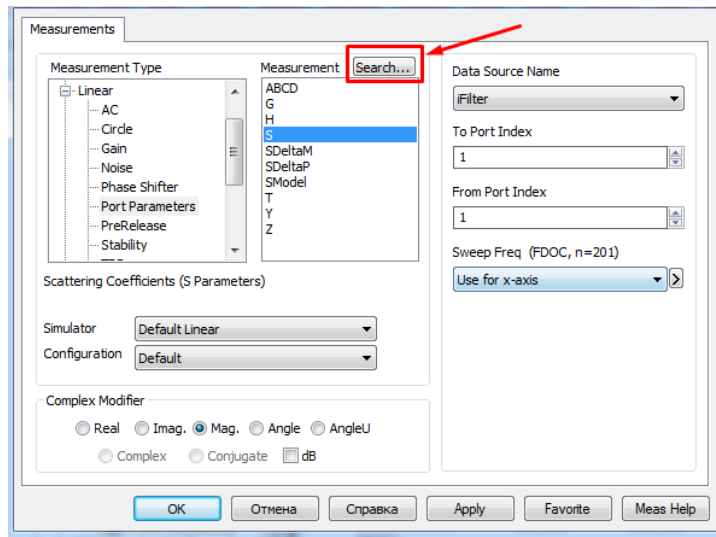
Далі у відкрившомуся вікні обираємо **Left 1** і змінюємо мінімальне значення **Limits** на **Auto limits** (аналогічну операцію робимо з **Right 1**).



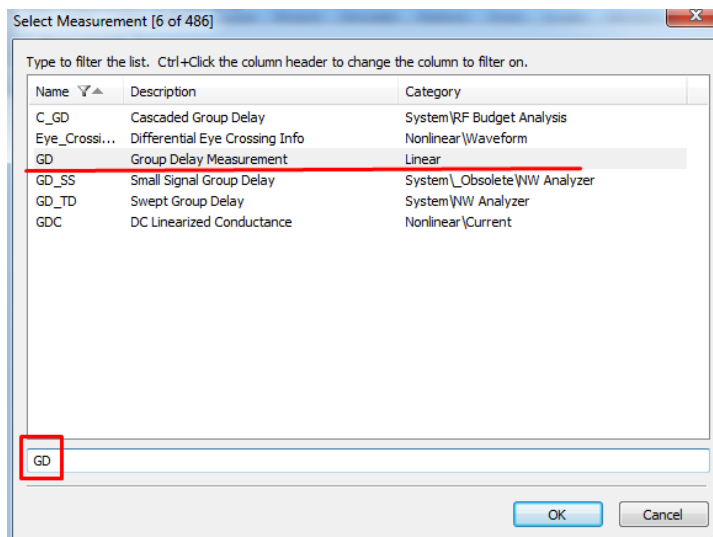
Після чого маємо отримати графік.



Аналогічно робиться і з групою затримкою, але потрібно натиснути на кнопку «Search».



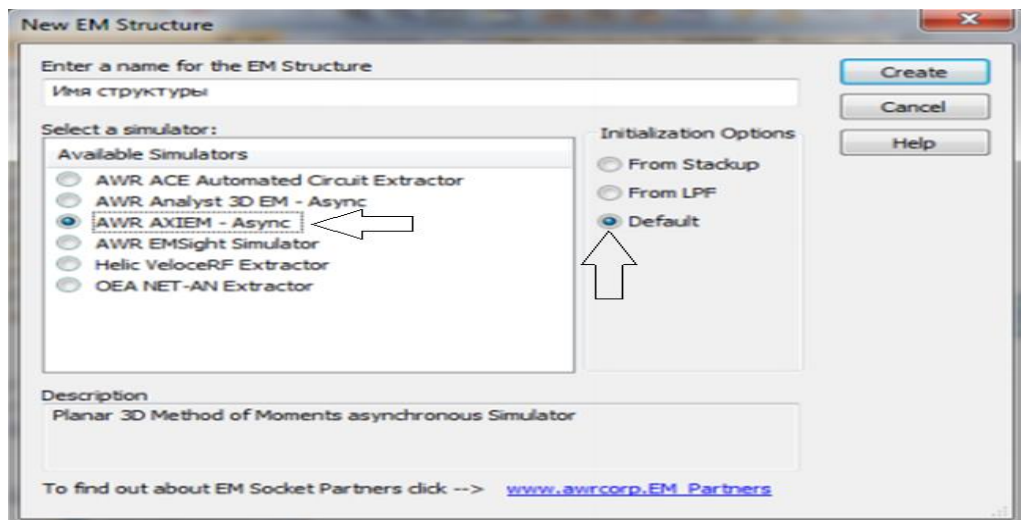
Та ввести «GD», як показано нижче.



Налаштовуєте параметри та тисніть кнопку «ОК».

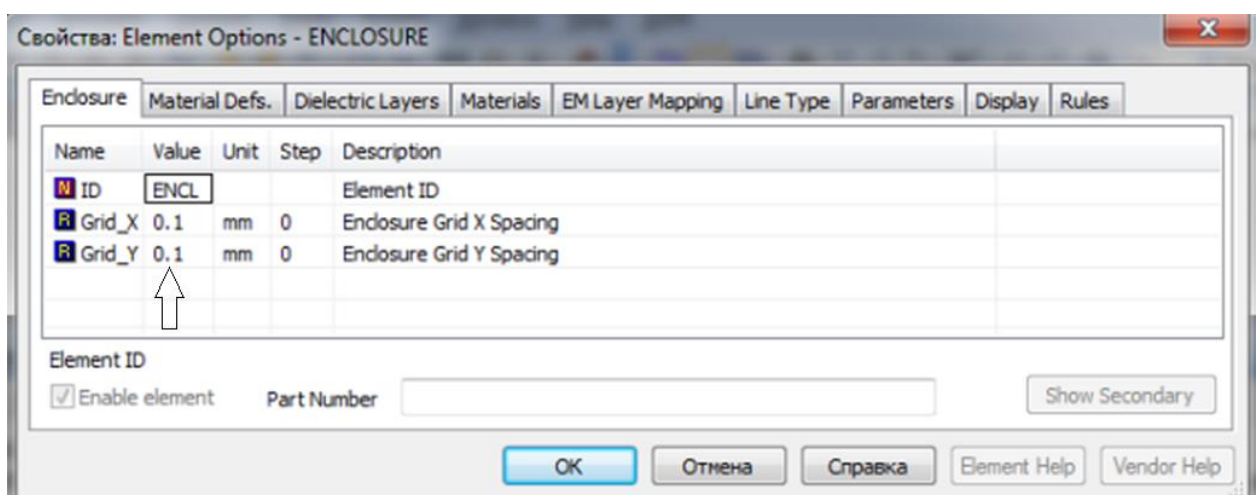
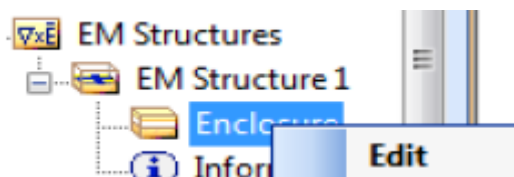
6. Створення електромагнітної моделі фільтру на основійого топології

Для ЕМ-моделювання натисніть правою кнопкою миші на папці **EM Structures** меню **Projects** і виберіть **New EM Structure**. Введіть ім'я бажаної електромагнітної структури, і виберіть тип симулятора



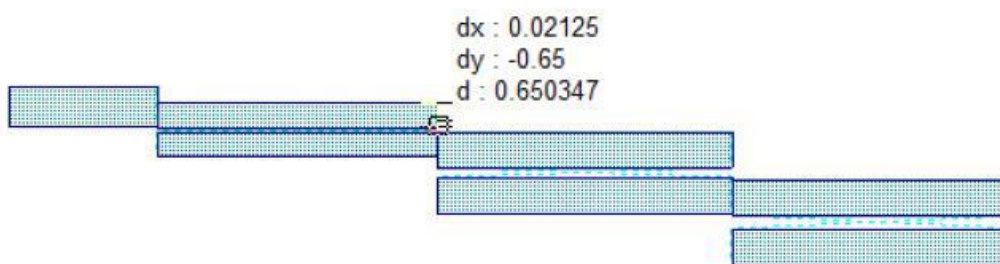
Для налаштування ЕМ-моделі натисніть правою кнопкою миші на пункт **Enclosure** і виберіть **Edit**.

Відкриється вікно налаштування параметрів



У вкладці **Enclosure** налаштовується крок сітки. Він повинен бути в 5 — 10 разів менше мінімального розміру елемента фільтра. Від кроку сітки залежить точність і, як наслідок, час моделювання.

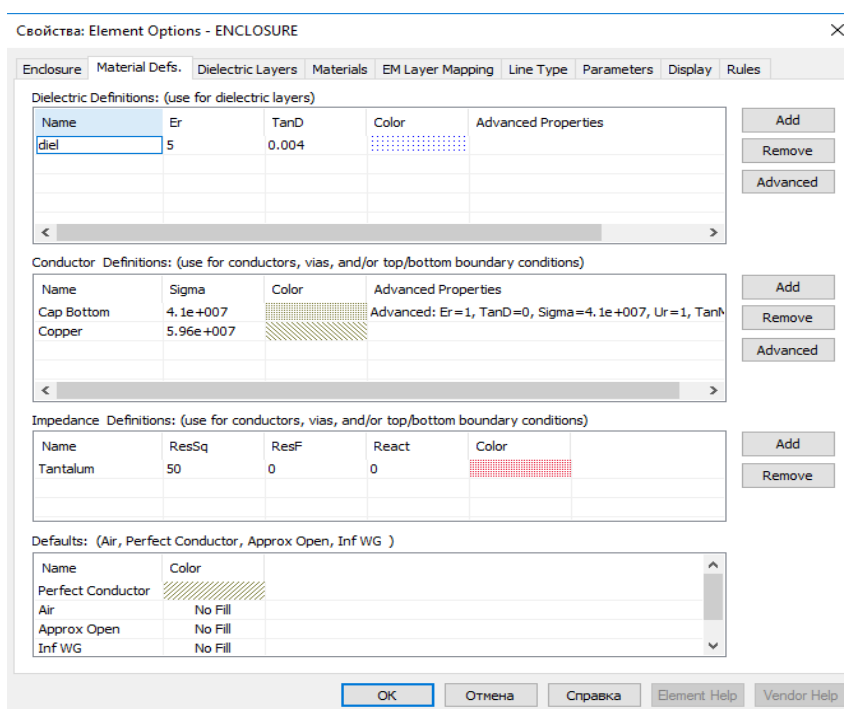
Щоб подивитися мінімальний розмір елемента фільтра, необхідно зайти в пункт панелі інструментів **View** → **View Layout**. Відкриється вікно з фільтром, і необхідно зробити вимір, натиснувши **Ctrl + D**. Візуально визначте найменший розмір і зробіть вимір.



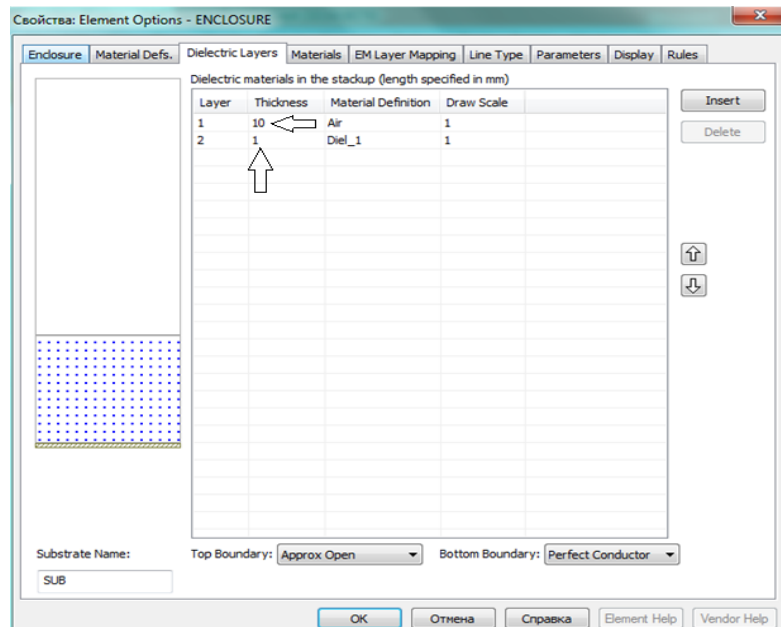
В даному випадку найменшим розміром по осі Y є 0,65 (так як виконувався замір по осі Y, то шуканим значенням є dy , а значення dx є похибкою, пов'язаною з прив'язкою до сітки і неточним розміщенням топології фільтра на сітці).

Відповідно ділимо це значення на 5...10, і вводимо крок сітки в відповідне вікно настройки ЕМ-структури.

Наступна вкладка налаштовується відповідно до рисунку

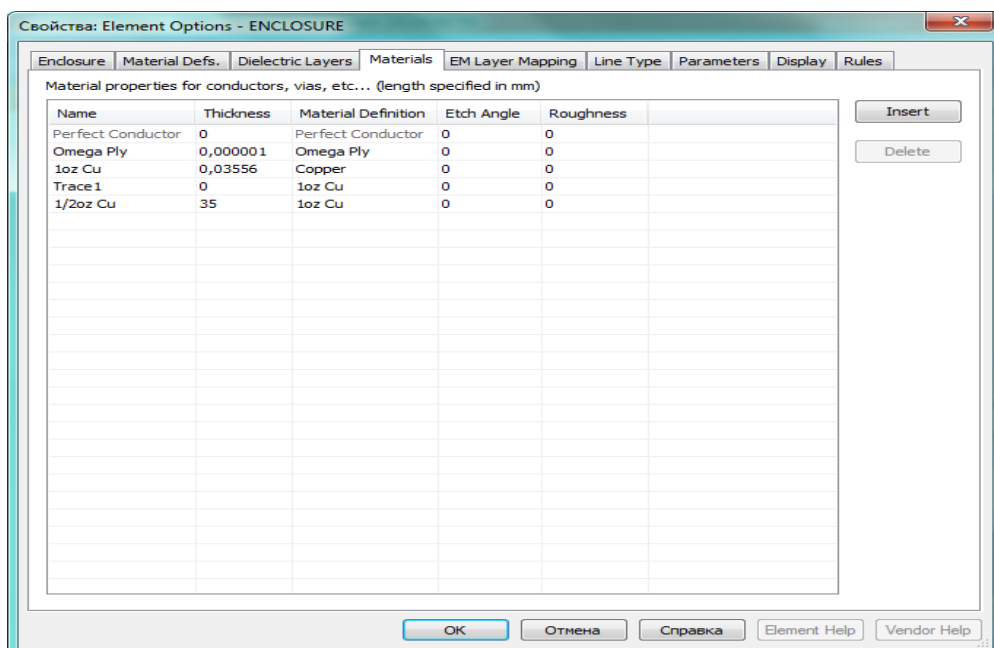


У вікні **Dielectric Definitions** додайте новий діелектрик і налаштуйте його параметри відповідно до індивідуального варіанта завдання. У вкладці **Dielectric Layers** налаштуйте товщину діелектриків. У тому числі і товщину повітря (в 10 - 20 разів більше, ніж товщина діелектрика).

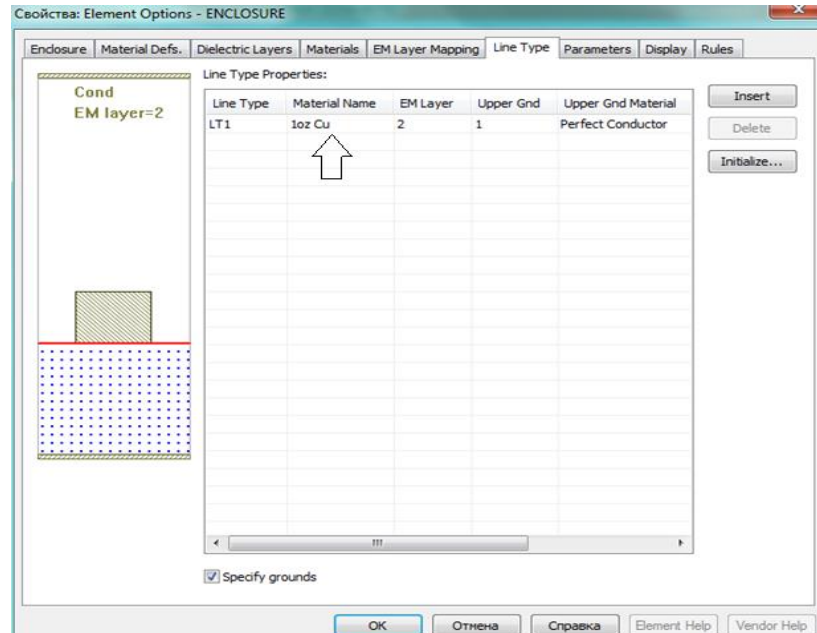


У вкладці **Materials** для шару **Cap Bottom** як матеріал виберіть мідь (Copper) або золото (Gold). Виберіть товщину шару відповідно до товщини провідника на друкованій платі.

Налаштування вкладки **EM Layer Mapping** залиште без змін.

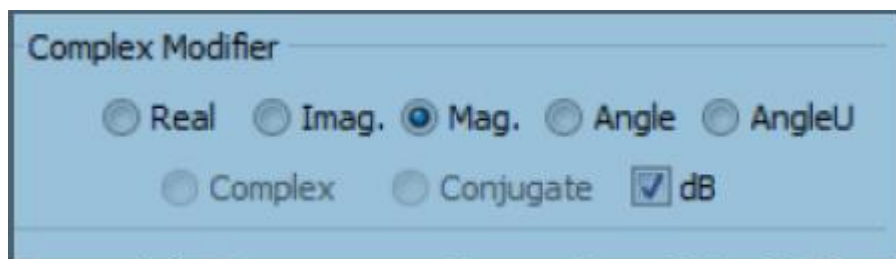


У вкладці **Line Type** встановіть матеріал провідника, обраний в полі **Conductor Definitions** вкладки **Material Defs** (золото/мідь). У стовпці **Upper Gnd Material** виберіть **Perfect Conductor**. На цьому налаштування ЕМ-структури закінчено.



7. Виконання електромагнітного аналізу фільтра

У вкладці **Project** знайдіть вкладку **Graphs** і натисніть на неї правою кнопкою миші. Виберіть **New Graph**. У вікні виберіть прямокутний графік (**Rectangular**). У вкладці **Graph 1** натисніть на неї правою кнопкою миші і виберіть **Add Measurement**. У вкладці **Data Source Name** виберіть створену електромагнітну структуру. У вкладці **Complex Modifier** поставте галочку на **dB**, як показано на рисунку:



Створіть графіки для **S(1,1)** і **S(2,1)**. Для цього у вкладці **To Port Index** задайте значення обох портів рівними **1** (для **S(1,1)**), натисніть **Apply**. Потім задайте в **To Port Index** значення **2** (для **S(1,2)**), натисніть **Apply** і **OK**.

Лабораторна робота №2. Проектування ліній затримки

Мета роботи: проектування лінії затримки з використанням програми Microwave office зі складу програмного пакету AWR Design Environment.

Опис методу проектування

1. Визначити довжину і кількість сегментів лінії затримки (ЛЗ).
2. Визначити довжину кожного сегмента і розбити його на елементи.
3. Створити графік, на якому вивести час затримки, коефіцієнти S_{21} , S_{11} , фазочастотну характеристику.
4. Оптимізувати параметри лінії затримки, щоб отримані графіки відповідали вимогам завдання.

Теоретичні відомості

Лінія затримки — пристрій, призначений для затримки електромагнітних сигналів на певний проміжок часу (фіксований, який перемикається або з плавним регулюванням).

Застосування

Лінії затримки (далі ЛЗ) широко застосовуються в різних областях радіоелектронних технологій — в радіолокації і радіонавігації, вимірювальній техніці, обчислювальній техніці і автоматиці, електроакустиці (ревербератори), техніці зв'язку, в наукових дослідженнях.

Лінії затримки характеризуються параметрами:

Час затримки τ - залежить від довжини шляху, який проходить пружна хвиля в хвилеводі.

Смуга пропускання $\Delta f/f_0$ - залежить в основному від добротності перетворювачів.

Втрати D - величина яка складається з втрат на дворазове електромеханічне перетворення на вході і виході і втрат при поширенні пружних хвиль в хвилеводі.

Рівень хибних сигналів (сигналів, які приходять на вихід ЛЗ з часом затримки, який відрізняється від заданого) - оцінюється як відношення амплітуди помилкового сигналу до амплітуди основного.

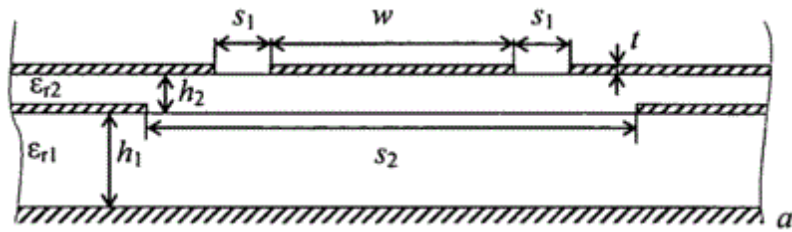
В залежності від призначення в лінії затримки можуть розглядатися й інші параметри.

Лінії затримки з розподіленими параметрами

Найбільш простий спосіб реалізації затримки електричного сигналу — використання як затримуючого середовища ліній передачі певної довжини, так як швидкість поширення сигналу в лініях скінченна і відносно стабільна, сигнал при проходженні через лінію затримується на час пропорційний її довжині. (див. приклад 2.1) Як лінії можуть використовуватися радіочастотні кабелі, стрічкові хвилеводи (рос. полосковые, микрополосковые линии), а також хвилеводи, переважно феритові (з використанням магнітостатичних хвиль). Лінія обов'язково повинна мати добре узгоджене навантаження на виході, для запобігання спотворення сигналу. Історично найбільшого поширення набули кабельні ЛЗ — на коаксіальних кабелях (використовуються в основному як калібраторів затримки) і спіральних кабелях (використовуються в осцилографіях для затримки сигналу відносно початку розгортки і в інших цілях). Кабельні ЛЗ прості по будові, надійні, мають малу дисперсію, широкосмугові (від нуля до сотень мегагерц), недоліком є мала затримка (частки мікросекунди, рідше одиниці мікросекунд).

У чому полягає конструктивна реалізація?

- Вбудовувані безкорпусні ЛЗ у вигляді бухти кабелю з відводами під пайку або з коаксіальним з'єднувачем;
- Вбудовувані ЛЗ на полоскових або феритових хвилеводах у вигляді мікромодуля або мікросхеми;
- ЛЗ як самостійні пристрої (калібратори), мають корпус зі з'єднувачами, можуть містити одну, дві або кілька ЛЗ, а також, додаткові елементи — атенюатор, феритовий вентиль, елементи комутації коаксіальних трактів.



Приклад 2.1. Мікрополоскова лінія зі стабільною затримкою

Штучні ЛЗ

Штучна ЛЗ (рис. 2.1. та 2.2.) являє собою послідовність ланок, що імітують реальну лінію. Як ланки можуть бути використані LC-схеми з конденсаторів, індуктивних елементів або, в деяких випадках (у НВЧ-техніці), резонатори з розподіленими параметрами. Штучні ЛЗ застосовуються для затримки імпульсів в пристроях радіолокації, радіонавігації, для затримки НВЧ сигналів і в інших цілях, виконуються найчастіше у вигляді модулів з багатьма відводами, що дозволяє отримати різні значення затримки; існують також ЛЗ з регульованою затримкою. Штучні ЛЗ дозволяють отримати більші значення затримки ніж природні лінії на кабелях і хвилеводах, однак незручні тим, що мають малий робочий діапазон, тому поступово замінюються цифровими ЛЗ — в імпульсній техніці і акустичними — в НВЧ-техніці.

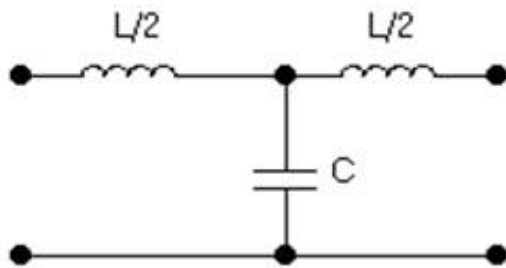


Рис 2.1. Штучна ЛЗ із використанням одного конденсатора

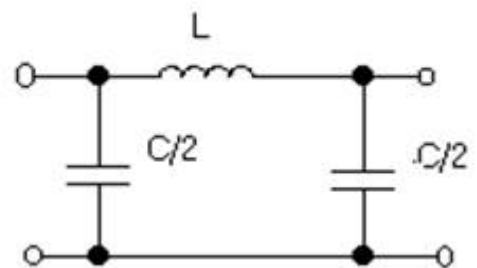


Рис. 2.2. Штучна ЛЗ із використанням однієї індуктивності

Ультразвукові ЛЗ

Принцип роботи ультразвукових ЛЗ (рис. 2.3.) полягає в тому, що електричний сигнал за допомогою електромеханічного перетворювача перетворюється в механічні коливання, які потім поширюються у вигляді пружних хвиль за певним напрямом через звукопровід і далі знову перетворюються в електричний сигнал. Час затримки вихідного сигналу щодо вхідного визначається акустичними параметрами середовища звукопровода, його розмірами і конфігурацією і типом хвиль. Акустичні хвилі, які використовуються в ЛЗ можуть бути різних видів і типів — поверхневі та об'ємні, поперечні (хвилі зсуву), поздовжні (хвилі стиснення), крутильні. За типом звукопроводу ЛЗ підрозділяються на хвилеводні (стрічкові і дротові) і, більш прості у виготовленні, ЛЗ з багаторазовим відбиттям (з прямим ходом променя, згорнуті, багатокутні, клиновидні). Як електромеханічні перетворювачі застосовуються, зазвичай, п'єзоелектричні або магнітострикційні перетворювачі. Для затримки НВЧ сигналів виникає необхідність транспортувати спектр вхідного сигналу в більш низькочастотну область, для нормальної роботи акустичної частини, а потім відновити сигнал, в цьому випадку на вході і на виході встановлюються перетворювачі частоти, так як обидва перетворювача працюють з одним високостабільним гетеродином, на практиці можна вважати, що спектр

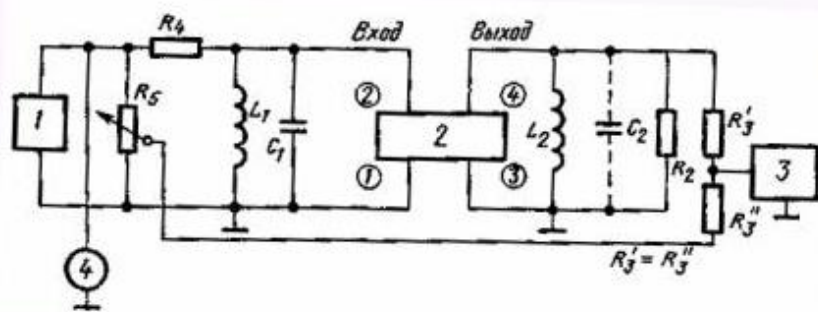


Рис.2.3. Схема ультразвукової ЛЗ

вихідного сигналу ідентичний спектру вхідного.

Ультразвукові ЛЗ мають затримку від часток мілісекунди до десятків мілісекунд і використовуються для затримки сигналу кольоровості у телевізійних приймачах, як одиниця часового інтервалу у вимірювальній техніці, як калібратори відстані (висоти) для радіолокаційних і радіонавігаційних пристроїв, як запам'ятовуючі пристрої в обчислювальній і радіолокаційній техніці, в інших цілях.

Цифрові ЛЗ

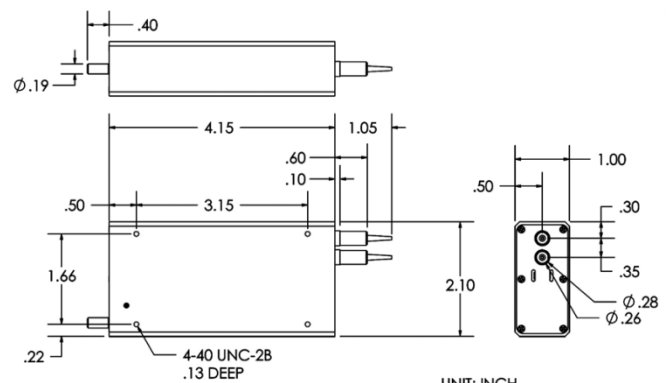
Цифрова лінія затримки являє собою цифровий пристрій, призначений для затримки цифрових сигналів у часі на задане число тактів. Час затримки в таких лініях або фіксований, або може програмуватися ззовні. Одна лінія може мати кілька «відводів», дозволяючи отримати ряд сигналів, кожен з яких буде мати свій часовий зсув на задане число тактів синхронізації.

Оптичні ЛЗ

В оптичних ЛЗ (приклад 2.2.) світло затримується в процесі проходження через оптичне середовище з низькою швидкістю поширення сигналу, тобто з високим показником заломлення. Найбільш поширеними є волоконно-оптичні ЛЗ (аналогічно кабельним — для радіодіапазону), існують також ЛЗ у вигляді набору плоскопаралельних пластин з кварцового скла (ешелони Майкельсона), на базі дифракційних ґраток і призм, а також призмисто-лінзові. Для отримання можливості використання оптичної затримки в інтегральних мікросхемах фахівці ІВМ розробили модель принципово нової ЛЗ, що складається з безлічі послідовних «мікрокільцевих резонаторів», тобто свого роду штучну лінію.

У лабораторній роботі досліджується полоскова ЛЗ, яка володіє найкращими характеристиками в діапазоні НВЧ при забезпеченні затримки в діапазоні від 10 до 100 нс. Решта типів ЛЗ поступаються за масогабаритними показниками, не призначені для такого малого часу затримки, або мають істотне загасання на НВЧ.

Можлива реалізація як на симетричній, так і на несиметричній полосковій лінії. Використання несиметричної лінії доцільно при необхідності коригування топології після виготовлення. Симетрична лінія не дає такої можливості, але дозволяє на 30 - 40% зменшити габаритні розміри плати, на якій виконана ЛЗ. Тому лабораторна робота присвячена проектуванню лінії затримки на симетричній смуговій лінії.



Приклад 2.2 VDL-001 – оптична ЛЗ з ручним регулюванням

Практична частина

Лабораторна робота №2. Проектування ліній затримки

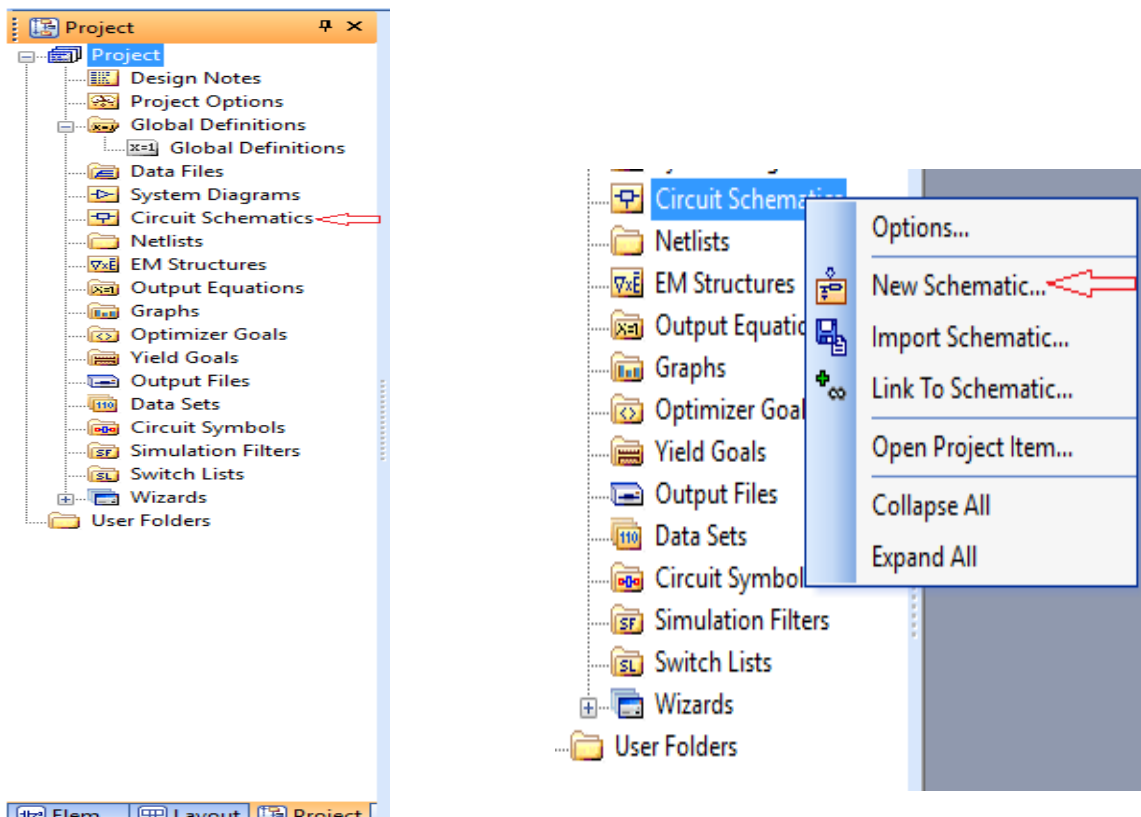
Вихідні дані

Вихідними даними для виконання лабораторної роботи є:

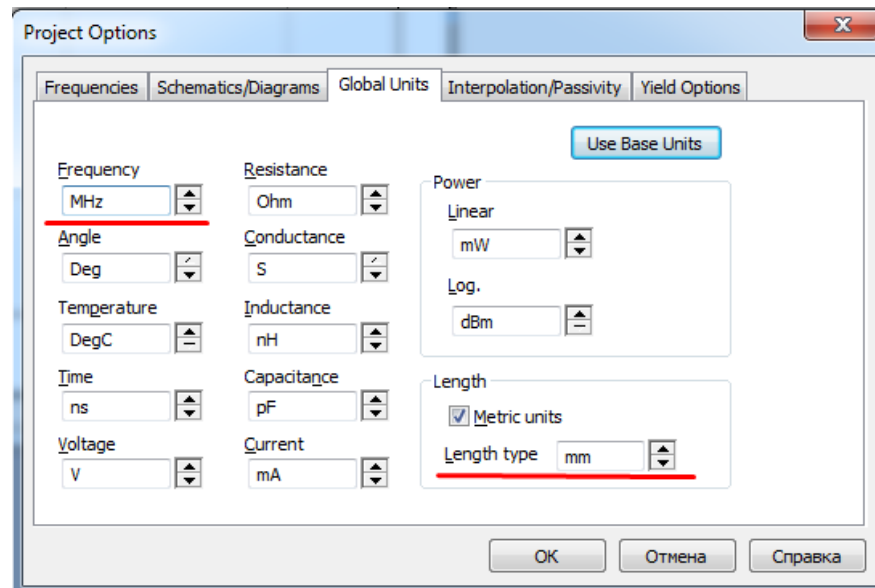
- номінальний час затримки $\tau=10$ нс;
- діапазон робочих частот від $f_1=4$ ГГц до $f_2=5$ ГГц;
- матеріал діелектрика ФЛАН-5,0.

1. Створити схемну модель лінії затримки в середовищі AWR Design Environment (Середовище проектування)

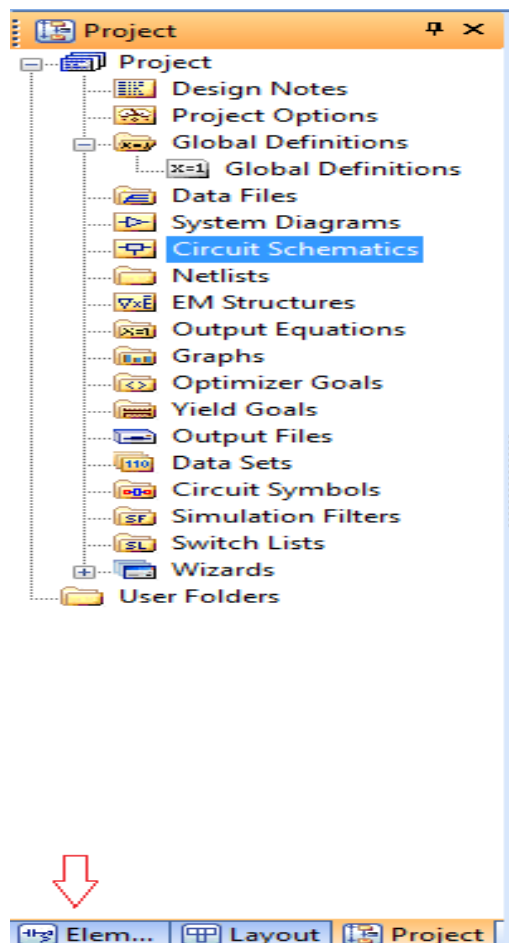
1.1. Щоб створити схемну модель в списку проекту, натискаємо правою кнопкою миші Circuit Schematic(принципова схема) і обираємо New Schematic(Нова схема).



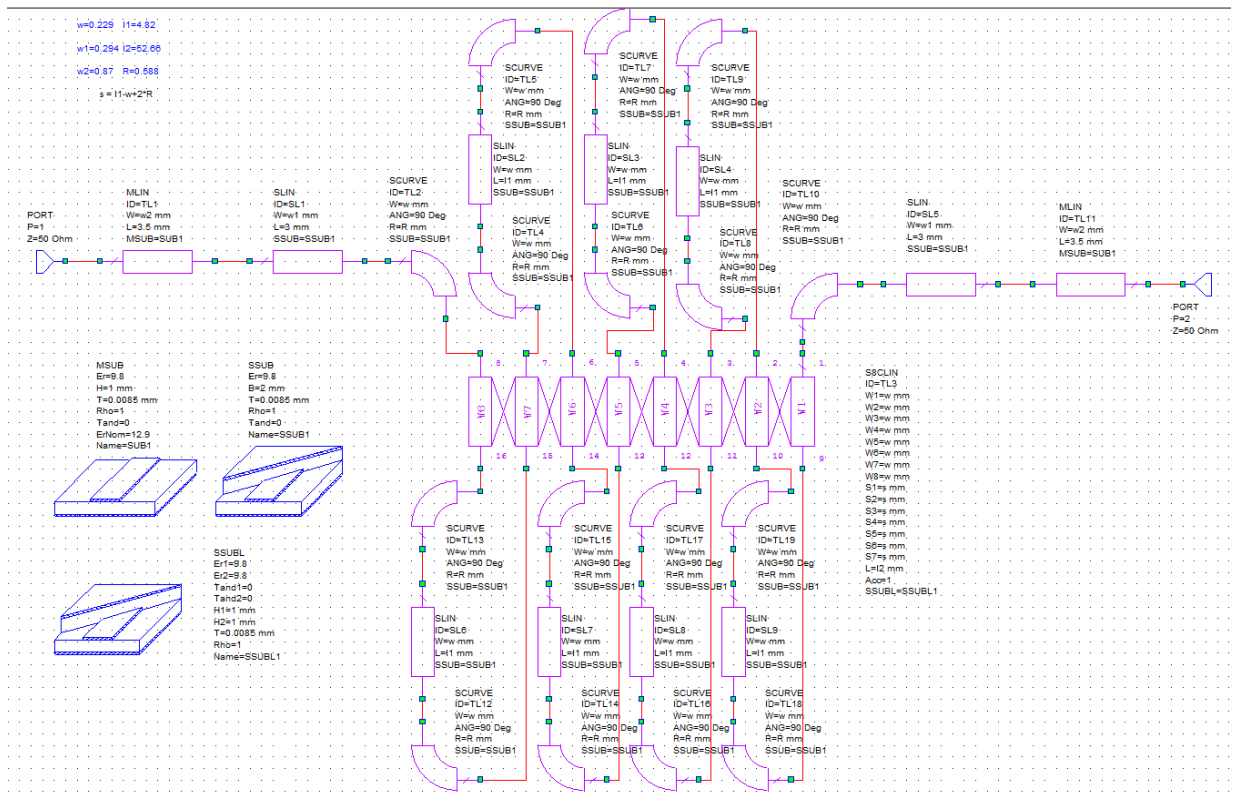
1.2. Вказуємо розмірність величин, з якими будемо працювати. Для цього у вкладці **Options** обираємо **Project Options**. У відкритому вікні на вкладці **Global Units** задаємо розміри в mm та частоти у MHz.



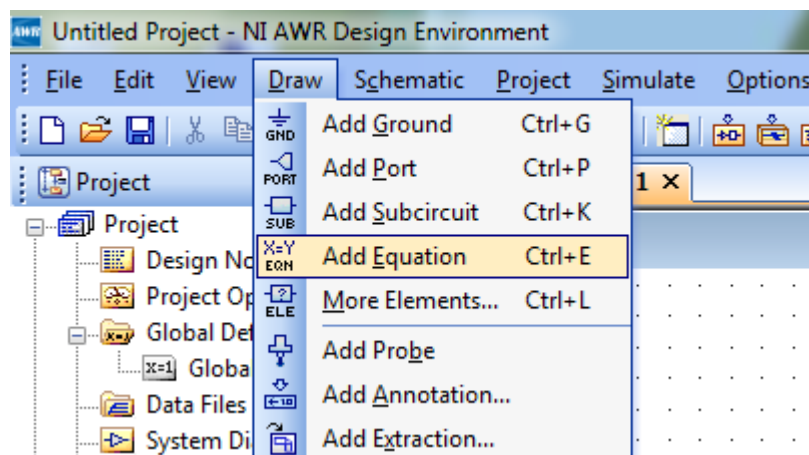
1.3. Щоб додати елементи в схемну модель ЛЗ, переходимо на вкладку Elements(Елементи) в лівому нижньому кутку програми.



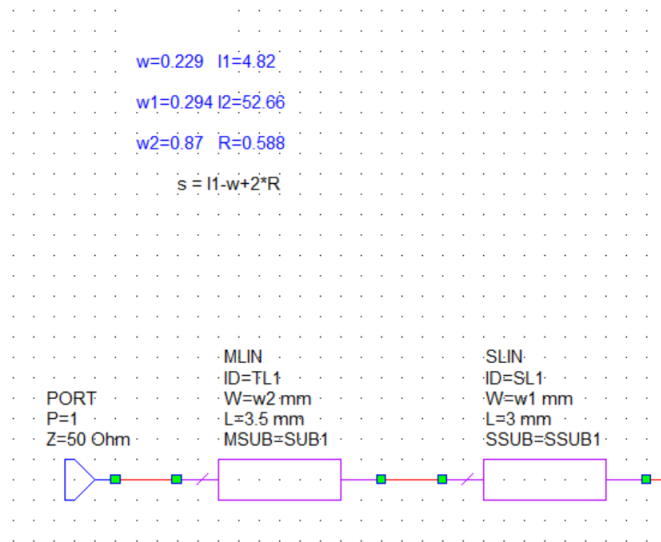
1.4. Шляхом додавання відповідних елементів (бібліотеки Elements(Елементи)→Stripline(Полоскова лінія)→Coupled lines (Зв'язані лінії), Ports (Порти), Substrates (Підкладки)) повинна вийти модель ЛЗ.



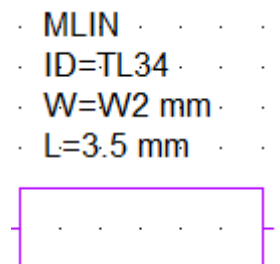
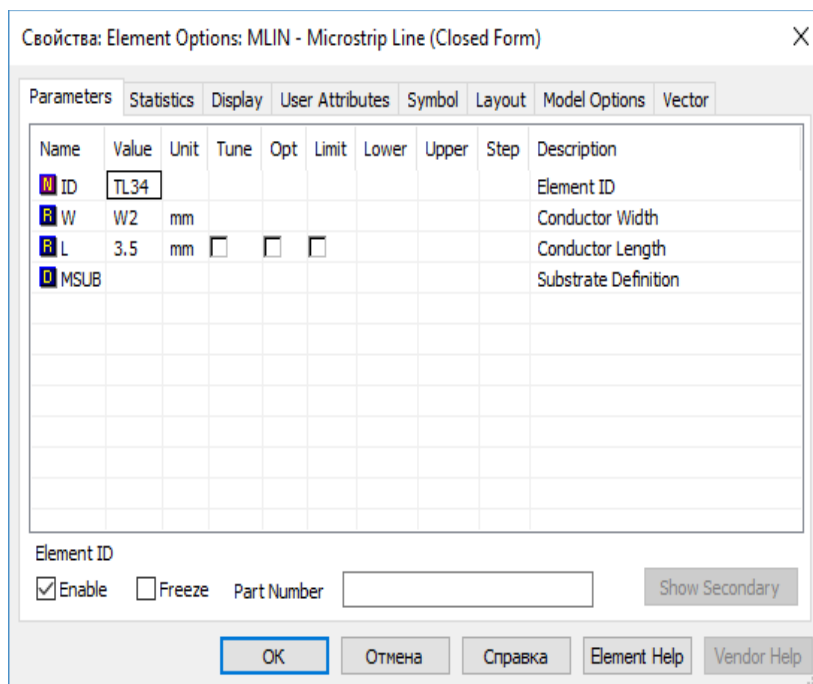
1.5. Додаємо до схеми змінні, та задаємо їх значення у відповідних елементах. Обираємо у вкладці Draw пункт Add Equation.

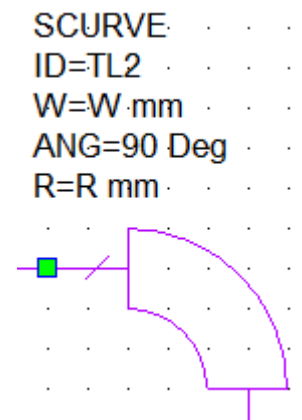
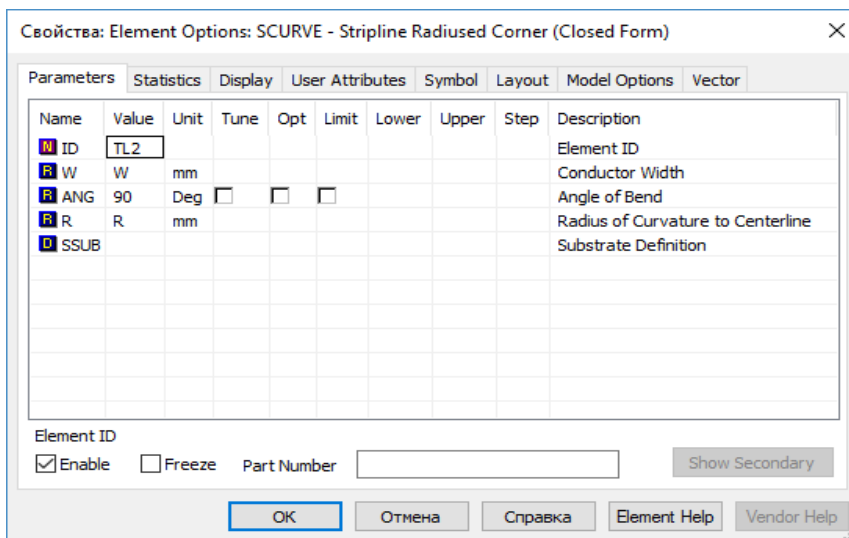
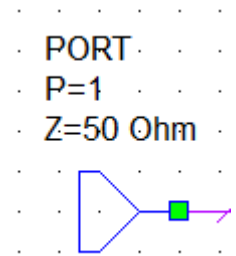
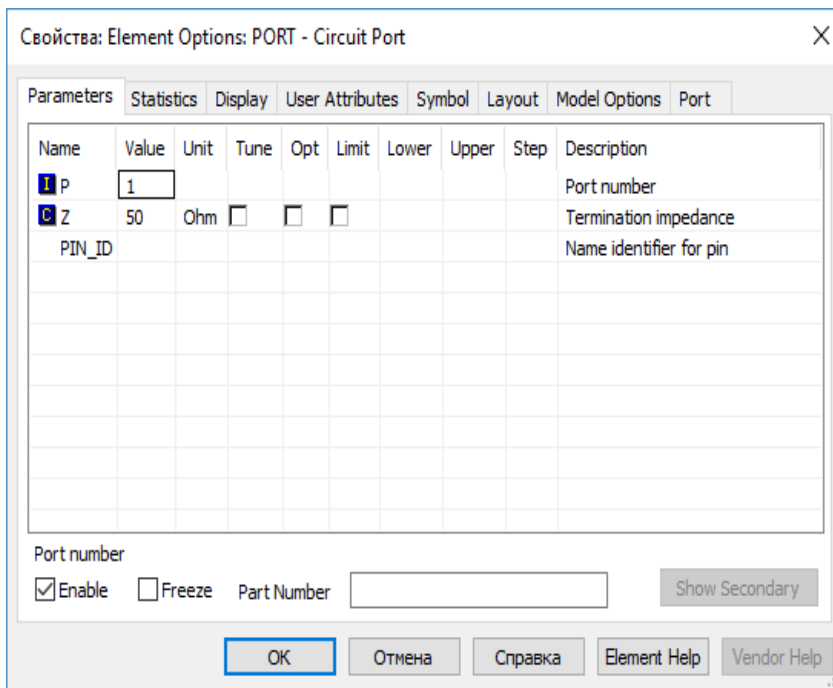


Після чого додаємо до схеми необхідні змінні, які в подальшому будуть регулюватись за допомогою інструменту Tune.



1.6. Задаємо значення для кожного з елементів натиснувши правою клавiшою мишки на елемент ->натискаємо на Properties(Властивiсть) і вписуємо потрібнi значення.



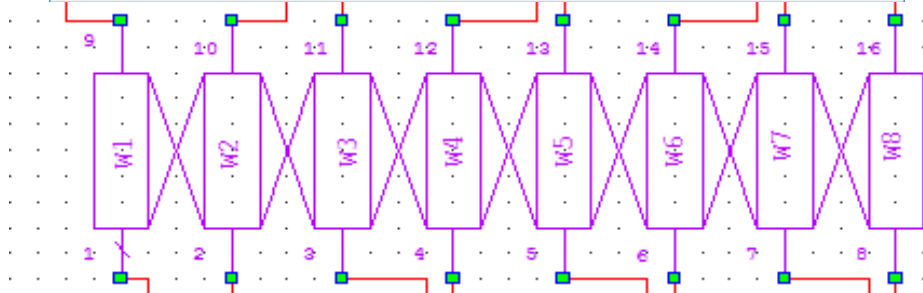


Свойства: Element Options: S8CLIN - 8 Edge Coupled Striplines (EM Quasi-Static)

Name	Value	Unit	Tune	Opt	Limit	Lower	Upper	Step	Description
ID	TL36								Name
W1		W							Conductor 1 Width - Nodes 1&&9
W2		W							Conductor 2 Width - Nodes 2&&10
W3		W							Conductor 3 Width - Nodes 3&&11
W4		W							Conductor 4 Width - Nodes 4&&12
W5		W							Conductor 5 Width - Nodes 5&&13
W6		W							Conductor 6 Width - Nodes 6&&14
W7		W							Conductor 7 Width - Nodes 7&&15
W8		W							Conductor 8 Width - Nodes 8&&16
S1		S							Gap Width - Conductors 1&&2
S2		S							Gap Width - Conductors 2&&3
S3		S							Gap Width - Conductors 3&&4
S4		S							Gap Width - Conductors 4&&5
S5		S							Gap Width - Conductors 5&&6
S6		S							Gap Width - Conductors 6&&7
S7		S							Gap Width - Conductors 7&&8
L	L2	mm							Conductor Length
Acc	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Accuracy parameter
SSUBL									Substrate Definition

Name: Enable Freeze Part Number: Show Secondary

OK Отмена Справка Element Help Vendor Help

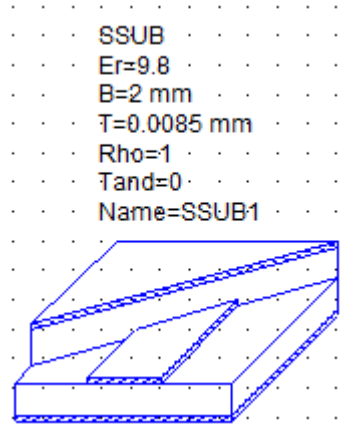


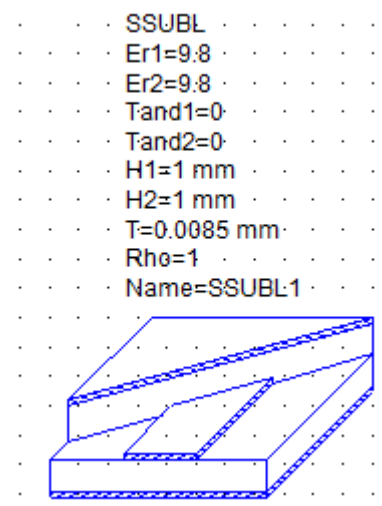
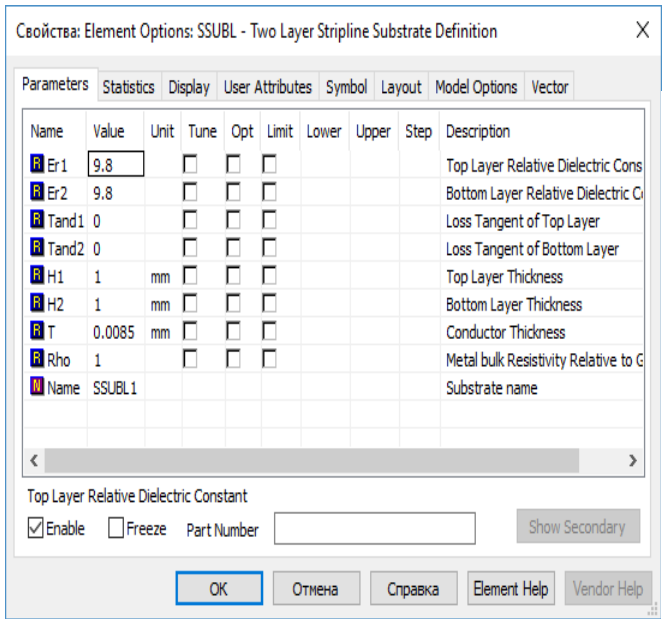
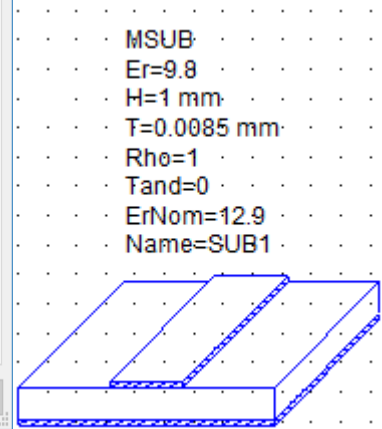
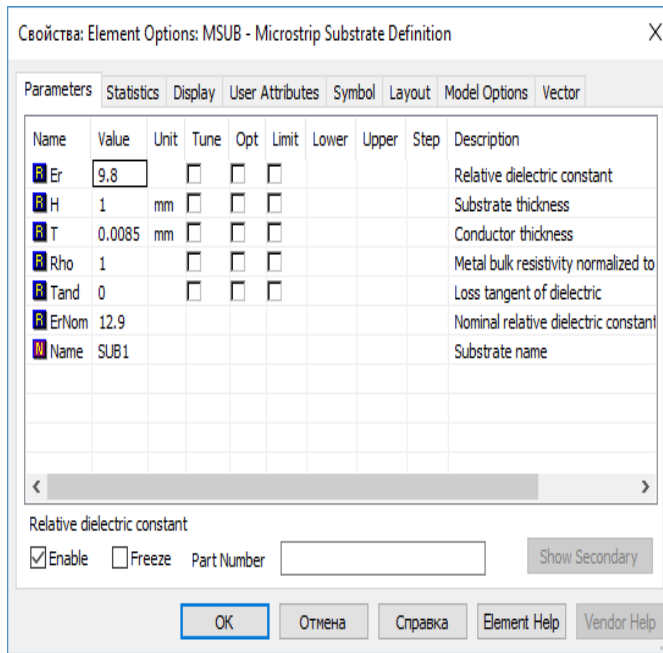
Свойства: Element Options: SSUB - Balanced Stripline Substrate Definition

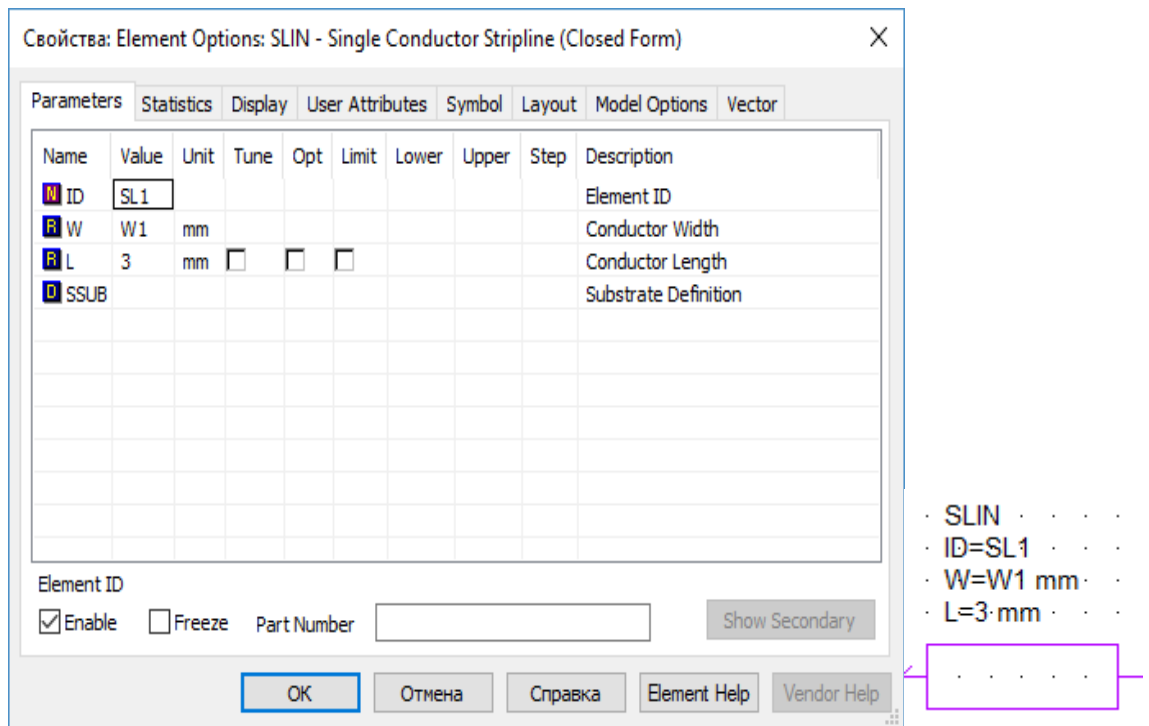
Name	Value	Unit	Tune	Opt	Limit	Lower	Upper	Step	Description
Er	9.8		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Relative Dielectric Constant
B	2	mm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Substrate thickness
T	0.0085	mm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Conductor Thickness
Rho	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Metal bulk resistivity normalized to
Tand	0		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Loss Tangent of Dielectric
Name	SSUB1								Substrate name

Relative Dielectric Constant: Enable Freeze Part Number: Show Secondary

OK Отмена Справка Element Help Vendor Help

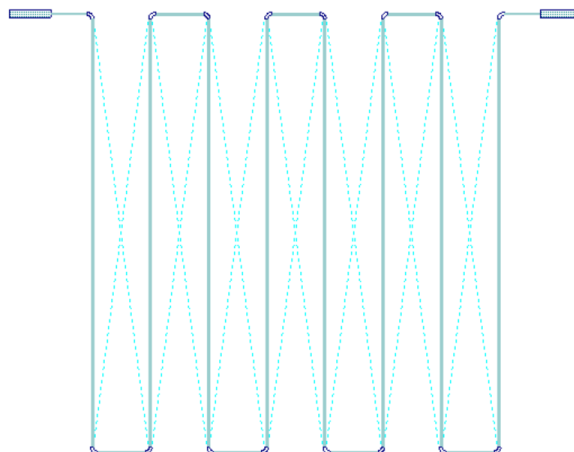
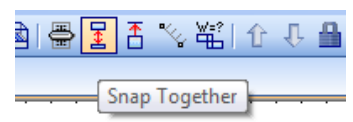




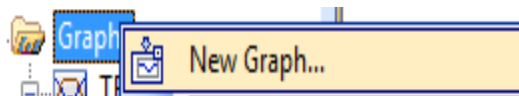


2. Створення графіка

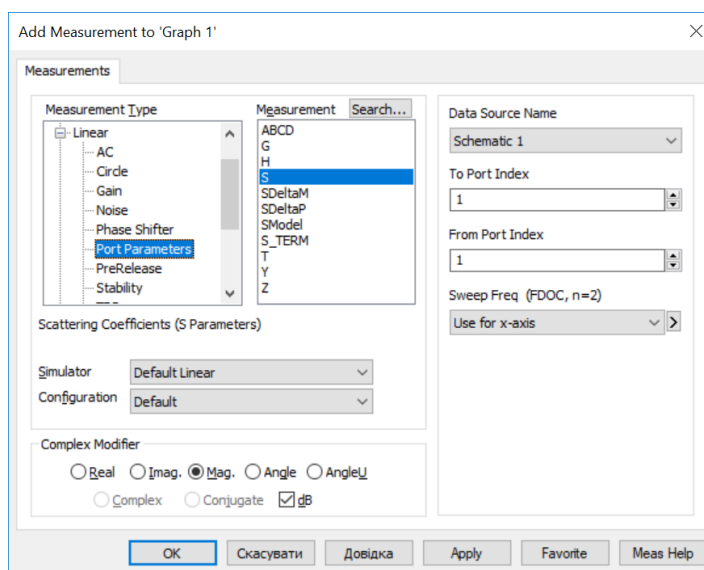
2.1. Для отримання топології нашої схеми натиснемо View Layout. У разі якщо елементи не згруповані, за допомогою комбінацій клавіш **ctrl+A** виберемо усі елементи на натиснемо Snap Together.



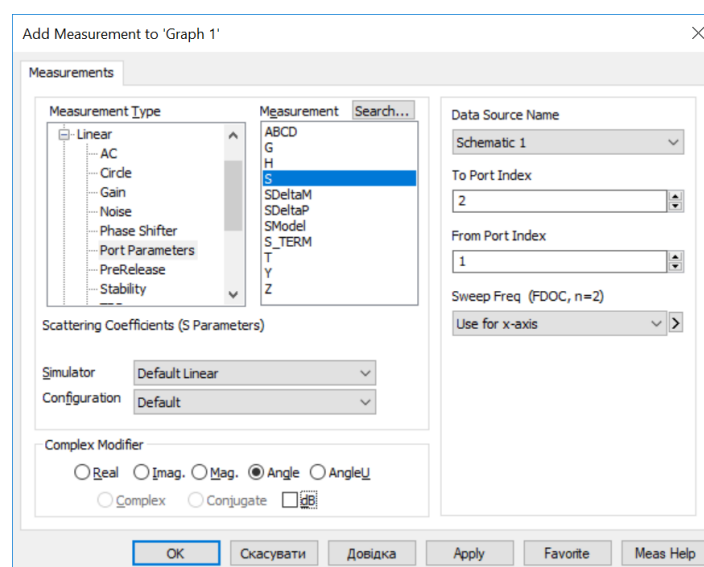
2.2. Щоб створити графік, натискаємо правою кнопкою миші на пункті Graphs(Графіки)→New Graph(Новий графік).



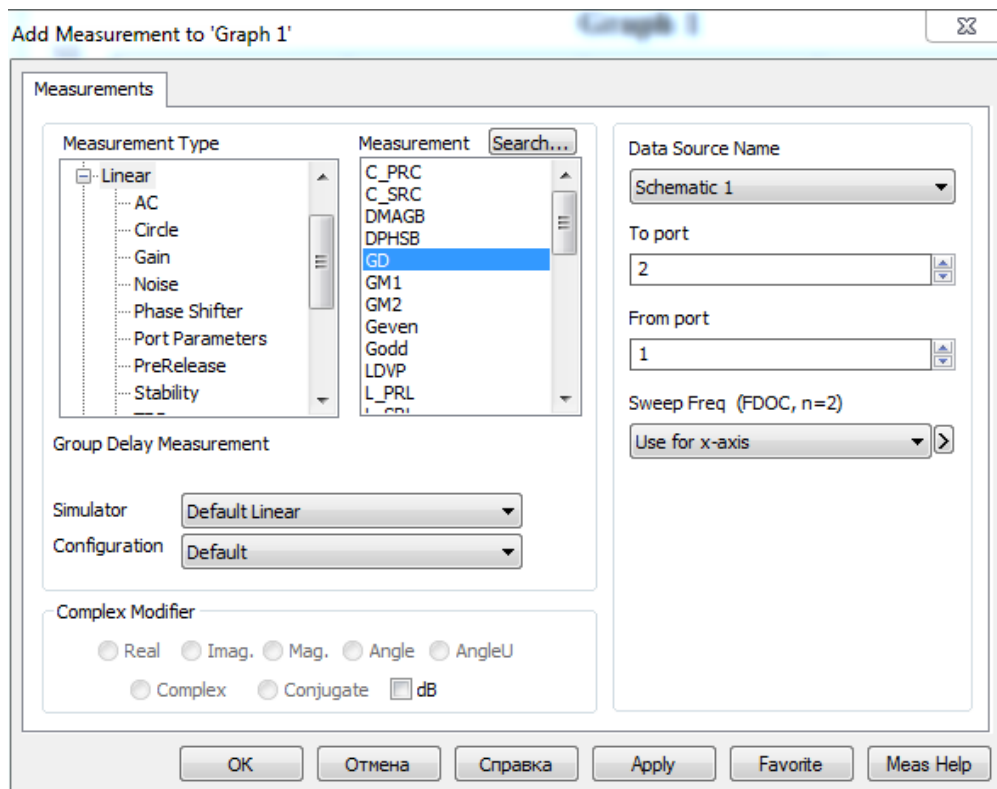
2.3. Натиснувши пкм, обираємо пункт Add New Masurment. Додаємо характеристику S_{11} та вказуємо відображення в децибелах. Характеристика S_{12} задається аналогічно, за винятком індексів портів (Port Index) входу/виходу.



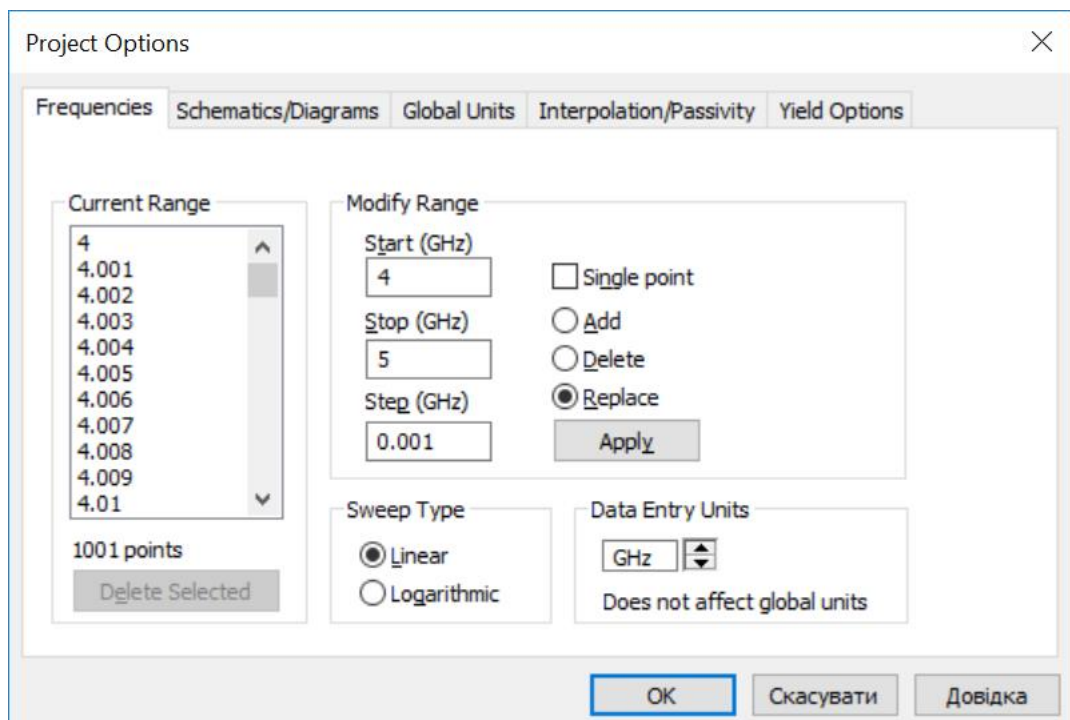
‘Для задання фазової характеристики, нам необхідно змінити величину Mag на Angle, та прибрати розмірність децибел.



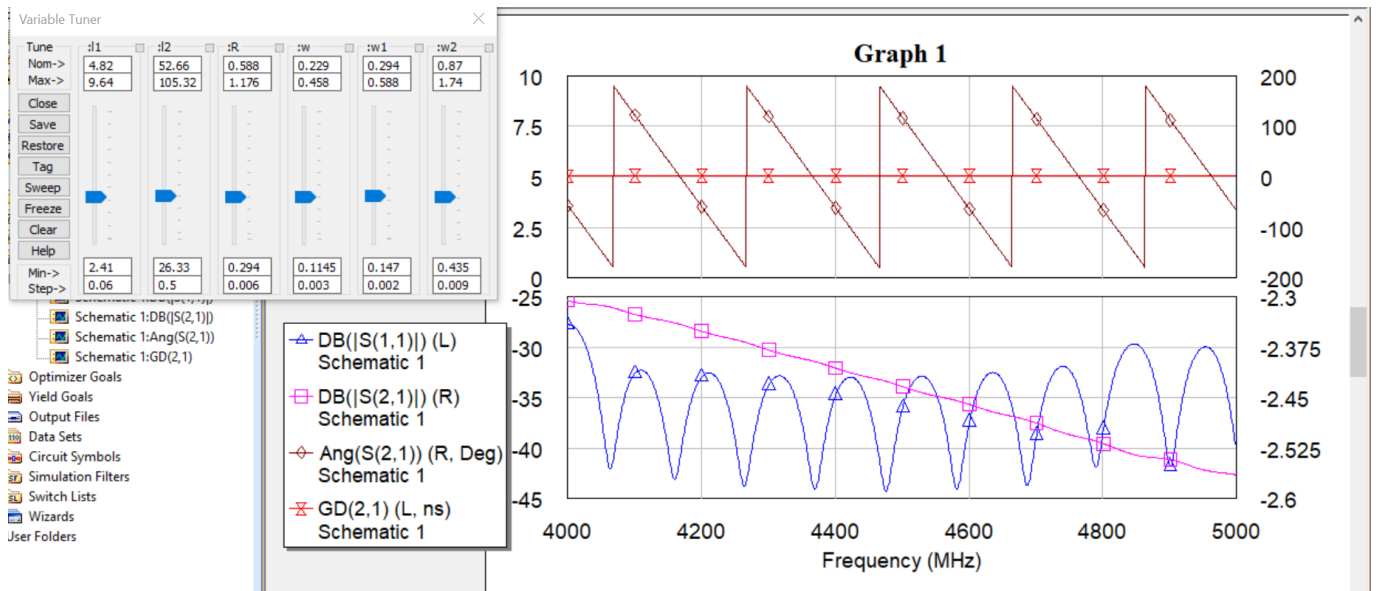
Задаємо характеристику групового часу затримки (Group Delay, GD)



2.4. Задаємо діапазон частот в якому будемо працювати. Для цього у вкладці Options оберемо Project Option. Вказуємо граничні значення частот та крок. Тиснемо Apply та Ок.



2.5. Тиснемо на панелі інструментів Analyze та отримуємо характеристики. Для їх редагування скористаємось інструментом Tune натиснувши F9.



Регулюючи параметри схеми за допомогою Tune, отримуємо стабільне значення часу затримки (GD) на всій полосі частот на рівні у 5ns (червоний графік).

Висновок

Технічне завдання на проектуванні лінії затримки було виконано за допомогою програми Microwave Office зі складу програмного пакету AWR Design Environment , яка допомогла нам створити схемну модель лінії затримки та проаналізувати її. Результатом аналізу схемної моделі були графіки характеристик , в які ми добавляли нові виміри і налаштовували їх. Також за допомогою програми Microwave Office ми навчилися оптимізувати характеристики , змінюючи довжини провідників , щоб домогтися необхідної величин затримки. Ще модуль Microwave Office дозволив виконати аналіз схемної моделі, результатом якої є топологія лінії затримки. При виконанні даної роботи ми дізнались , що таке лінії затримки, які вони бувають та як реалізуються за допомогою програми Microwave Office зі складу програмного пакету AWR Design Environment.

Список використаної літератури:

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Лінія_затримки
2. <http://moehobi.com/nutroshhi-liniyi-zatrimki/>
3. http://femto.com.ua/articles/part_1/1963.html
4. <http://poznayka.org/s73655t1.html>
5. А. С. Подстригаев « ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ- УСТРОЙСТВ: ПРАКТИКУМ»

Лабораторна робота №3. Проектування дільника потужності

Мета роботи: дослідження дільника потужності та проектування його роботи.

Опис методу проектування

- У лабораторній роботі потрібно розрахувати дільник потужності і перевірити правильність розрахунку на схематичній моделі.
- Відповідно до заданих коефіцієнтів ділення необхідно розрахувати кількість секцій і коефіцієнт ділення кожної секції. В середовищі **AWRDE** необхідно послідовно створити і оптимізувати схематичні моделі цих секцій.
- Після цього збирається схематична модель дільника і оптимізується для дослідження заданих коефіцієнтів передачі на заданій частоті.

Порядок виконання лабораторної роботи ми розглянули на прикладі дільника потужності(ДП) на п'ять (коефіцієнт ділення $N = 5$). Це означає, що ДП має один вхід та п'ять виходів. Причому потужність ділиться між всіма виходами порівну. Результати для інших варіантів будуть приведені в кінці звіту.

Теоретичні відомості

Дільник потужності - багатополісник СВЧ для розподілу сигналу, який проходить по лінії зв'язку. При цьому форма сигналу повинна залишатися незмінною. Його головна задача – узгодження хвильових опорів в електричному колі.

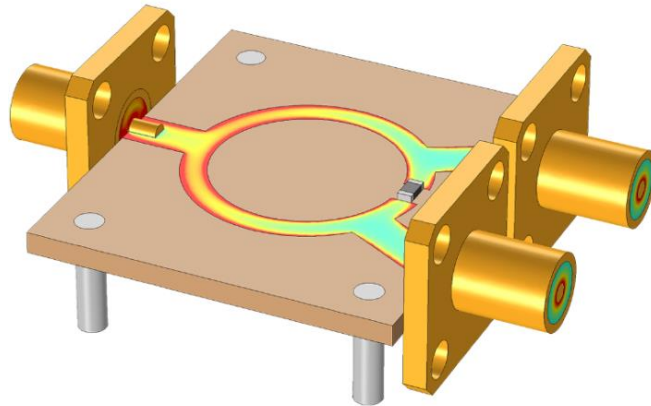
Застосування

Дільники потужності широко застосовуються в різних галузях радіоелектроніки, як в якості самостійних пристроїв в кабельних і хвилеводних лініях, так і в якості елементів радіоелектронної апаратури. Як самостійні пристрої використовуються для розгалуження сигналу з лінії (наприклад, телевізійні розгалужувачі) і для контролю параметрів сигналу в лінії і її

узгодження. Як елементи апаратури використовуються в основному в радіовимірювальних приладах.

Будова ДП

Дільник в загальному випадку складається з декількох секцій, побудованих на основі симетричних і несиметричних дільників Уїлкінсона (Wilkinson, приклад 3.1).



Приклад 3.1. Дільник Уїлкінсона

Практична частина

Лабораторна робота №3. Проектування дільника потужності

Вихідні дані

Вихідними даними для виконання лабораторної роботи є:

- коефіцієнт ділення N ;
- робоча частота f , ГГц;
- матеріал діелектрика, .

Таблиця 3.1. Варіанти для бригади

№	N	f , ГГц	Діелектрик
1	5	5	ФЛАН-2,8
2	3	5,5	ФЛАН-3,8
3	5	6	ФЛАН-2,8
4	3	6,5	ФЛАН-3,8

Таблиця 3.2. Характеристики матеріалів

Діелектрик	ϵ_r	$\tan \delta$	Товщина
ФЛАН-2,8	$2,8 \pm 0,2 / 2,8$	0,0015	1,0 - 3,0
ФЛАН-3,8	$3,8 \pm 0,2 / 3,8$	0,004	1,0 - 3,0

1. Розрахунок коефіцієнтів ділення секцій дільника

1.1. Так як дільник Уілкінсона має два виходи і може бути виконаний у симетричному і несиметричному положеннях (отже потужність може ділитися порівну або на дві нерівні між собою частини), а кількість виходів непарна, то проектуємий дільник потужності на п'ять несиметричний (рис. 3.1).

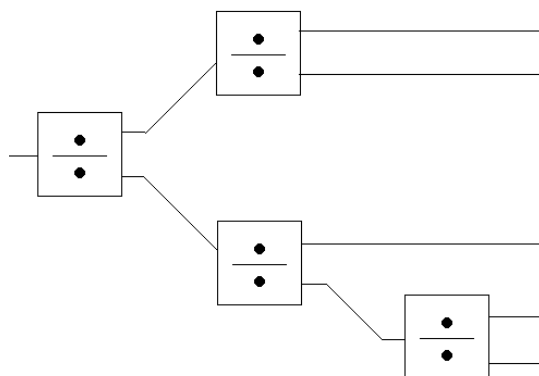


Рис.3..1. Дільник потужності на п'ять

1.2. Для отриманого дільника ми розраховували коефіцієнти ділення кожної секції (рис. 3.2)

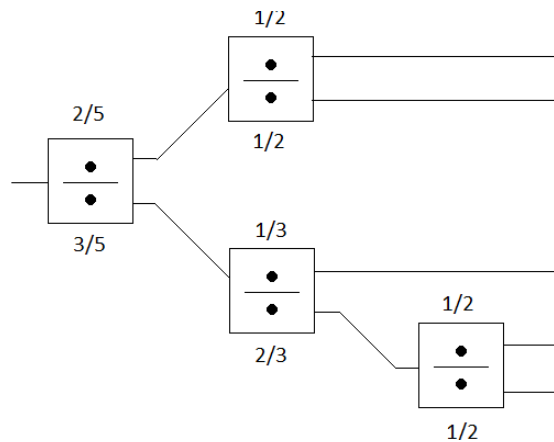


Рис. 3.2. Дільник потужності на п'ять з коефіцієнтами ділення

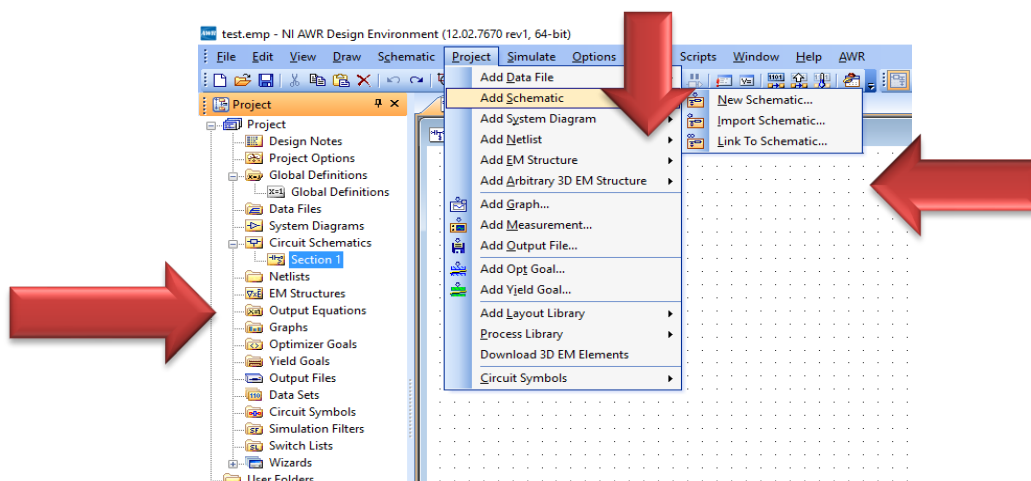
1.3. Для зручності подальшої роботи в програмі **Microwave Office** ми привели отримані значення до логарифмічного виду:

- $1/2 = -3$ дБ
- $1/3 = -4.8$ дБ
- $2/3 = -1.8$ дБ
- $2/5 = -4$ дБ
- $3/5 = -2.2$ дБ

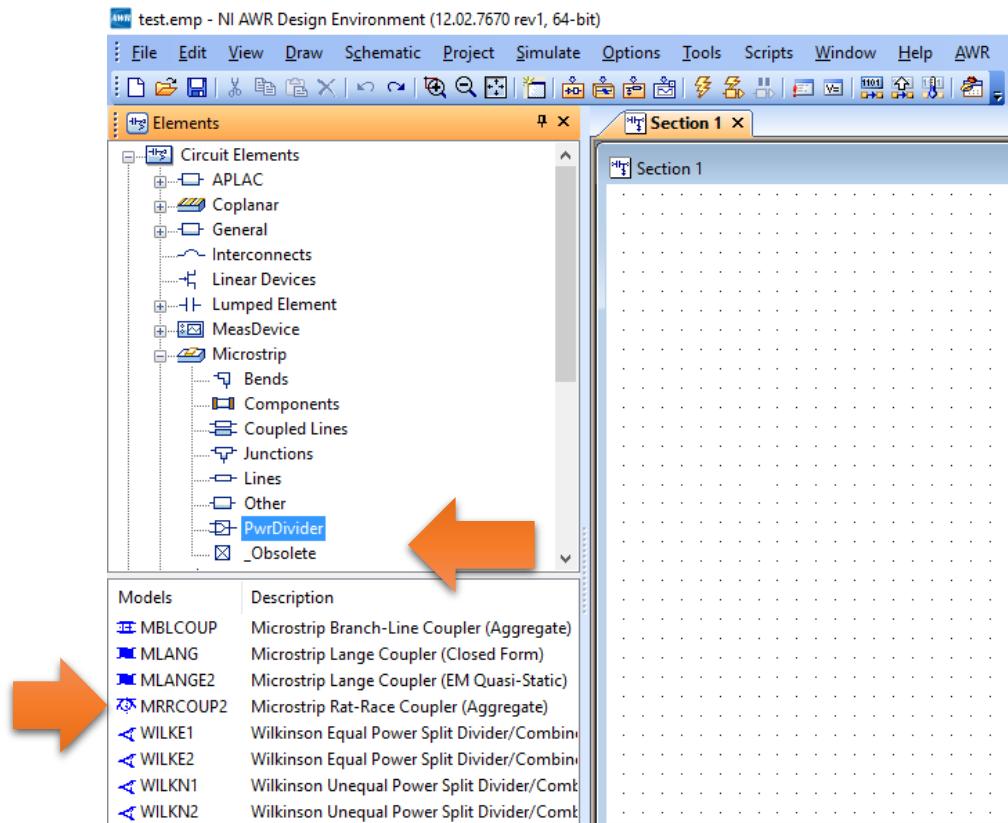
2. Створення схематичних моделей частин дільника

Перша секція

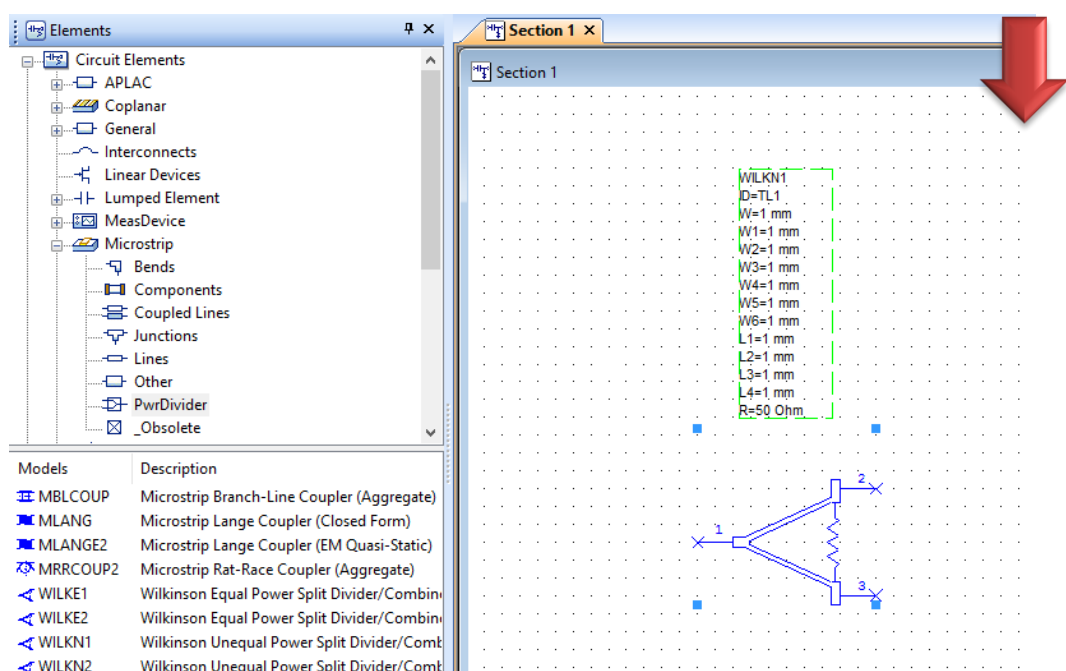
2.1. Для створення схематичної моделі секції ми відкрили **Project** → **Add Schematic**, та обрали команду **New Schematic...** У вікні **Create New Schematic** ввели назву схематичної моделі першої секції.



2.2. Натиснули на закладку **Elements**. У з'явившомуся списку знайшли папку **Microstrip**, клацнули по ній та обрали пункт **PwrDivider**.

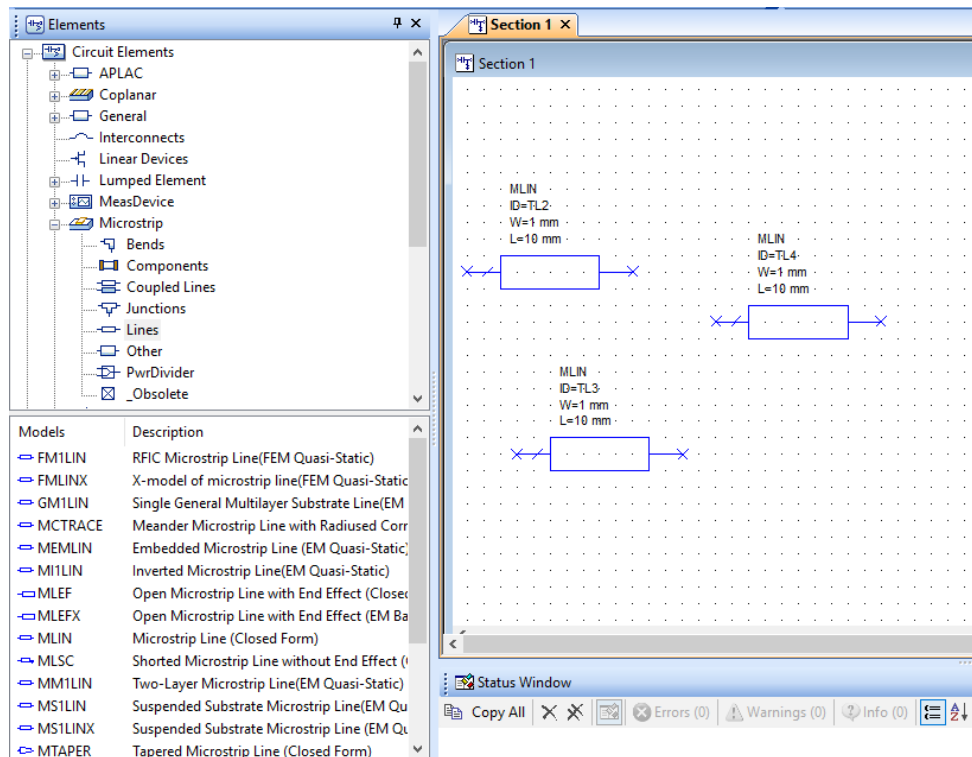


2.3. В нижньому вікні з'явилися різні типи дільників потужності. Ми перетягнули елемент **WILKN1**(несиметричний дільник Уілкінсона) у схему.

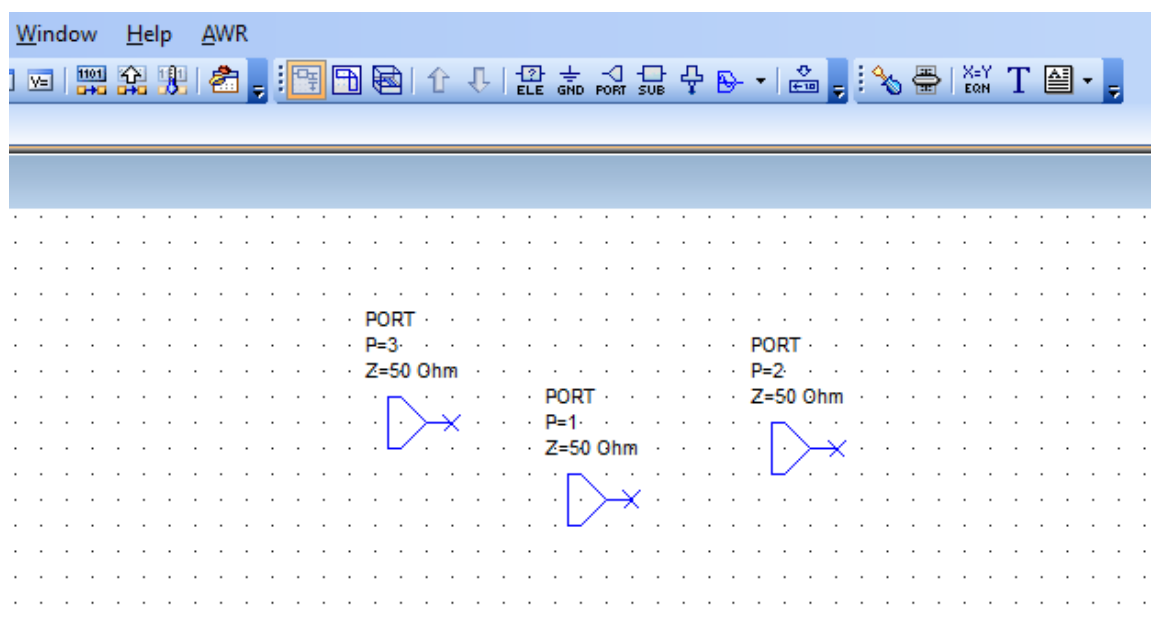


2.4. Аналогічно в закладці **Elements** у списку знайшли папку **Microstrip** та клацнули по ній. Вибрали пункт **Lines**, у нижньому кутку з'явилися можливі типи відрізків ліній передачі.

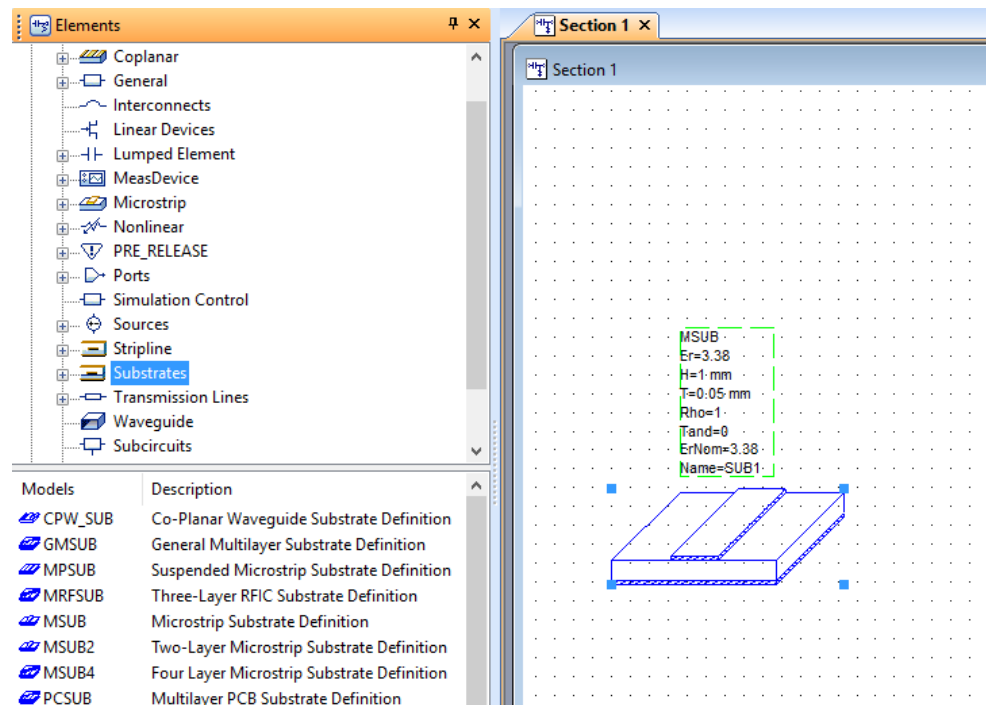
Після цього перетягнули три елементи **MLIN** у вікно зі схемою.



2.5. Додали три порти **Port** з головної панелі.



2.6. Також потрібно було додати підкладку: у вікні **Elements** ми обрали папку **Substrates**, структуру **MSUB** і перетягнули її у вікно схеми.



2.7. Розставивши всі елементи, як показано на рис. 3.3, ми отримали модель першої секції дільника.

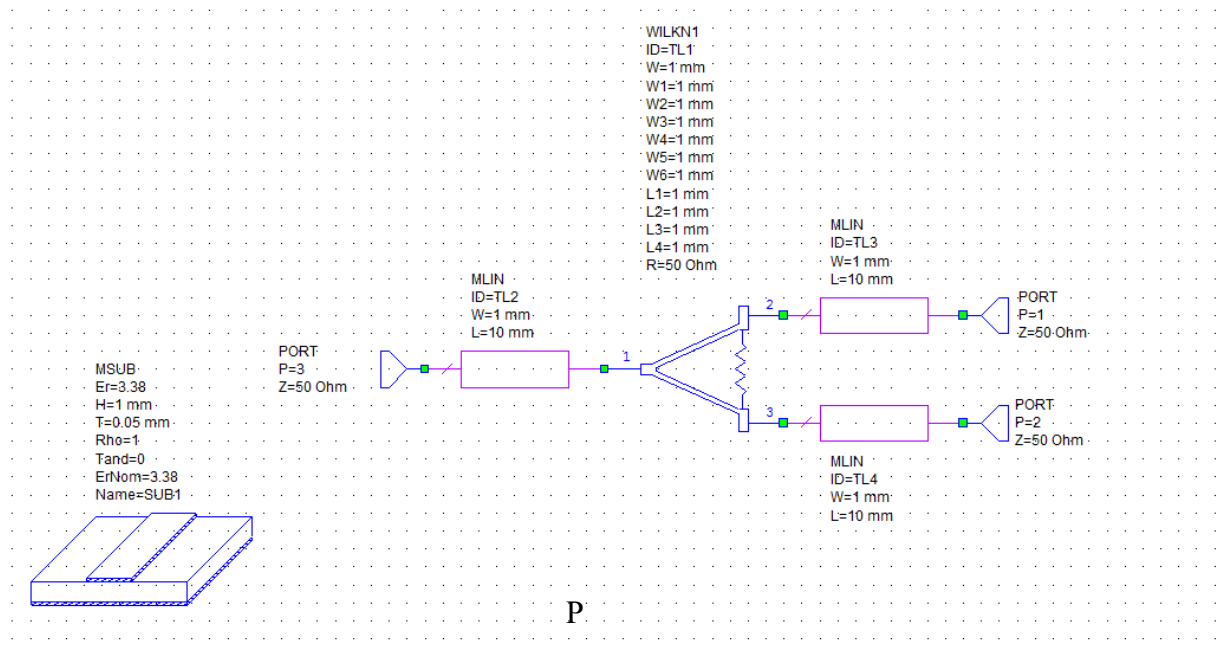
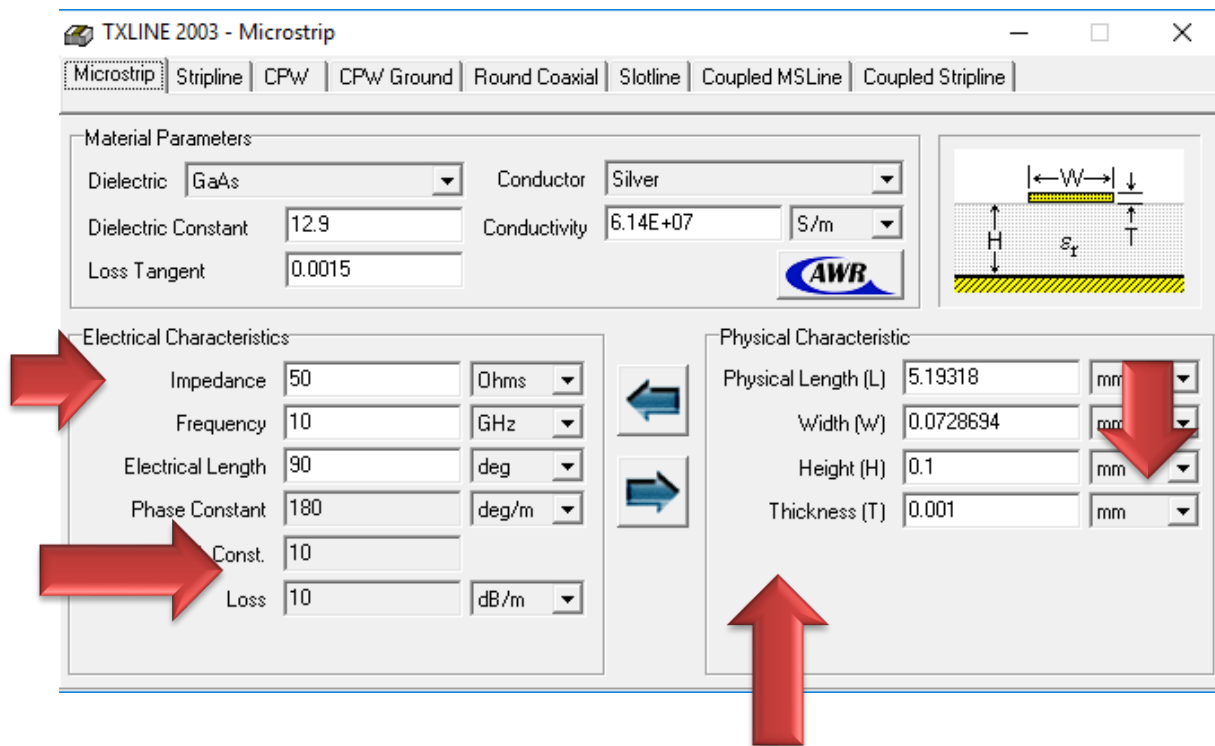


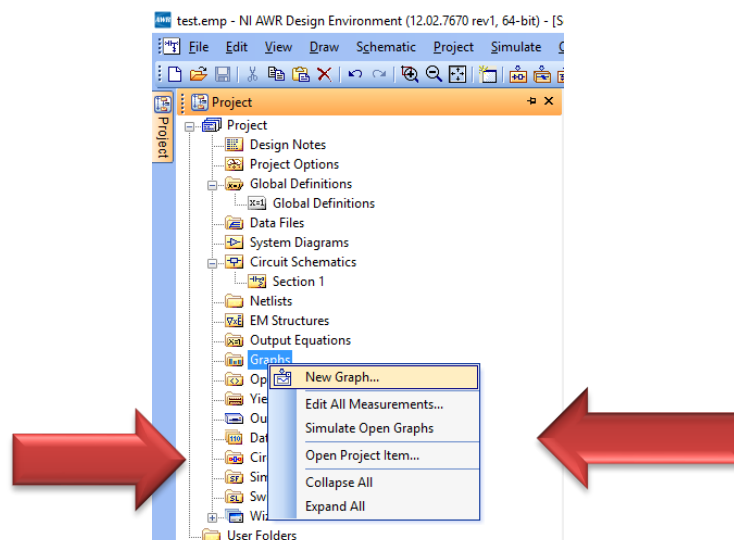
Рис.3.3. Схематична модель першої секції дільника в середовищі Microwave Office

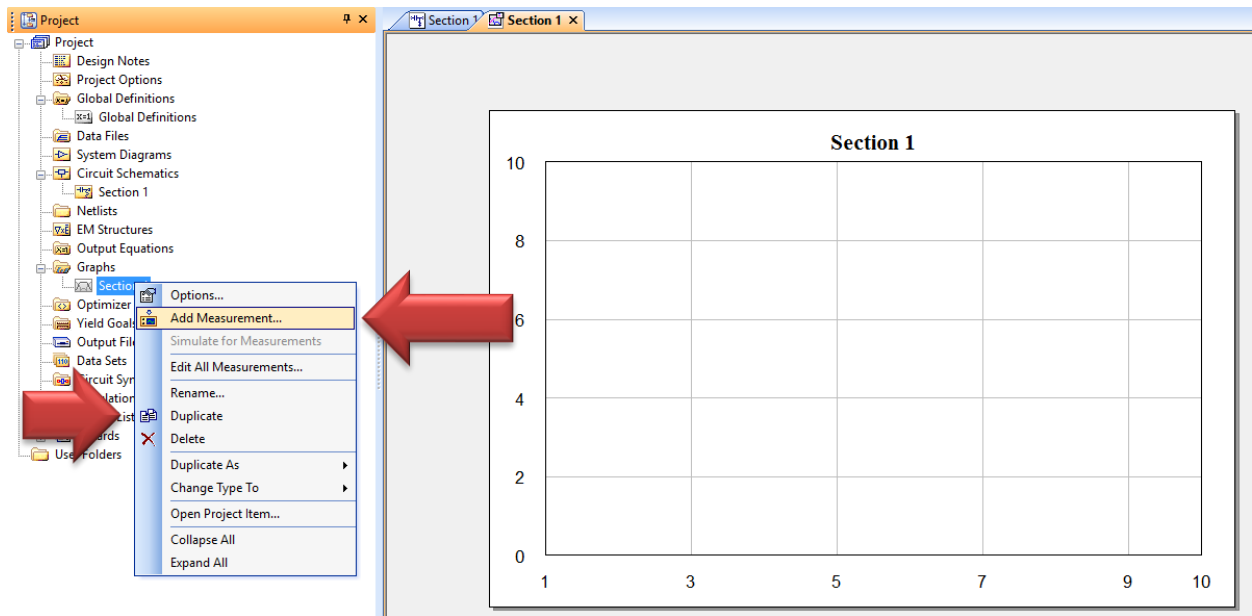
3. Встановлення вхідних параметрів

3.1. Для задання робочої частоти f ми клацнули на головній панелі **Tools** -> **TXLine...** У відкритому вікні задали **Frequency** (Частота) та **Loss Tangent** (Тангенс кута втрат) згідно варіанту. Після цього натиснули стрілку вправо, щоб отримати фізичні характеристики матеріалів, а саме: фізичну довжину (**L**), ширину (**W**), висоту (**H**) та товщину (**T**) вже обраховані в мм.



3.2. Для побудови частотних залежностей коефіцієнтів передачі входу на вихід ми додали в проект новий графік. На основній панелі натиснули на кнопку **Graphs** лівою кнопкою мишки та обрали **New Graph**.





3.3. У вікні **Measurement Type** (Тип вимірів, рис. 3.4.) обрали **Port Parametres**. У вінкі **Measurement**(Виміри) обрали **S**. У вінкі **Data Source Name** обрали назву схеми. У вінкі **To Port Index** перший порт на виході дільника, у вінкі **From Port Index** порт на вході дільника. У вінкі **Complex Modifier** помітили галочками пункти **Mag** та **Db**. Натиснули **ОК**.Потім повторили операцію, вибравши у якості виходу другий порт. Отримали графік частотних залежностей коефіцієнтів передачі **S31, S21**.

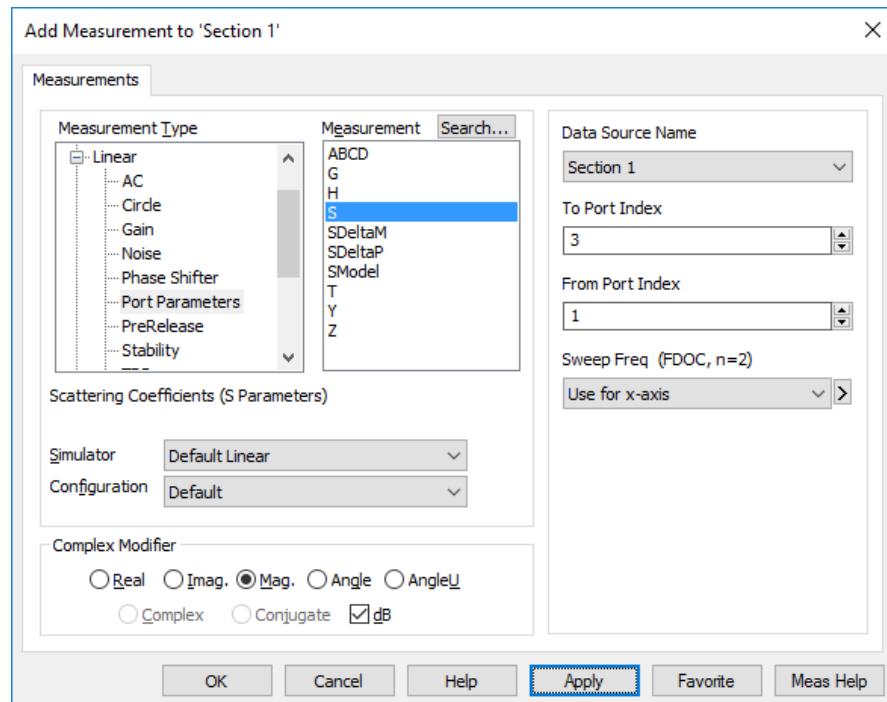
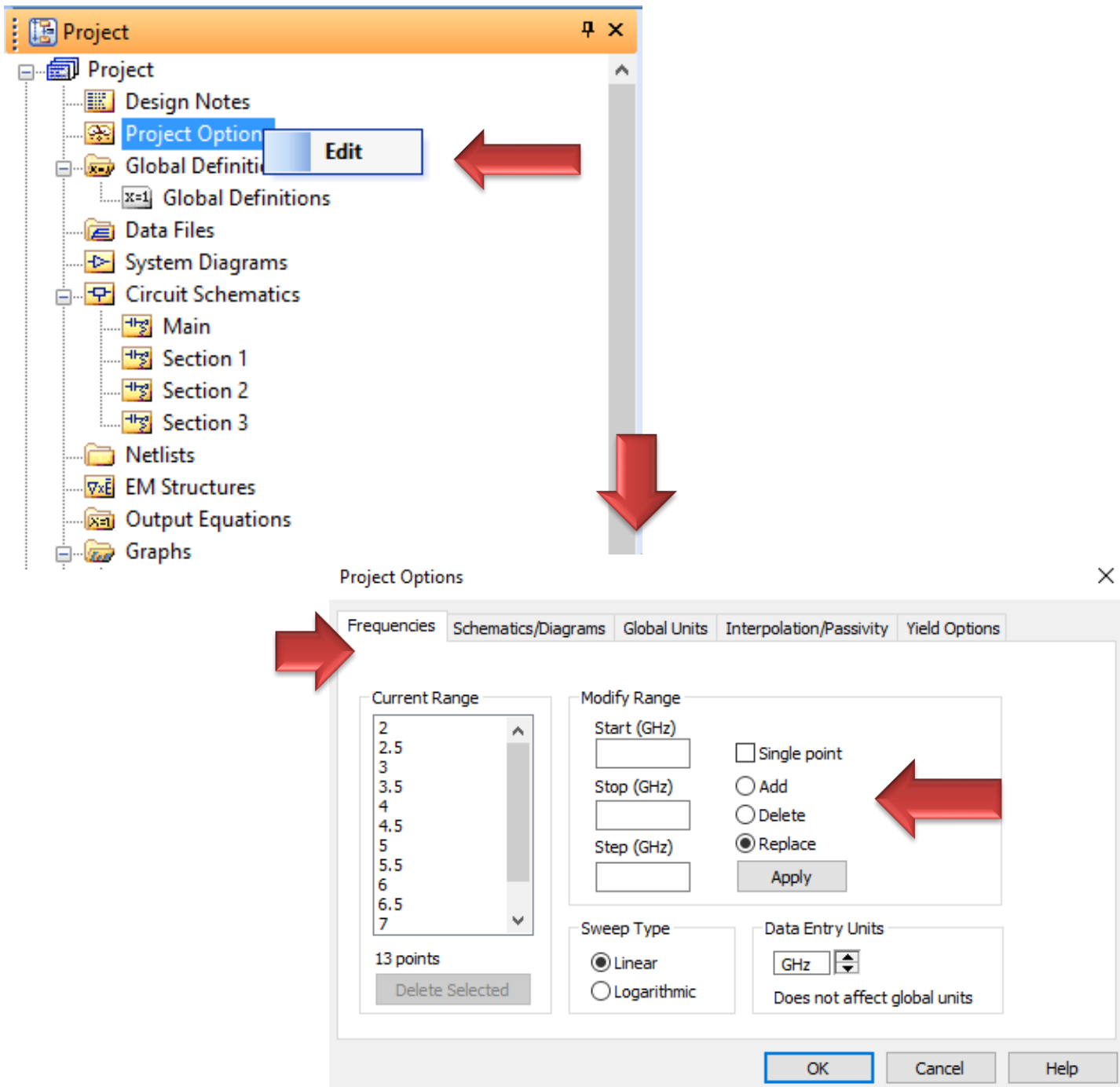




Рис. 3.4. Вікно додавання вимірів

4. Налаштування проекту

- Щоб мати кожен графік з робочими точками лише в конкретному діапазоні частот потрібно натиснути лівою кнопкою миші на **Project Options** (Налаштування Проекту) та вибрати **Edit** (Редагувати)
- У відкритшомуся вікні задаються **Start** (початкова) **Stop** (кінцева) та **Step** (крок) частоти
- В області **Current Range** (поточний діапазон) має з'явитися набір точок, які будуть присутні на графіку. Якщо ні, то потрібно натиснути **Apply** (застосувати). Виконали



- Потім ми оптимізували модель першої секції дільника потужності. Для цього обрали необхідні параметри дільника, попередньо натиснувши на головній панелі знак 

- Після цього натиснули . Відкрилося вікно **Variable Tuner** (рис.3.5). Отримаємо графік першої секції (рис. 3.6.).

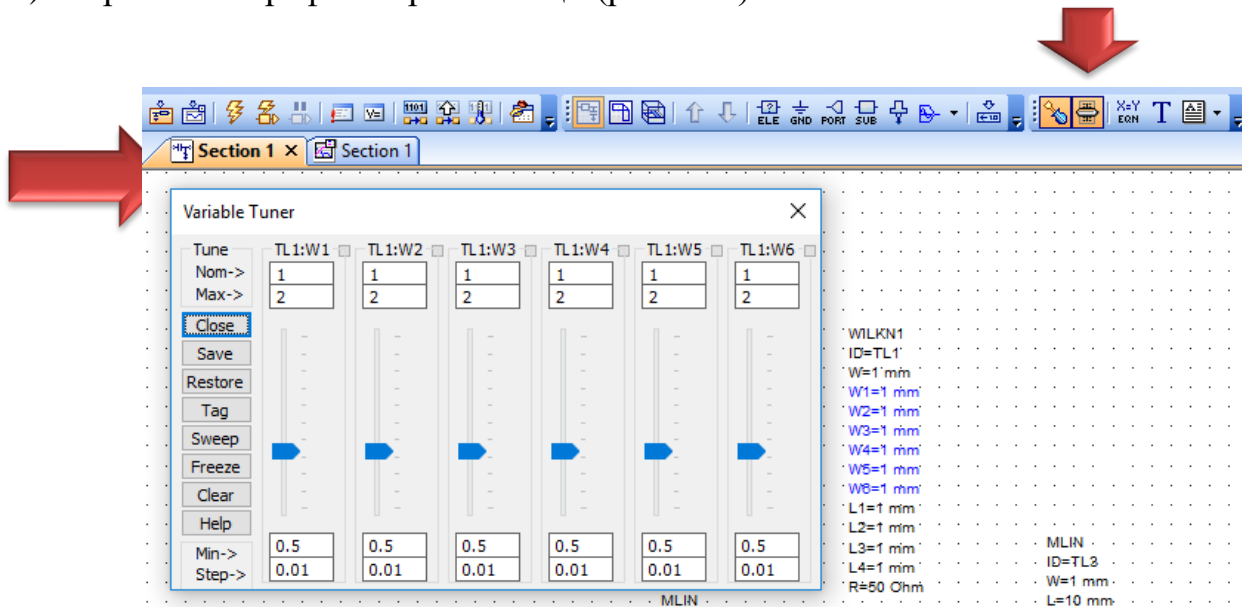


Рис. 3.5. Вікно Variable Tuner

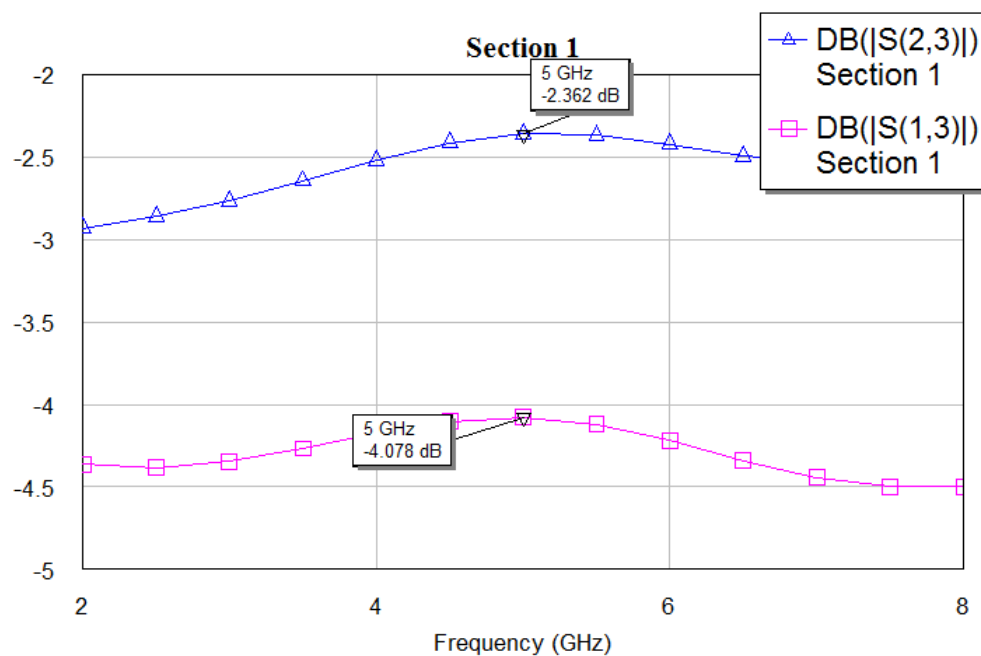
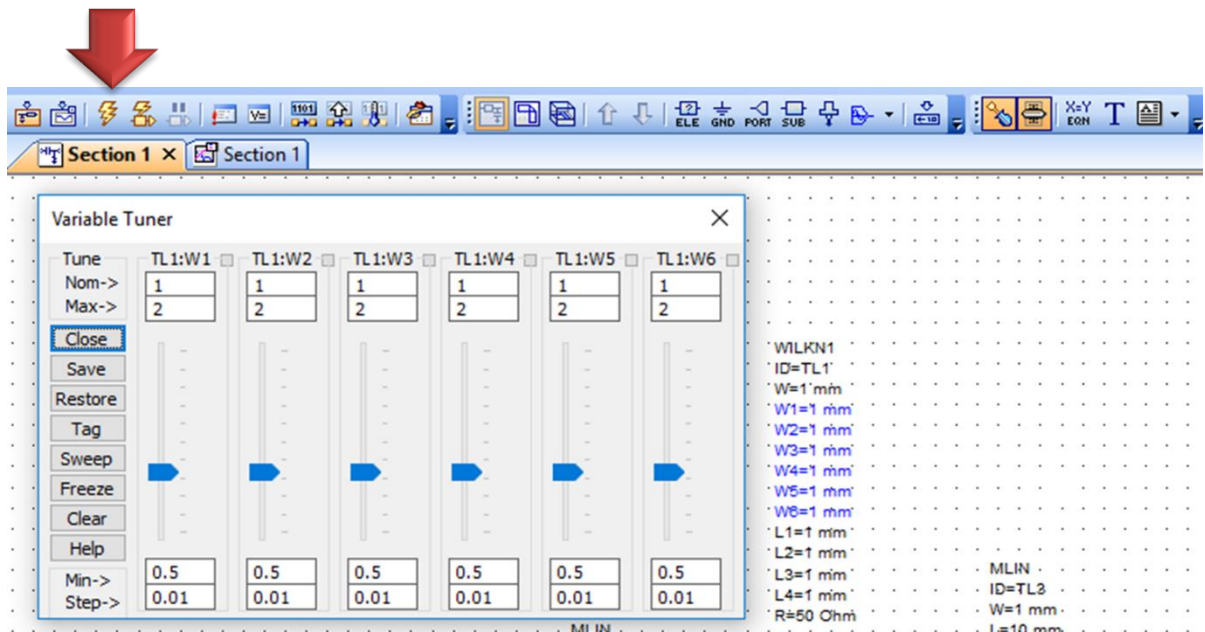


Рис. 3.6. Графік першої секції

- Зауваження: після описаних раніше оптимізацій та налаштувань проекту бажано застосувати зміни натиснувши на допоміжній панелі кнопку зі знаком блискавки, яка має назву **Analyze** (аналіз).



Друга секція

Створили схематичну модель другої секції аналогічно моделі, яку ми розглянули тільки що (рис. 3.7).

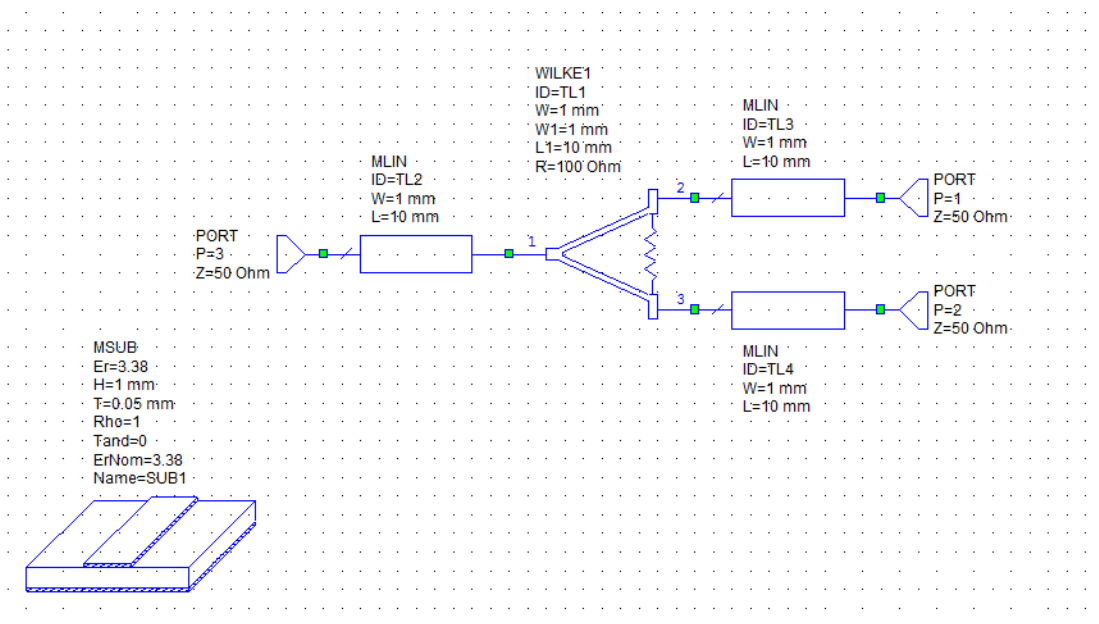


Рис.3. 7. Схемна модель другої секції

- Аналогічно до першої секції, регулюючи повзунки, отримали на заданій частоті розрахований раніше коефіцієнт передачі другої секції (рис.3. 8).

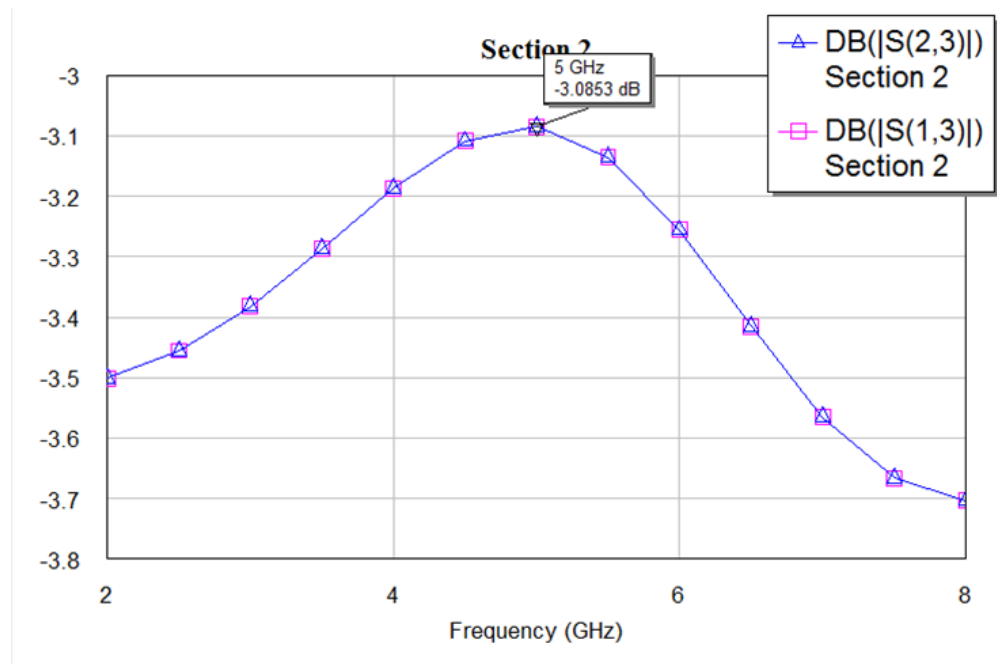


Рис. 3. 8. Графік другої секції

Третя секція (рис. 3.9.)

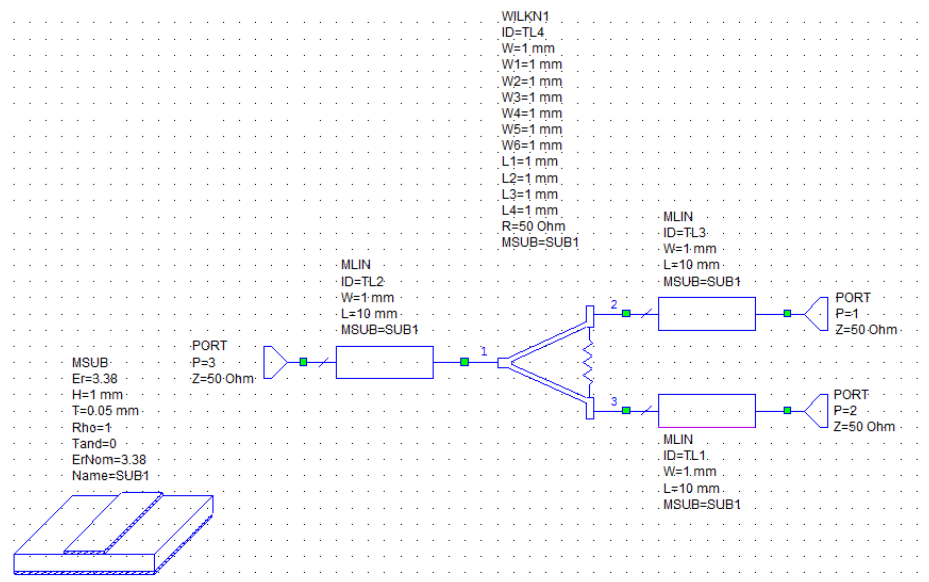


Рис. 3.9. Схемна модель третьої секції

- Додали графік та оптимізували схематичну модель, щоб отримати необхідний коефіцієнт підсилення на заданій частоті (рис. 3.10).

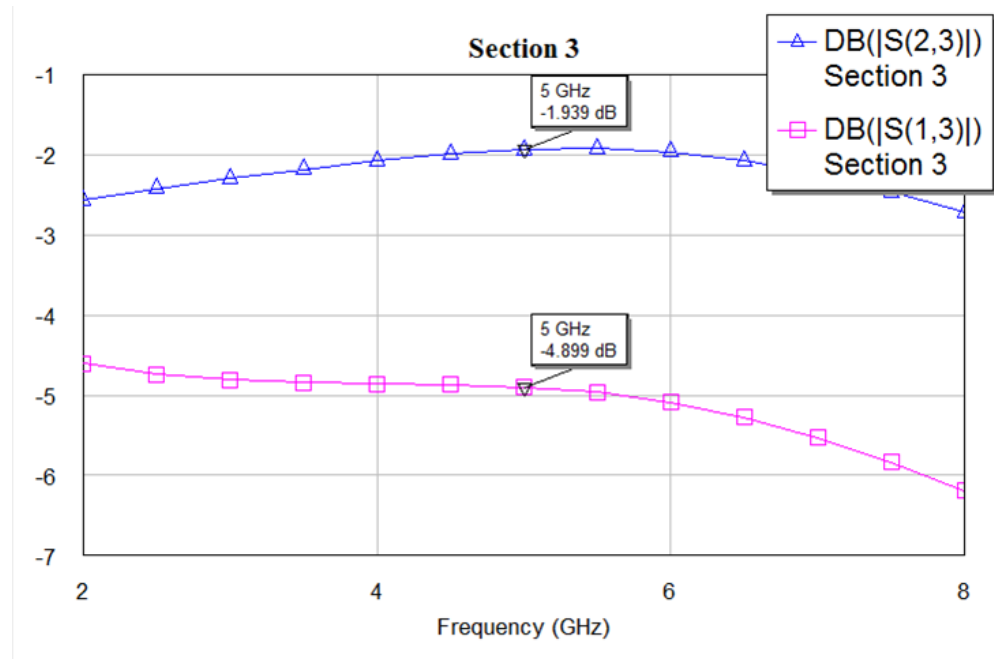


Рис. 3.10. Графік третьої секції

5. Створення схематичної моделі дільника потужності

Основна схема ДП

Створили нову схематичну модель та зібрали дільник потужності, показаний на рис. 3. 11.

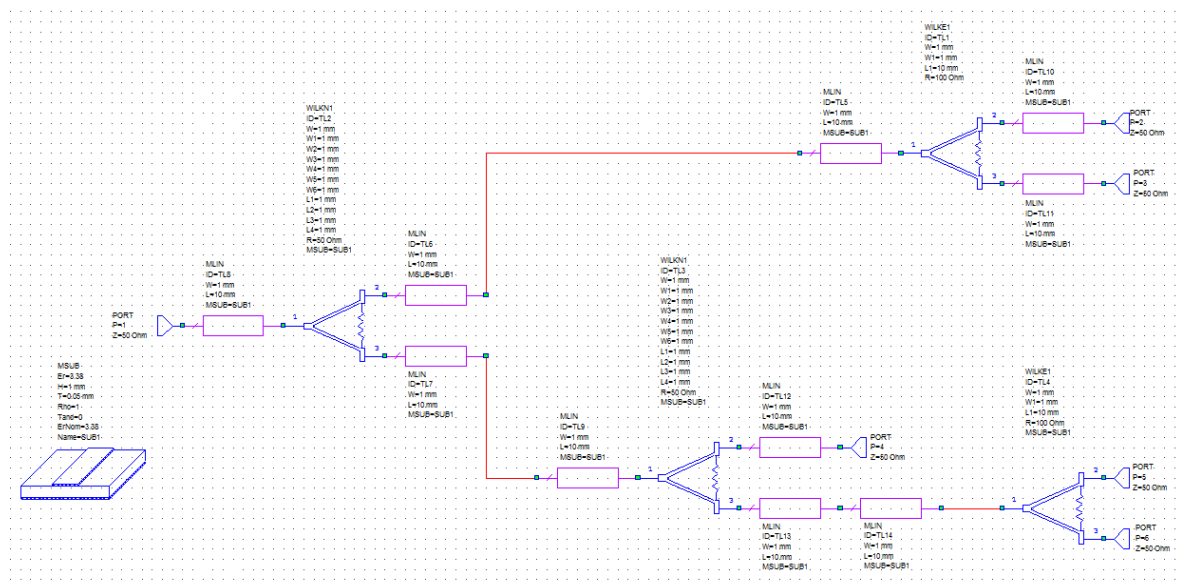


Рис. 3.11. Схематична модель дільника в середовищі Microwave Office

- Додали новий графік. Всі параметри залишили такими ж, як і в попередніх пунктах, тільки у вікні **To Port Index** додали по черзі 5 вихідних портів.
- Отримали графік, аналогічний показаному на рис. 3.12.
- Якщо все зроблено правильно, на заданій частоті повинні бути рівні(або близькі з точністю не менше ніж 0,2 дБ) коефіцієнти передачі. Оптимізація схеми не потрібна.

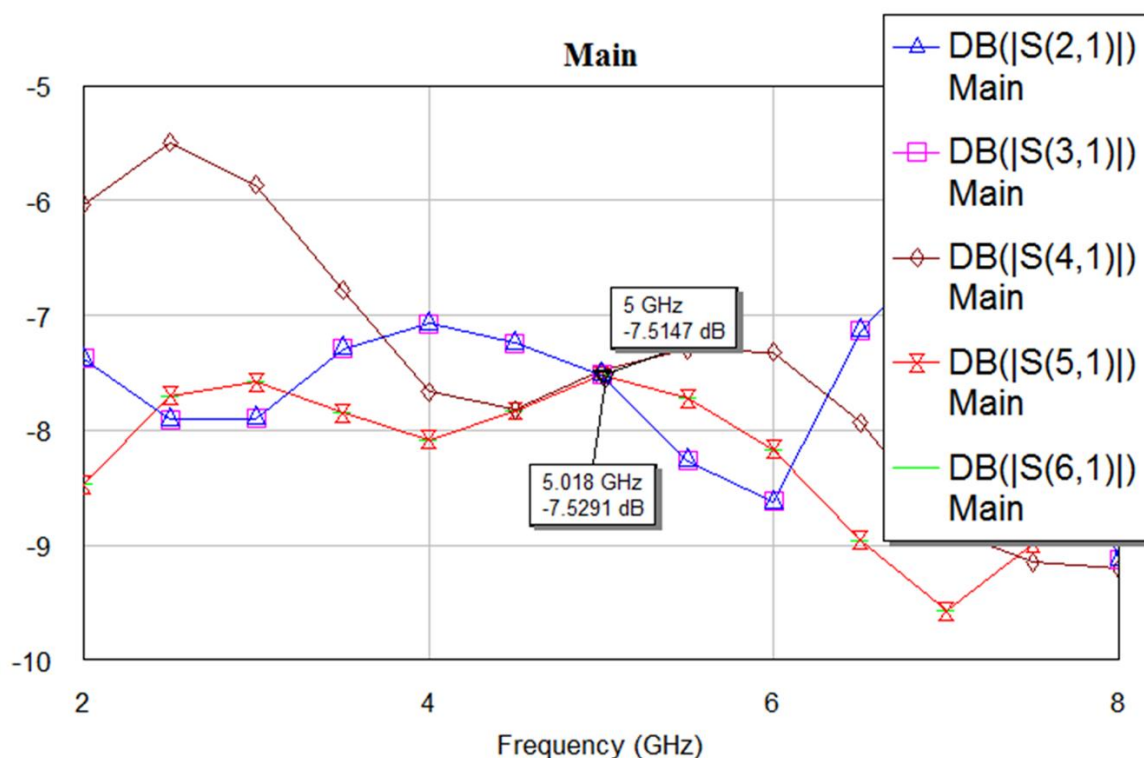


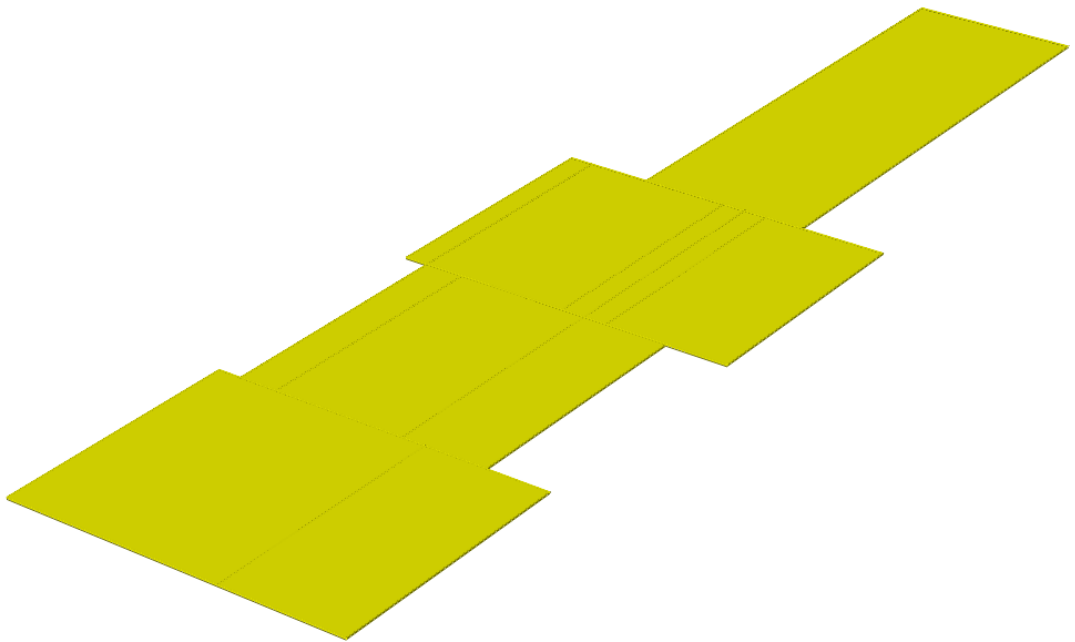
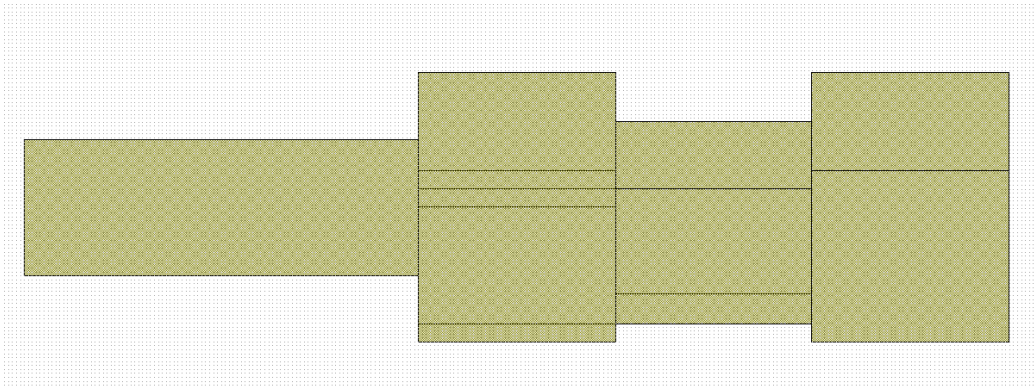


Рис. 3.12. Графік схематичної моделі дільника потужності

6. Отримання топології Дільника потужності на 5

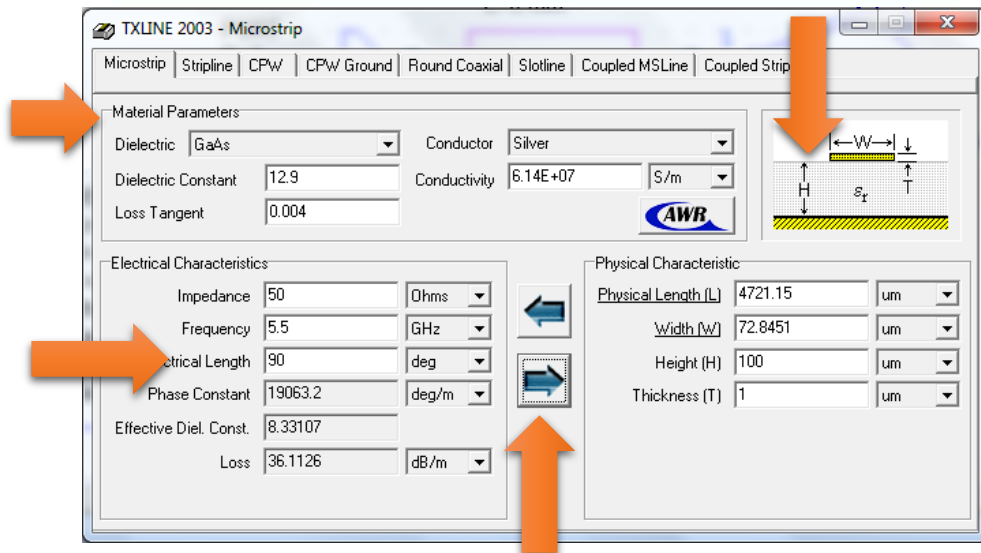
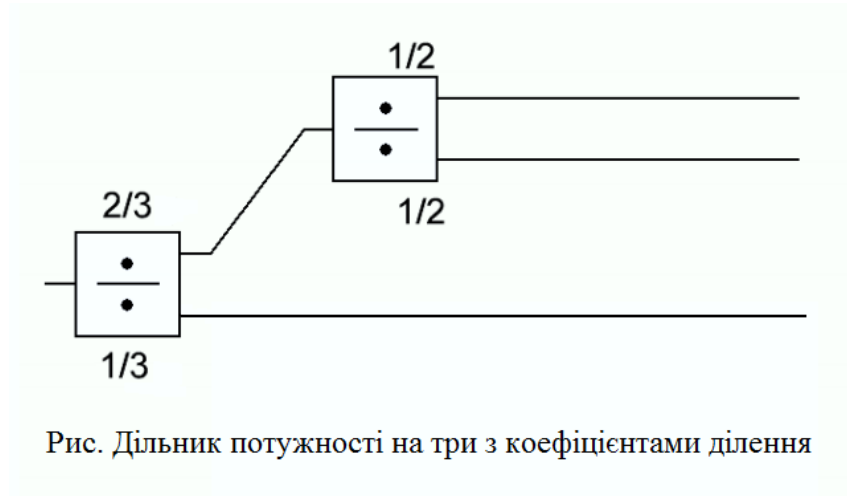


Натисніть кнопку  (View Layout), після чого відкриється вікно з топологією. Для з'єднання окремих топологічних елементів виберіть їх всі і натисніть . При цьому можливе зміщення елементів.



Результати

Варіант 2



- Нижче ідуть схеми всіх секцій Дільника потужності на 3

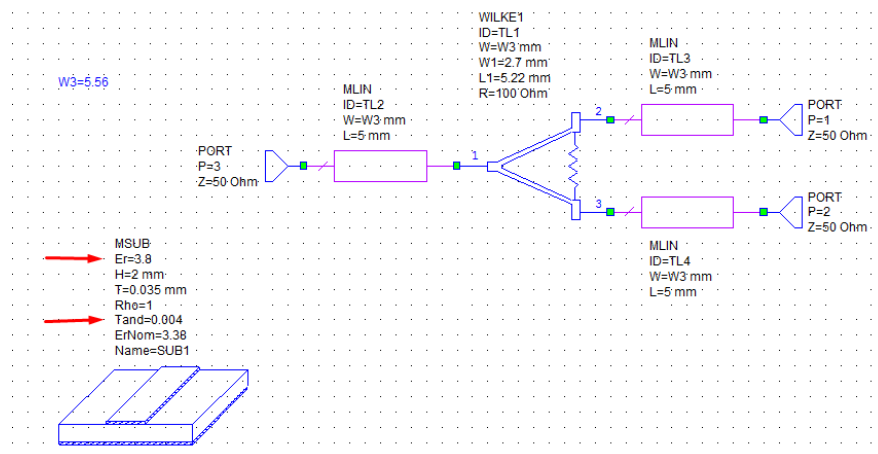


Рис 3.13. Вікно редагування параметрів TXLine

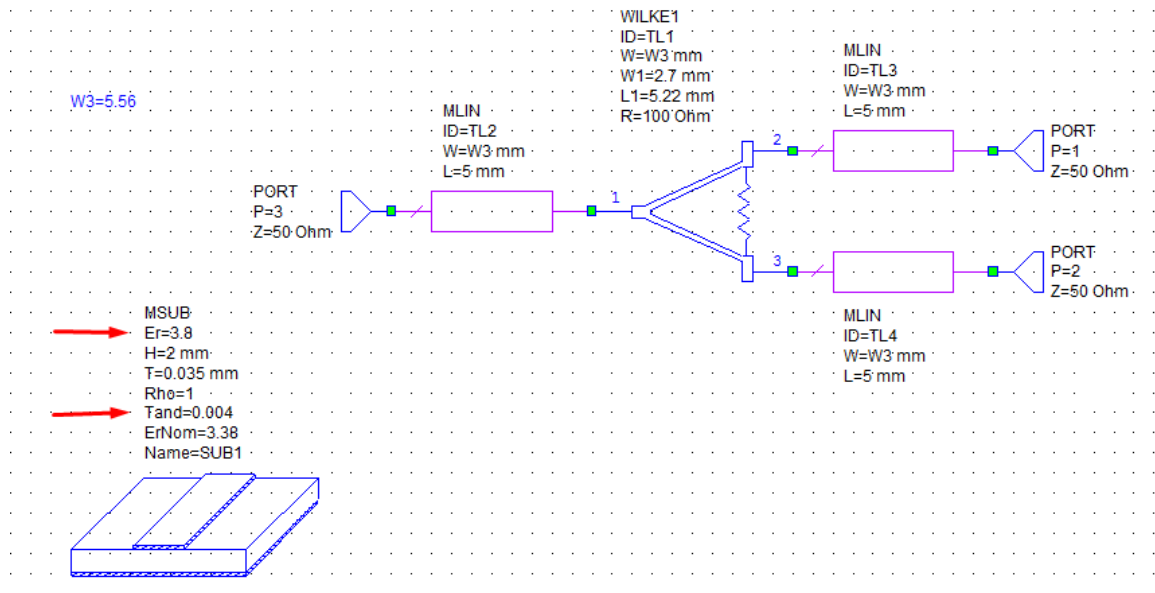


Схема першої секції

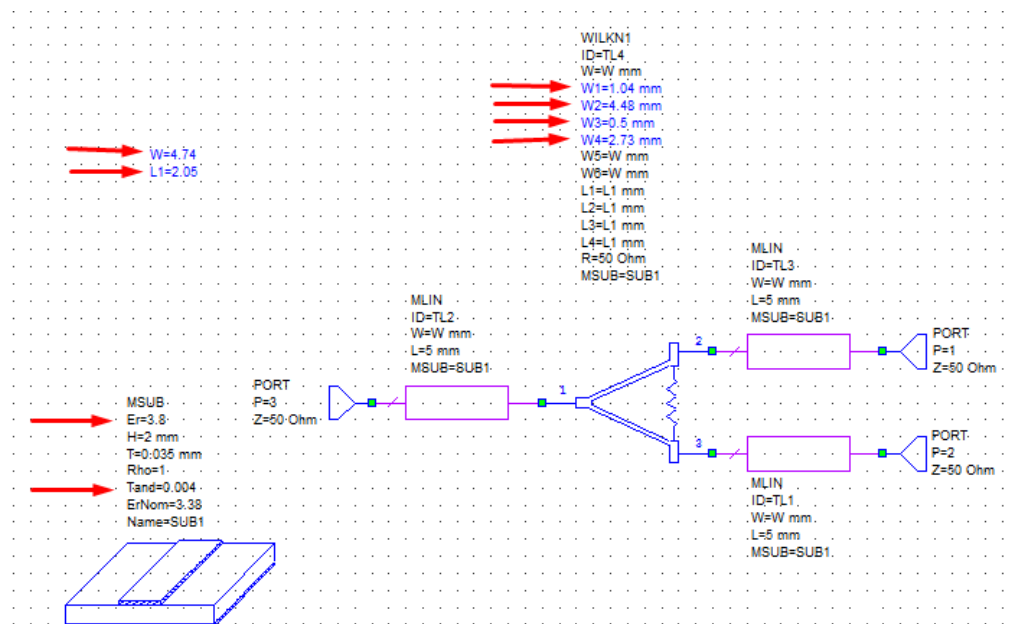


Схема другої секції

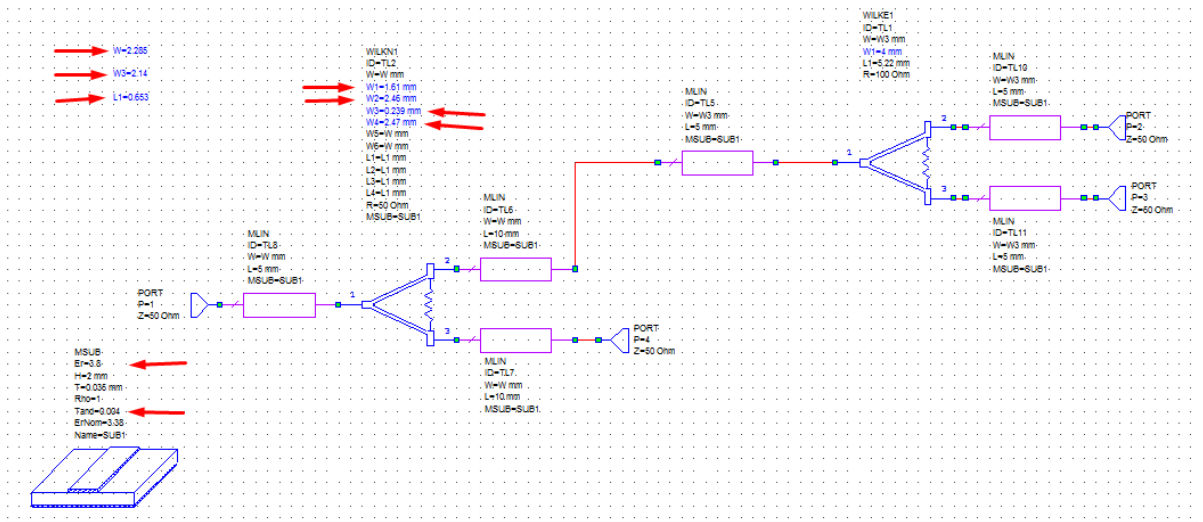
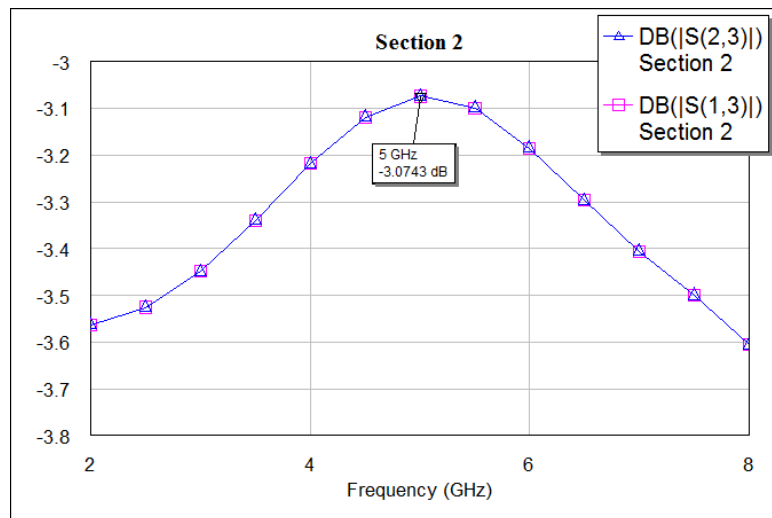
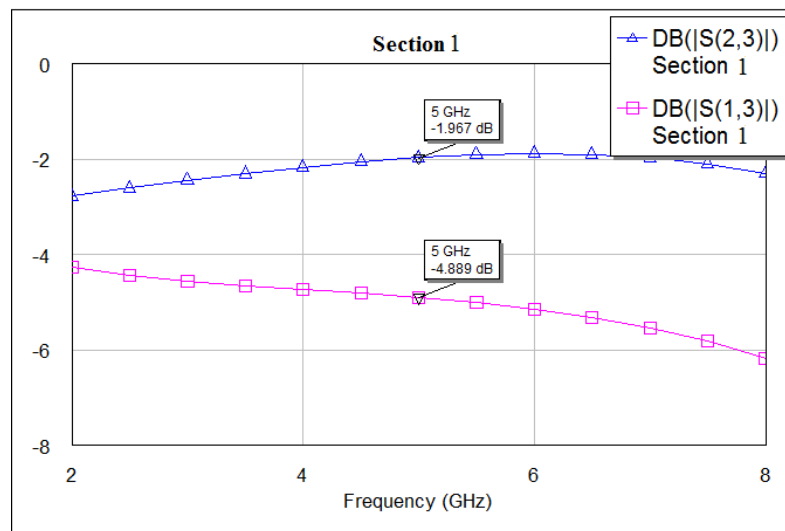
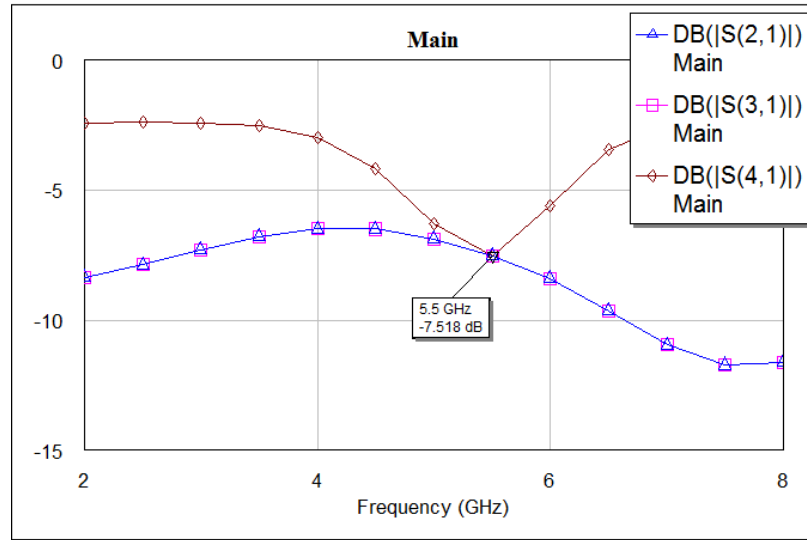


Схема головної секції

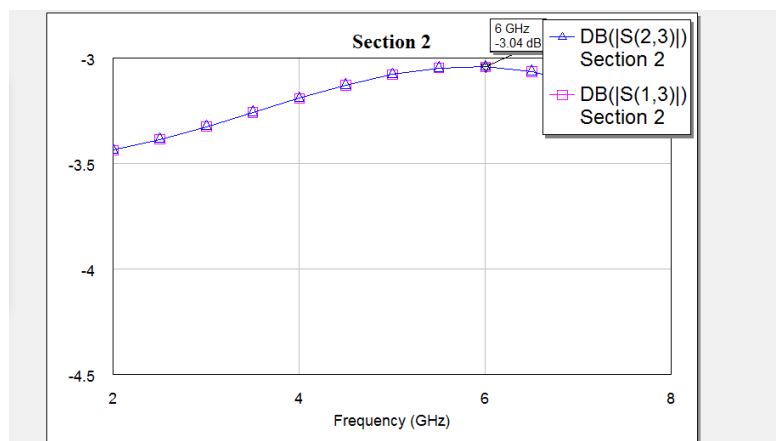
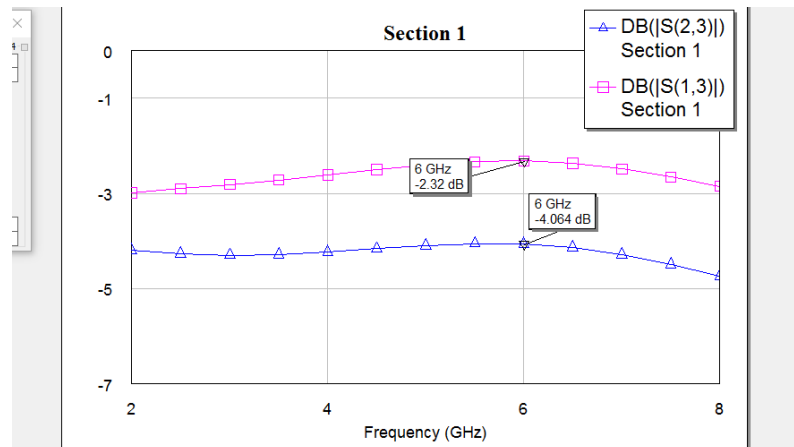
- та результати досліджень

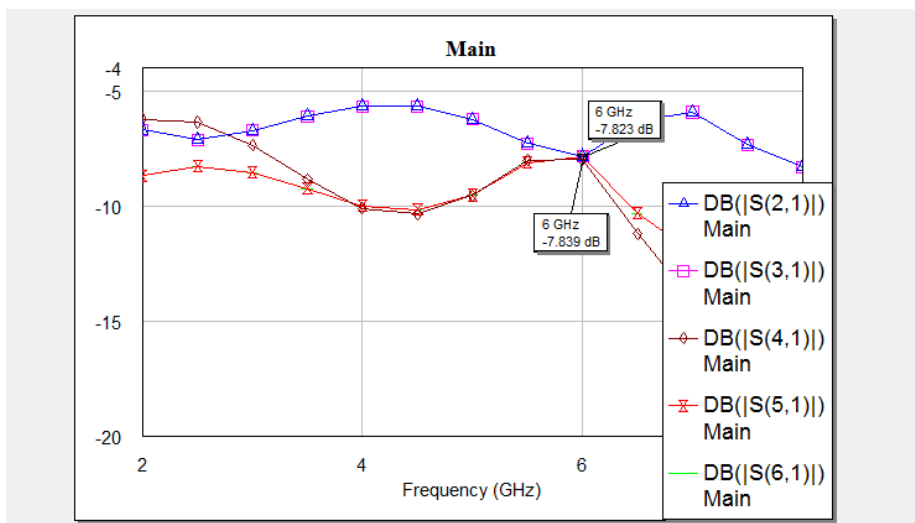
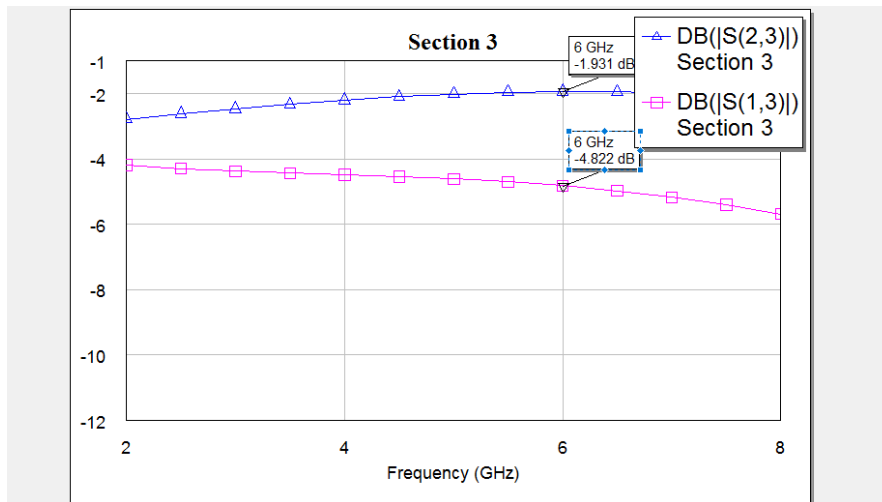




Варіант 3

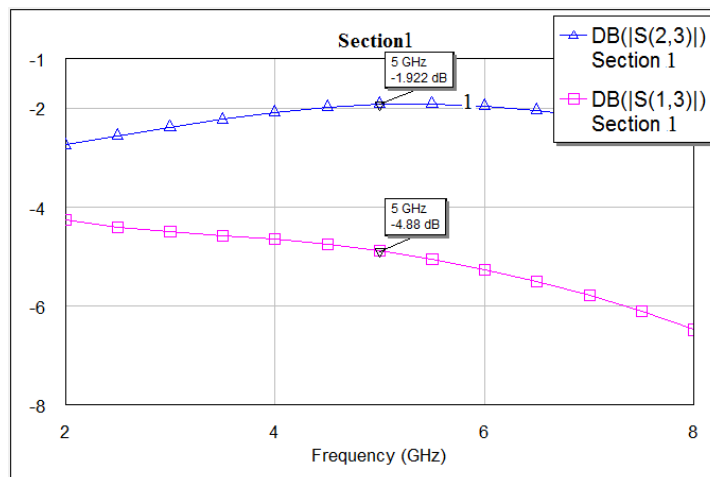
Так як в цьому варіанті проектується **Дільник потужності** на 5, схема буде аналогічна тій яку ми вже розглядали на початку. Відрізняється задана частота. Для порівняння нижче наведені тільки графіки всіх розрахунків для трьох секцій та головної схеми

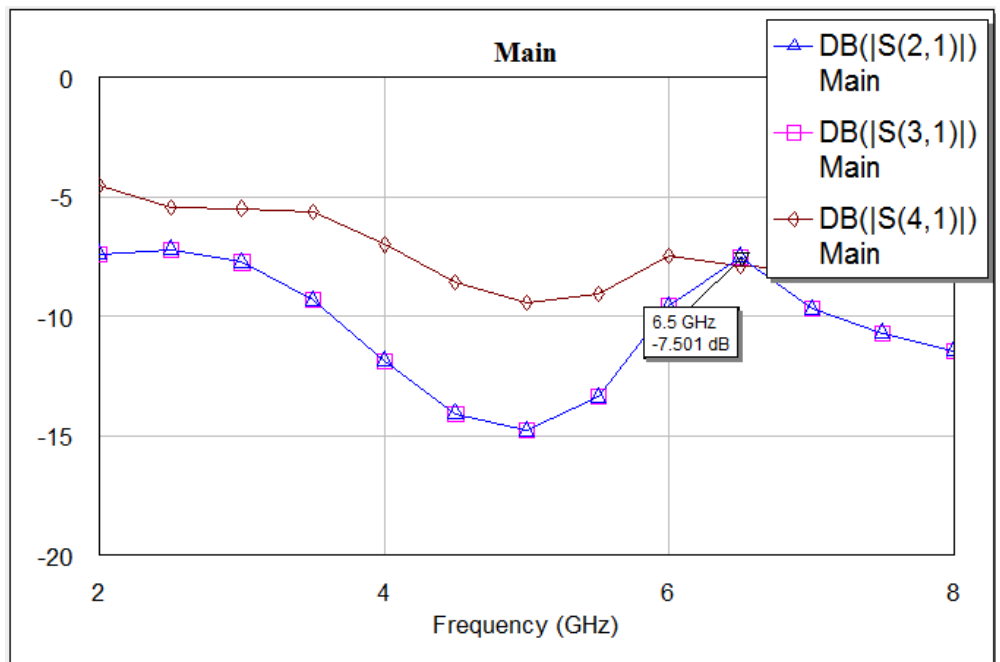
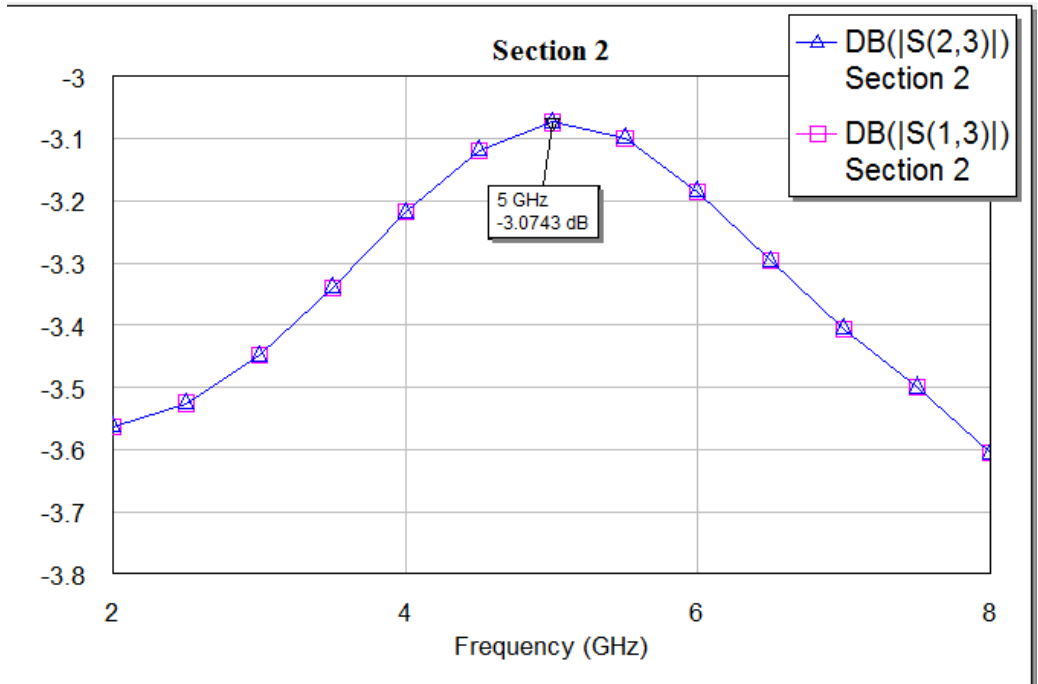




Варіант 4

Так як в цьому варіанті проектується **Дільник потужності** на 3, схема буде аналогічна тій яку ми вже розглядали у *Варіанті 2*. Відрізняється задана частота. Для порівняння нижче наведені тільки графіки всіх розрахунків для трьох секцій та головної схеми:





Використана література

1. А. С. Подстригаев «ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ: ПРАКТИКУМ»
2. <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/wilkinson-power-splitters>
3. <http://kilyos.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/programs/magnetic/mwpower/wilkinson.htm>
4. <https://www.cst.com/academia/examples/wilkinson-power-divider>

Лабораторна робота №4. Проектування фільтра верхніх частот

Мета роботи: набуття навичок проектування фільтра верхніх частот з використанням утиліти iFilter і програми Microwave Office зі складу програмного пакету AWRDesign Environment.

Опис методу проектування

1. Створення схемної моделі фільтра в утиліті iFilter.
2. Експорт схемної моделі фільтра в програму Microwave Office.
3. Оптимізація схемної моделі фільтра з метою отримання заданих частотних характеристик.
4. Отримання топології фільтра.
5. Створення електромагнітної моделі фільтра на основі його топології.
6. Виконання електромагнітного аналізу фільтра.

Теоретичні відомості

Фільтр верхніх частот (ФВЧ) — електронний або інший фільтр, що пропускає високі частоти вхідного сигналу і ослаблює сигнали з частотою меншою, ніж частота зрізу. Допускає послідовне з'єднання кількох ланок. Ступінь ослаблення залежить від конкретного типу фільтра та кількості ланок — порядку фільтра.

Приклад реалізації

Пасивний аналоговий фільтр верхніх частот першого порядку, реалізований у вигляді RC-ланки. Найпростіший електронний фільтр верхніх частот складається з послідовно з'єднаних конденсатора і резистора. Конденсатор пропускає лише змінний струм, а вихідна напруга знімається з резистора. Множення опору на ємність ($R \times C$) є постійною часу для такого фільтра, яка обернено пропорційна частоті зрізу в герцах:

$$f_3 = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC},$$

де f_3 вказано в герцах, τ в секундах, R в омах і C в фарадах.

Застосування

Фільтр застосовується для виділення високих частот із сигналу і часто використовується в обробці аудіосигналів, наприклад в кросоверах. Ще одне важливе застосування фільтра верхніх частот — усунення постійної складової сигналу, для чого частоту зрізу вибирають достатньо низькою.

Фільтри верхніх частот використовуються в простих безтрансформаторних конденсаторних перетворювачах напруги (інверторах) для пониження напруги змінного струму. До недоліків таких перетворювачів відноситься їх висока чутливість до імпульсних перешкод в джерелі змінного струму, а також залежність вихідної напруги від імпедансу навантаження.

Фільтри верхніх частот використовуються в обробці зображень для того, щоб виділити контури зображення. Використовується також послідовне включення фільтра верхніх частот з фільтром низьких частот (ФНЧ). Якщо при цьому частота зрізу ФВЧ менше, ніж частота зрізу ФНЧ, отримаємо смуговий (смугопропускаючий) фільтр.

Частотні фільтри характеризуються показниками:

Частота зрізу - це частота, на якій відбувається спад амплітуди вихідного сигналу фільтра до значення 0,7 від вхідного сигналу.

Крутизна частотної характеристики фільтра - це характеристика фільтра, що показує, наскільки різко відбувається зменшення амплітуди вихідного сигналу фільтра при зміні частоти вхідного сигналу. В ідеалі треба прагнути до максимального (вертикального) спаду АЧХ.

Частотні фільтри виготовляються з елементів, що володіють реактивними опорами - конденсаторів і котушок індуктивності. Реактивні опори, використовуваних в фільтрах конденсаторів (XC) і котушок індуктивності (XL) пов'язані з частотою нижче наведеними формулами:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad X_L = \omega L = 2\pi f L$$

Частотні фільтри бувають:

1. Одноелементні (конденсатор - як фільтр високих частот, або дросель - як фільтр низьких частот);

2. Г-образні - за зовнішнім виглядом нагадують букву Г, звернену в іншу сторону;
3. Т-образні - за зовнішнім виглядом нагадують букву Т;
4. П-подібні - за зовнішнім виглядом нагадують літеру П;
5. Багатоланкові - це Г-образні фільтри з'єднані послідовно.

Одноелементні фільтри високих і низьких частот

Як правило, одноелементні фільтри високих і низьких частот застосовують безпосередньо в акустичних системах потужних підсилювачів звукової частоти, для поліпшення звучання самих звукових «колонок».

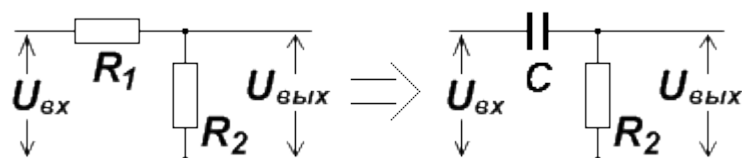
Вони підключаються послідовно з динамічними головками. По-перше, вони беруть як динамічні головки від потужного електричного сигналу, так і підсилювач від низького опору навантаження не навантажуючи його зайвими динаміками, на тій частоті, яку ці динаміки не відтворюють. По-друге, вони роблять відтворення приємніше на слух.

Г-образні фільтри

Г- подібний фільтр високих, або низьких частот - дільник напруги, що складається з двох елементів з нелінійної АЧХ. Для Г-образного фільтра діє схема і всі формули, подільника напруги.

Г-образні частотні фільтри на конденсаторі і резисторі

Фільтр високих частот може бути отриманий шляхом заміни резистора R_1 дільника напруги на конденсатор C , що володіє своїм реактивним опором X_C .

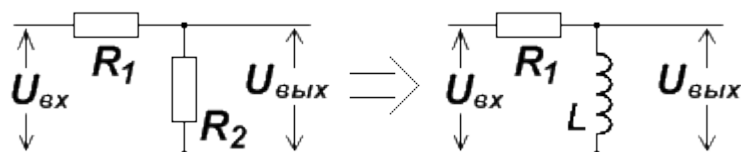


Принцип дії такого фільтру: конденсатор, володіючи малим реактивним опором на високих частотах, пропускає струм безперешкодно, а на низьких

частотах його реактивний опір максимальний, тому струм через нього не проходить.

Г-образні частотні фільтри на котушці індуктивності і резисторі

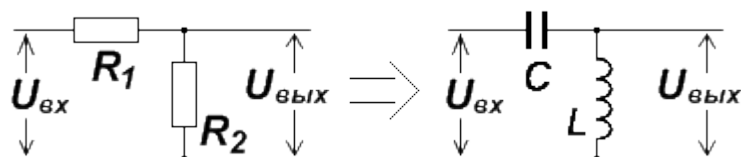
Фільтр високих частот може бути отриманий шляхом заміни резистора R_2 діляника напруги на котушку індуктивності L , що володіє своїм реактивним опором X_L .



Принцип дії такого фільтру: індуктивність, володіючи малим реактивним опором на низьких частотах, шунтує їх на корпус, а на високих частотах її реактивний опір максимально, тому струм через неї не проходить.

Г-образні частотні фільтри на конденсаторі і дроселі

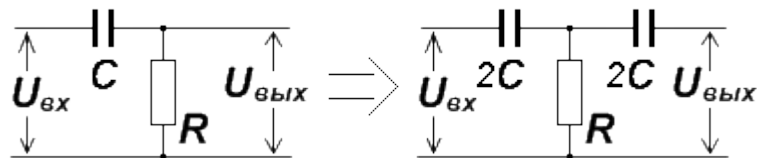
Фільтр високих частот виходить з звичайного діляника напруги шляхом заміни не тільки резистора R_1 на конденсатор C , а так само резистора R_2 на дросель L . Такий фільтр має більш значний зріз частот (більш крутий спад) АЧХ, ніж зазначені вище фільтри на RC або RL ланцюгах .



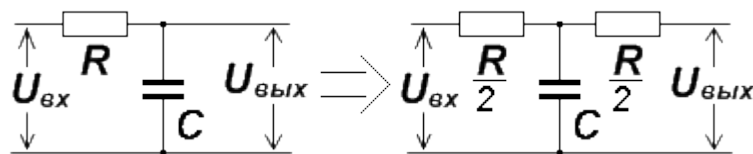
Т - образні фільтри високих і низьких частот

Т- образні фільтри високих і низьких частот, це ті ж Г- образні фільтри, до яких додається ще один елемент. Таким чином, вони розраховуються так само як діляник напруги, що складається з двох елементів з нелінійною АЧХ. А після, до розрахункового значенням підсумовується значення реактивного опору третього елемента. Інший, менш точний спосіб розрахунку Т-образного фільтру починається з розрахунку Г-образного фільтру, після чого, значення «першого» розрахованого елемента Г-образного фільтру збільшується, або зменшується в два рази - «розподіляється» на два елементи Т-образного фільтру. Якщо це

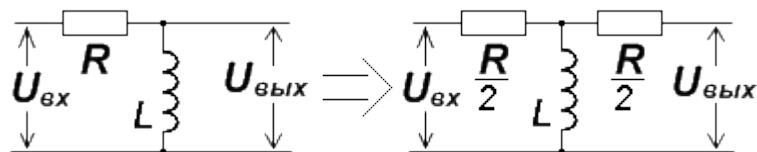
конденсатор, то значення ємності конденсаторів в Т-фільтрі збільшується в два рази, а якщо це резистор або дросель, то значення опору, або індуктивності котушок зменшується в два рази. Перетворення фільтрів показано на малюнках. Особливість Т-образних фільтрів полягає в тому, що вони в порівнянні з Г-подібними, своїм вихідним опором роблять менший шунтуючи дію на радіо ланцюга, що стоять за фільтром.



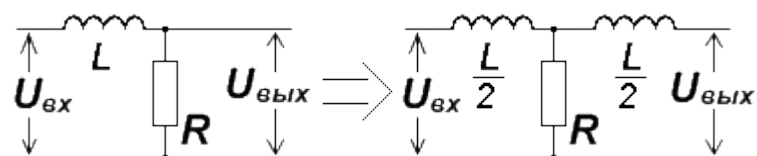
Перетворення Г-образного RC фільтра високих частот, в Т-подібний RC фільтр високих частот



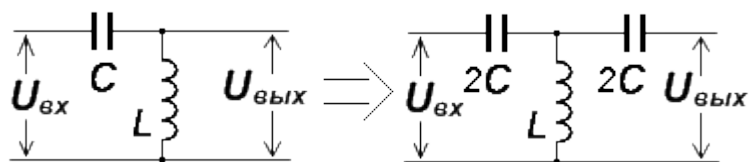
Перетворення Г-образного RC фільтра низьких частот, в Т-подібний RC фільтр низьких частот



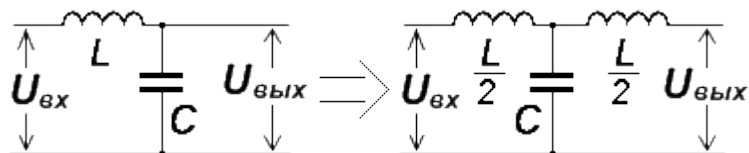
Перетворення Г-образного RL фільтра високих частот, в Т-подібний RL фільтр високих частот



Перетворення Г-образного RL фільтра низьких частот, в Т-подібний RL фільтр низьких частот



Перетворення Г-образного LC фільтра високих частот, в Т-подібний LC фільтр високих частот

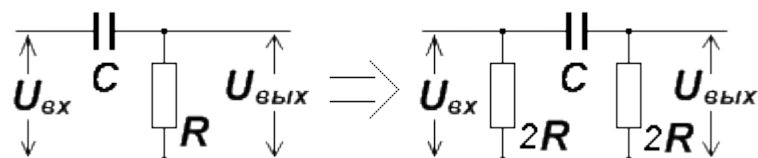


Перетворення Г-образного LC фільтра низьких частот, в Т-подібний LC фільтр низьких частот

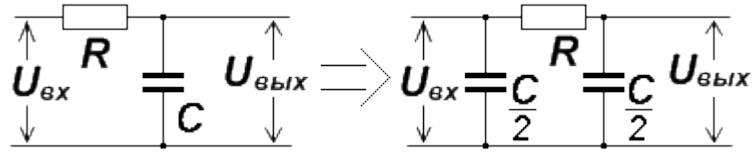
П - образні фільтри високих і низьких частот

П-подібні фільтри, це ті ж Г-образні фільтри, до яких додається ще один елемент попереду фільтра. Все, що було написано для Т-образних фільтрів справедливо для П-образних, різниця лише в тому, що вони в порівнянні з Г-подібними, кілька збільшують шунтуючі дію на радіо ланцюги, що стоять перед фільтром.

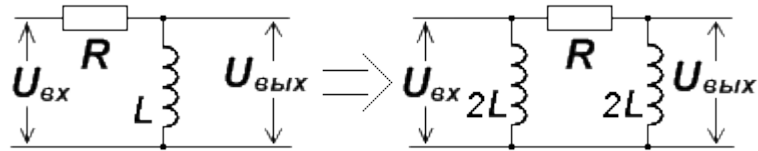
Як і у випадку з Т-подібними фільтрами, для розрахунку П-образних використовують формули подільника напруги, з додаванням додаткового шунтуючого опору першого елемента фільтра. Інший, менш точний спосіб розрахунку П-образного фільтра починається з розрахунку Г-образного фільтра, після чого, значення «останнього» розрахованого елемента Г-образного фільтра збільшується, або зменшується в два рази - «розподіляється» на два елементи П-образного фільтра. На противагу Т-образному фільтру, якщо це конденсатор, то значення ємності конденсаторів в П-фільтрі зменшується в два рази, а якщо це резистор або дросель, то значення опору, або індуктивності котушок збільшується в два рази.



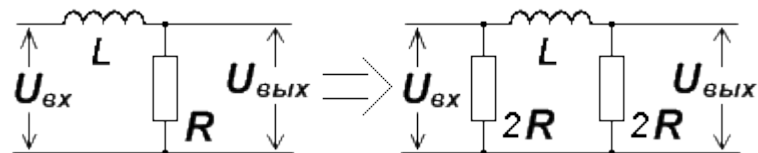
Перетворення Г-образного RC фільтра високих частот, в П-подібний RC фільтр високих частот



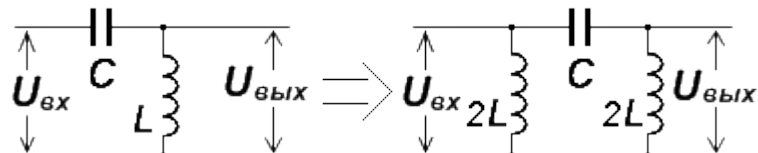
Перетворення Г-образного RC фільтра низьких частот, в П-подібний RC фільтр низьких частот



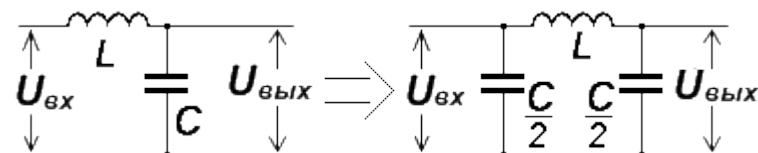
Перетворення Г-образного RL фільтра високих частот, в П-подібний RL фільтр високих частот



Перетворення Г-образного RL фільтра низьких частот, в П-подібний RL фільтр низьких частот



Перетворення Г-образного LC фільтра високих частот, в П-подібний LC фільтр високих частот



Перетворення Г-образного LC фільтра низьких частот, в П-подібний LC фільтр низьких частот

У зв'язку з тим, що виготовлення котушок індуктивності (дроселів) вимагає певних зусиль, а іноді і додаткового місця для їх розміщення, то більш вигідним буває виготовлення фільтрів з конденсаторів і резисторів, без застосування

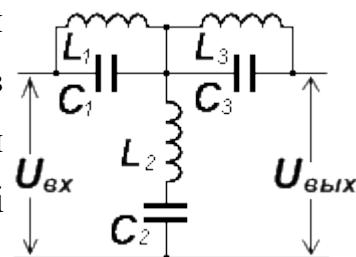
катушок індуктивності. Це особливо актуально на звукових частотах. Так, фільтри верхніх частот зазвичай роблять Т-образними, а нижніх частот роблять П-образними. Є ще фільтри середніх частот, які, як правило, роблять Г-подібними (з двох конденсаторів)

Смугові резонансні фільтри

Смугові резонансні частотні фільтри - призначені для виділення, або режекції (вирізання) певної смуги частот. Резонансні частотні фільтри можуть складатися з одного, двох, або трьох коливальних контурів, налаштованих на певну частоту. Резонансні фільтри володіють найбільш крутим підйомом (або спадом) АЧХ, в порівнянні з іншими (НЕ резонансними) фільтрами. Смугові резонансні частотні фільтри можуть бути одноелементними - з одним контуром, Г-подібними - з двома контурами, Т і П-образними - з трьома контурами, багатоланкові - з чотирма і більше контурами.

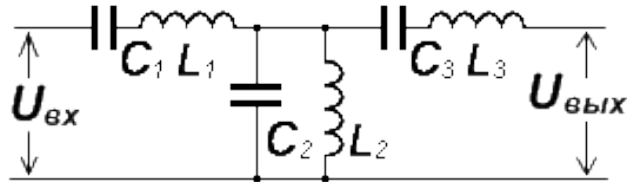
На малюнку представлена схема Т-образного смугового резонансного фільтра, призначеного для виділення певної частоти. Складається він з трьох коливальних контурів. С1L1 і С3L3 - послідовні коливальні контури, на резонансній частоті мають малий опір протікаючому току, а на інших частотах навпаки - великий. Паралельний контур С2L2 навпаки, має великий опір на резонансній частоті, володіючи малим опором на інших частотах. Для розширення ширини смуги пропускання такого фільтра, зменшують добротність контурів, змінюючи конструкцію катушок індуктивності, розбудовуючи контуру «вправо, вліво» на частоту, трохи відрізняється від центральної резонансної, паралельно контуру С2L2 підключають резистор.

На наступному малюнку представлена схема Т-образного режекторного резонансного фільтра, призначеного для придушення певної частоти. Він, як і попередній фільтр складається з трьох коливальних контурів, але принцип виділення частот у такого фільтра інший. С1L1 і С3L3 - паралельні коливальні контури, на резонансній частоті мають великий опір протікаючому току, а на інших частотах - малий. Паралельний контур С2L2 навпаки, має малий опір на резонансній частоті, володіючи великим опором на інших частотах. Таким чином, якщо попередній фільтр резонансний



частоту виділяє, а решта частоти пригнічує, то цей фільтр, безперешкодно пропускає всі частоти, крім резонансної частоти.

Порядок розрахунку смугових резонансних фільтрів заснований все на тому ж ділянці напруги, де в якості одиничного елемента виступає LC контур з його характеристичним опором.



Практична частина

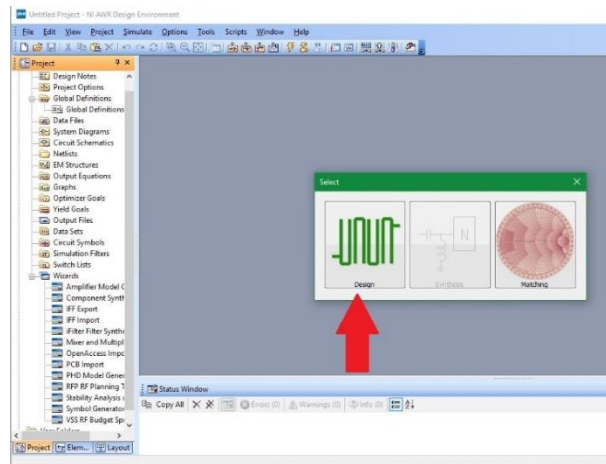
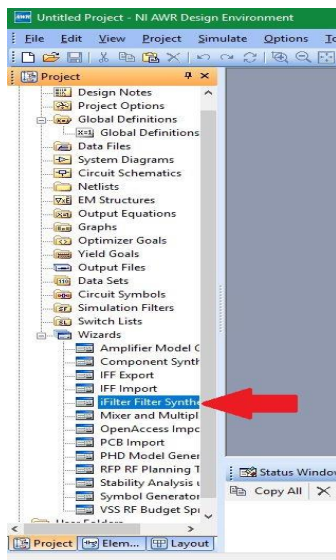
Лабораторна робота №4. Проектування фільтра вищих частот

Вихідні дані

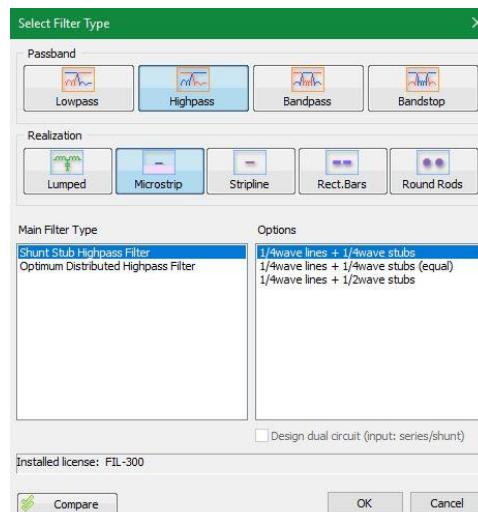
Вихідними даними для виконання лабораторної роботи є:

- частота зрізу фільтра f_3 ;
- мінімальне загасання L_3 в смузі загородження на частоті f_3 ;
- матеріал діелектрика.

1. У вкладці **Project** знаходимо меню **Wizards** і в ньому запускаємо утиліту **iFilter Filter Wizard**. Обираємо **Design**.



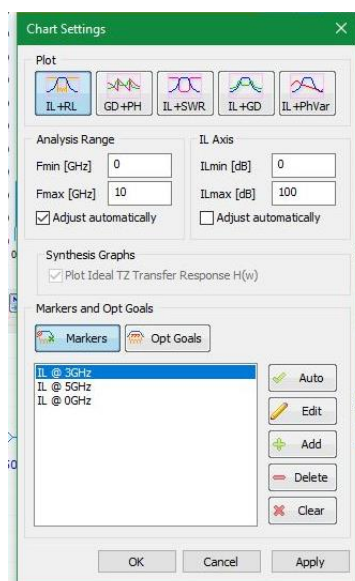
2. У вікні **Select Filter Type** натискаємо по кнопках **Highpass** і **Microstrip** та **OK**.



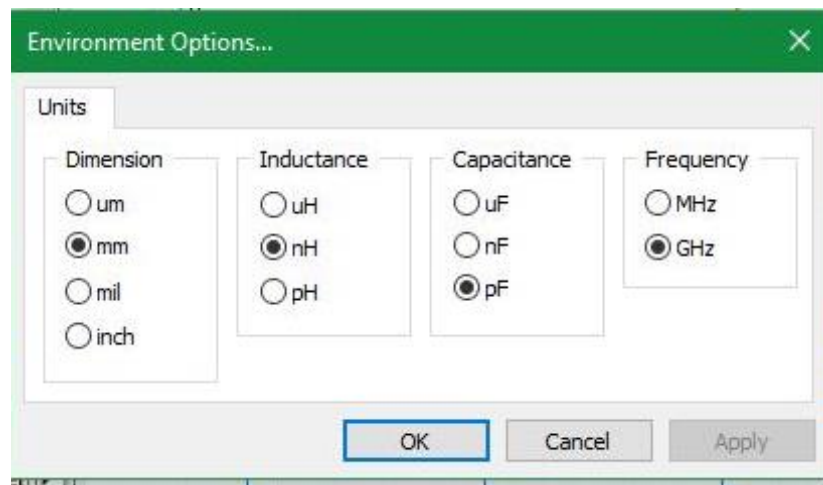
3. У вкладці **Approximation Function** виберіть **Chebyshev** (поле 1). Введіть значення 1 в поле (2) **Ripple [dB]**. Вводимо значення частоти зрізу в поле (3) **Fp [GHz]** (відповідно до варіанту). Натискаємо на значок **REAL** (поле 8). Наискаємо **Design Options** (поле4) і обираємо потрібні параметри конструкції. У вкладці **Environment Options** (поле 5) виставляємо потрібні одиниці вимірювання. Поле 7 - Edit Chart Settings. Поле 6 - **Generate Design** потрібне для визначення параметрів та створення графіку і конструкції фільтра (детальний опис на наступних сторінках).



4. В отриманому вікні Edit Chart Settings в області Analysis Range в поле Fmin [GHz] вводим 0, в поле Fmax [GHz] вводим верхню частоту аналізу (взяту вище частоти зрізу фільтра на 2 – 3 ГГц), обираємо IL+RL (тип графіку), натискаємо Apply и ОК.

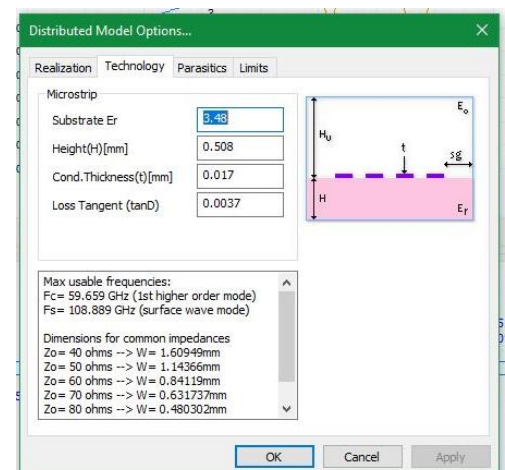
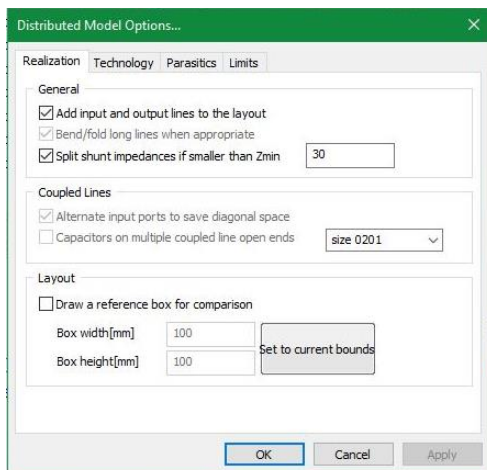


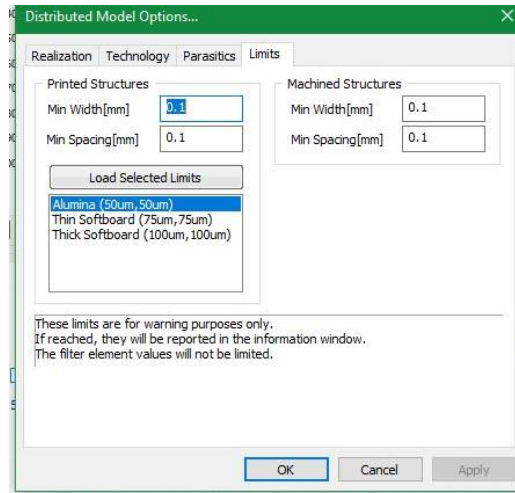
5. Environment Options (одиниці виміру середовища)



6. Design Options (варіанти конструкції)

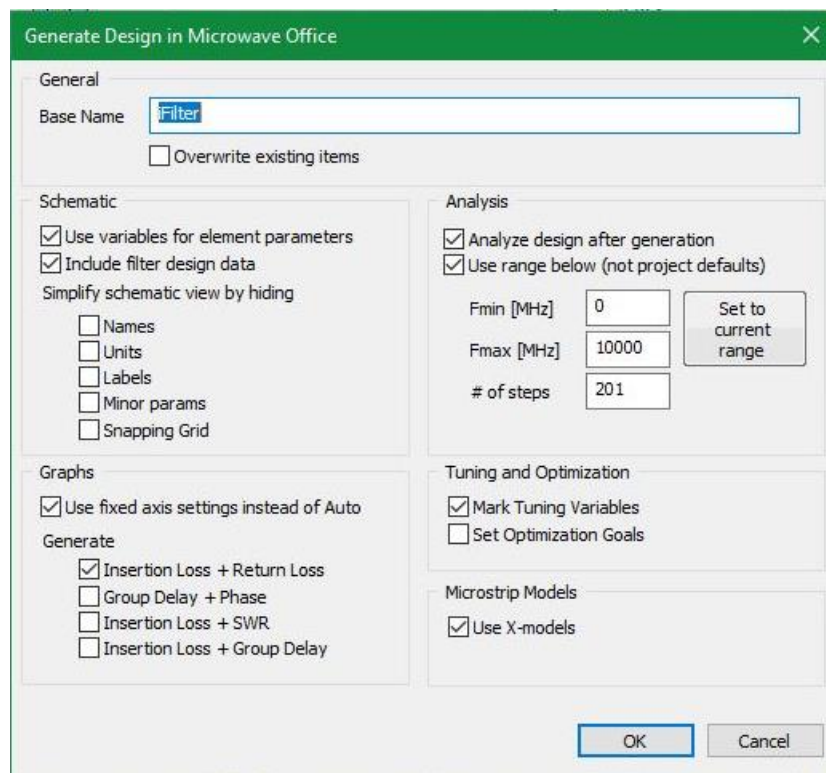
У вкладці Realization відмічаємо Add input and output lines to the layout (додати лінії на вході і виході топології). У вкладці Technology у поле Substrate ϵ_r вводимо значення діелектричної проникності у відповідності до вапріанту, в поле Height(H)[mm] (товщина підкладки) вводимо товщину матеріалу (дивись додаток 2), в поле Cond. Thickness(t)[mm] (товщина провідника) вводимо значення товщини фольги (дивись додаток 2), в поле Loss Tangent (tanD) вводимо значення тангенса кута діелектричних втрат для заданого матеріалу. Наведені значення взяті із варіанту 1. У вкладці Limits задайте мінімальні ширину провідників і зазору між ними 0,1 мм.



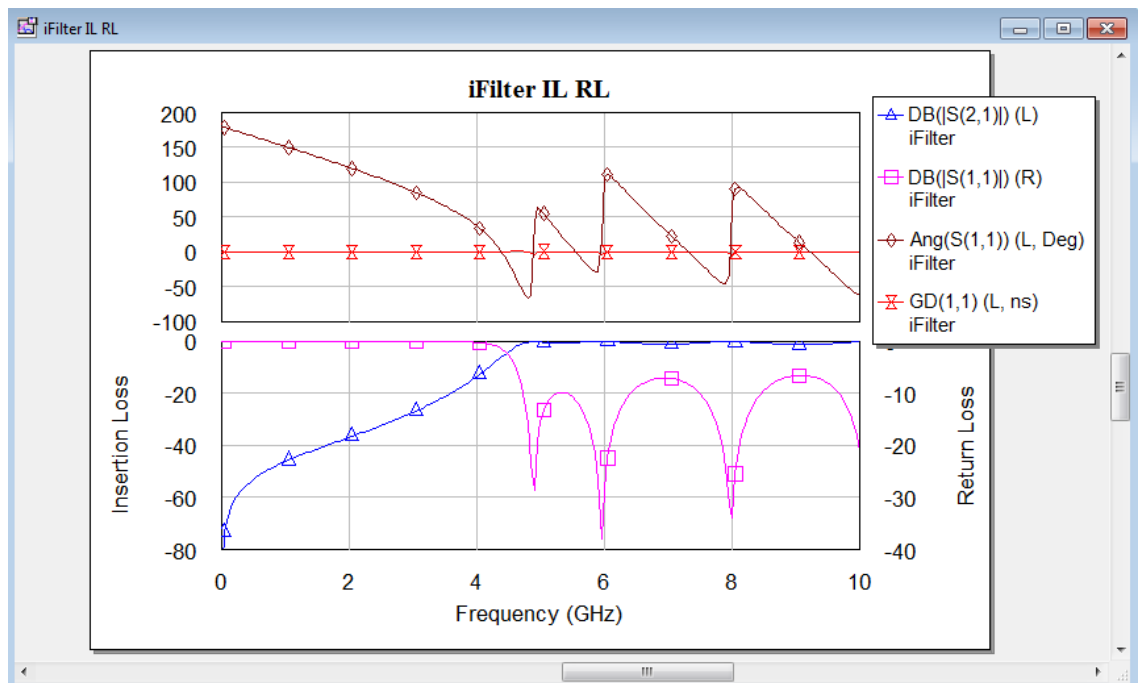
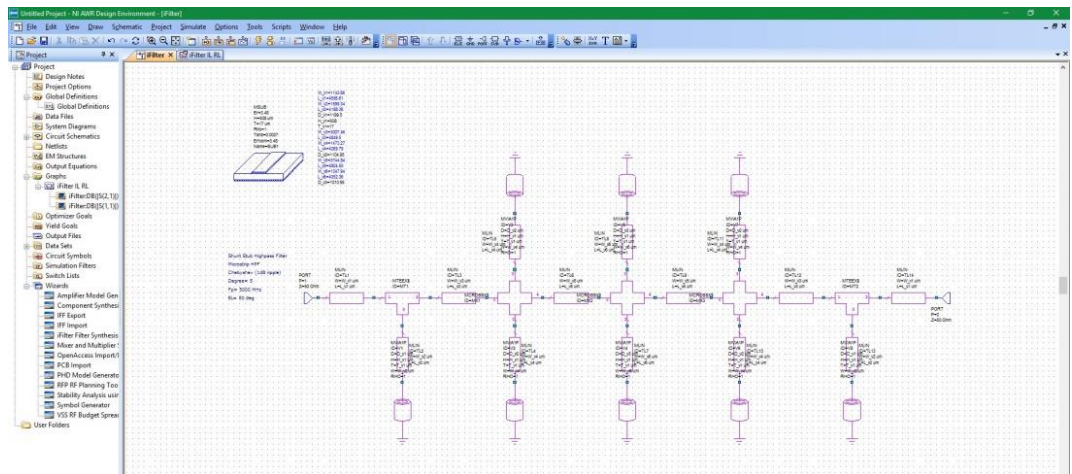


7. Generate Design (створити дизайн)

У цьому вікні відмітьте необхідний графік (Insertion Loss + Return Loss), відмітьте Use variables for element parameters і Mark Tuning Variables. Задайте необхідний діапазон частот для моделювання і кількість точок моделювання та натисніть ОК. Потім натисніть ОК в основному вікні iFilter.

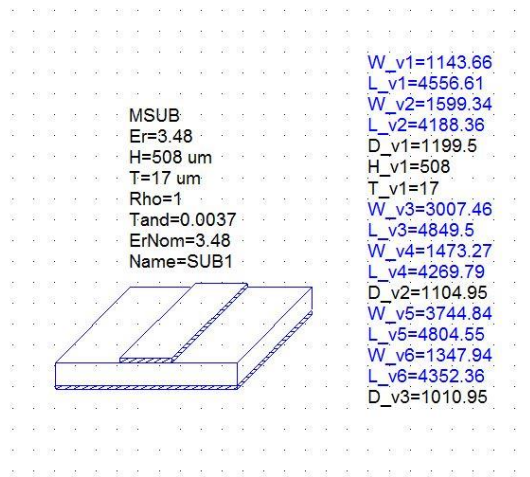


8. Отриманий результат



9. Оптимізація схемної моделі фільтра з метою отримання заданих частотних характеристик

Синім кольором виділені параметри, вибрані для оптимізації, які можна регулювати за допомогою Tune



Variable Tuner

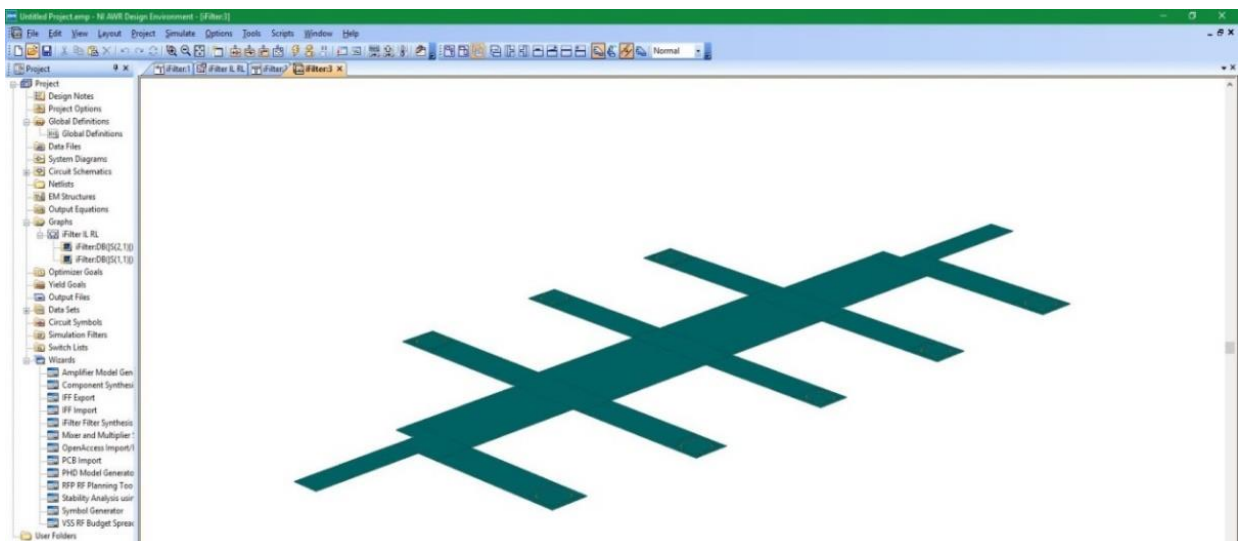
Tune	:L_v1	:L_v2	:L_v3	:L_v4	:L_v5	:L_v6	:W_v1	:W_v2	:W_v3	:W_v4	:W_v5	:W_v6
Nom->	4556.6	4188.3	4849.5	4269.7	4804.5	4352.3	1143.6	1599.3	3007.4	1473.2	3744.8	1347.9
Max->	5467.9	5026.0	5819.4	5123.7	5765.4	5222.8	1372.3	1919.2	3608.9	1767.9	4493.8	1617.5
Close												
Save												
Restore												
Tag												
Sweep												
Freeze												
Clear												
Help												
Min->	3645.2	3350.6	3879.6	3415.8	3843.6	3481.8	914.92	1279.4	2405.9	1178.6	2995.8	1078.3
Step->	10	10	10	10	10	10	4	6	10	5	10	5

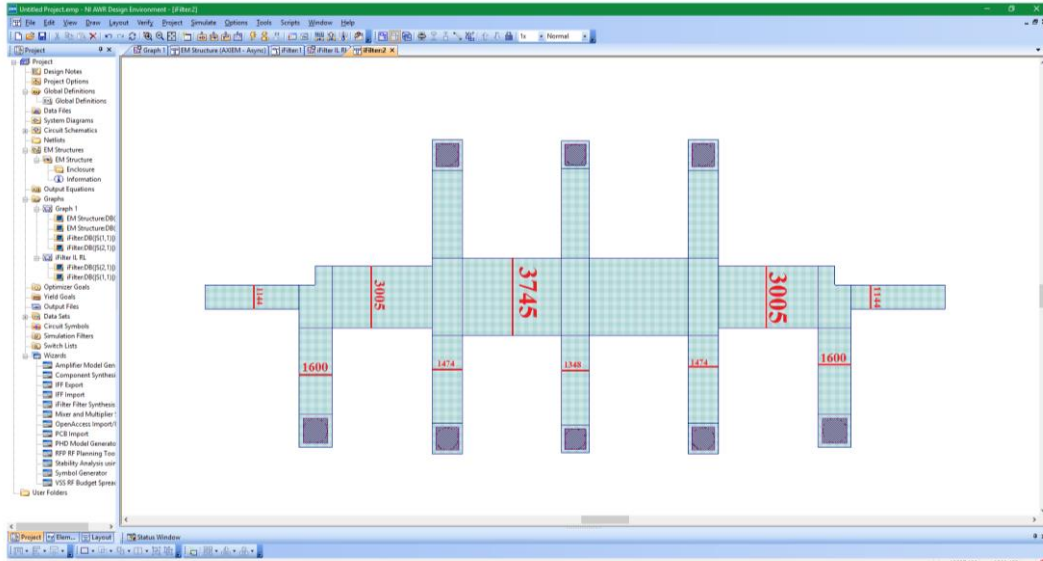
10. Отримання топології фільтр

Натисніть кнопку 

(View Layout), після чого відкриється вікно

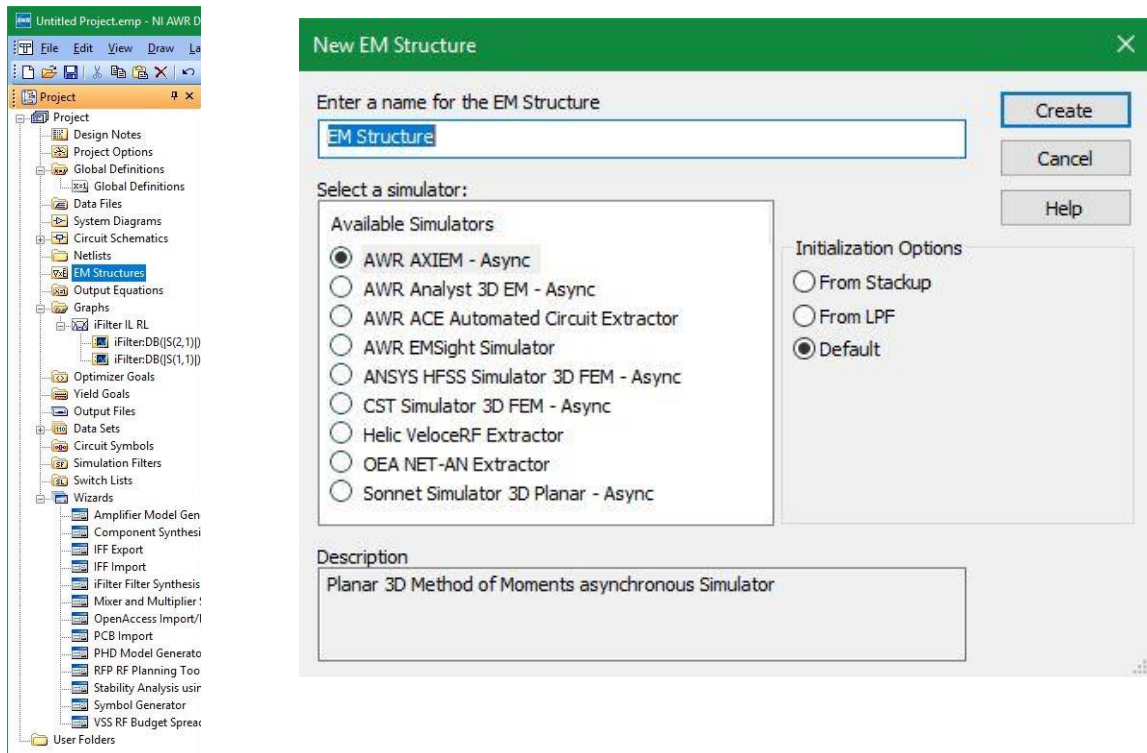
з топологією фільтра:



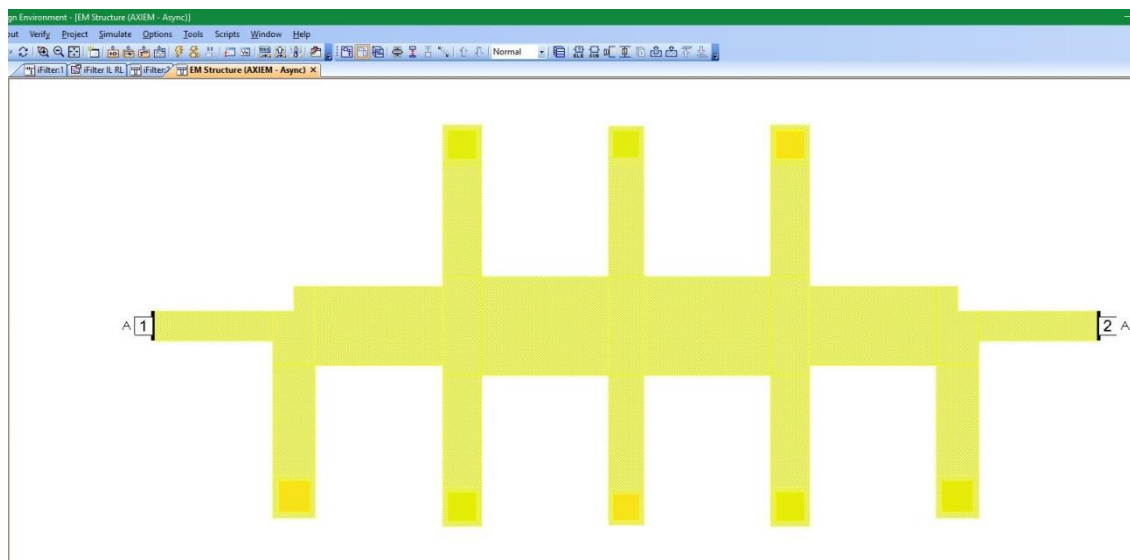
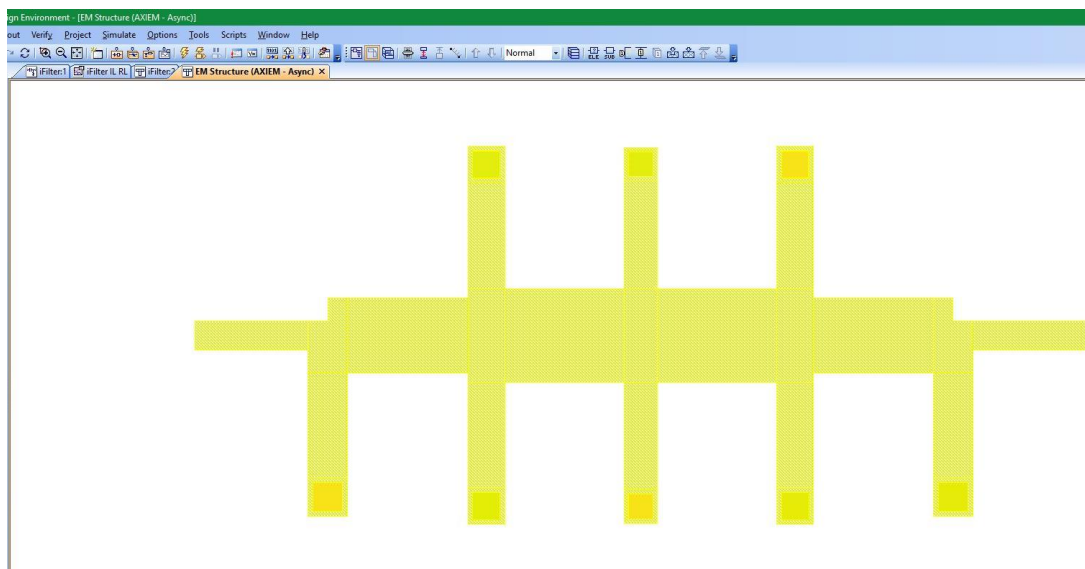


11. Створення електромагнітної моделі фільтра на основі його топології

У вкладці Project натисніть на EM Structures правою кнопкою миші і виберіть New EM Structure. Виберіть симулятор AWR AXIEM-Async або AWR EMsight.

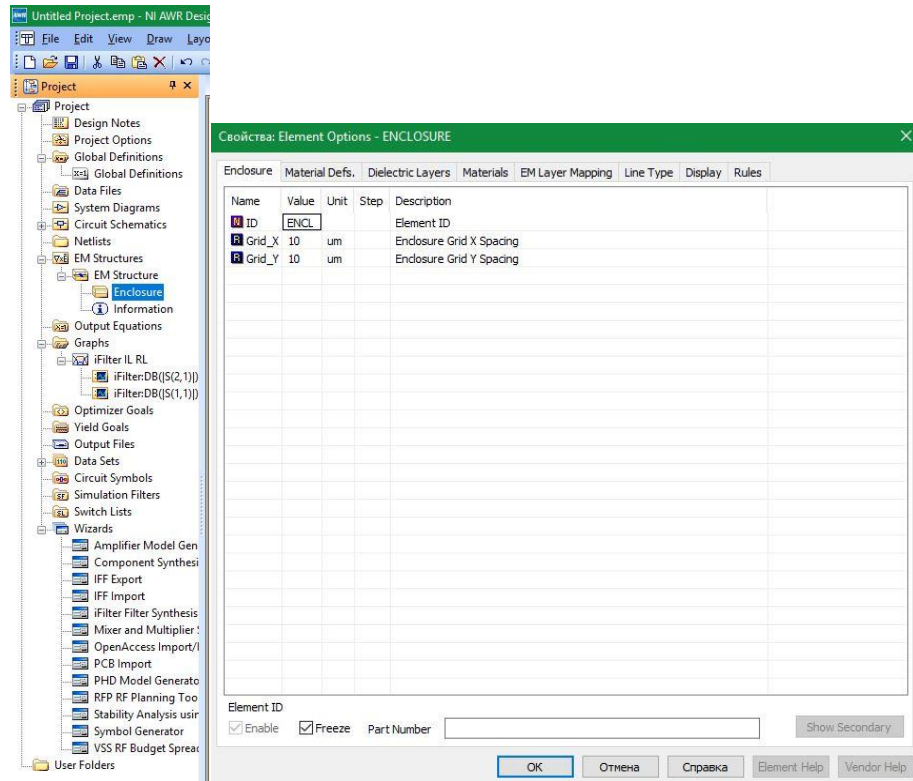


У вкладці з топологією фільтра скопіюйте топологію фільтра, натиснувши клавіші **Ctrl + C**. Вставте топологію фільтра в полі ЕМ-моделі, натиснувши клавіші **Ctrl + V**. Після вставки топології в електромагнітну модель необхідно додати порти. Виділіть топологію фільтра, натиснувши кнопку **Edge Port** і установіть порти по кінцях фільтра. Виділіть отриману топологію фільтра і натисніть на неї правою кнопкою миші. У вікні, виберіть **Snap to Grid**.



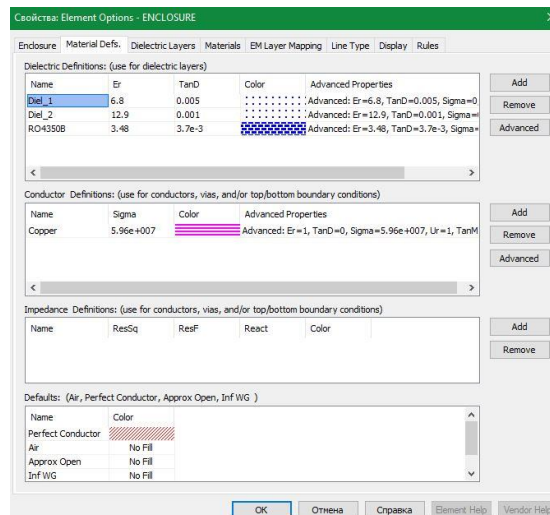
12. Налаштування ЕМ-моделі

Необхідно натиснути правою кнопкою миші на пункті Enclosure, і вибрати Edit. У вкладці Enclosure налаштовується крок сітки. Він повинен бути в 5 - 10 разів менше мінімального розміру елемента фільтра. Від кроку сітки залежить точність і, як наслідок, час моделювання.



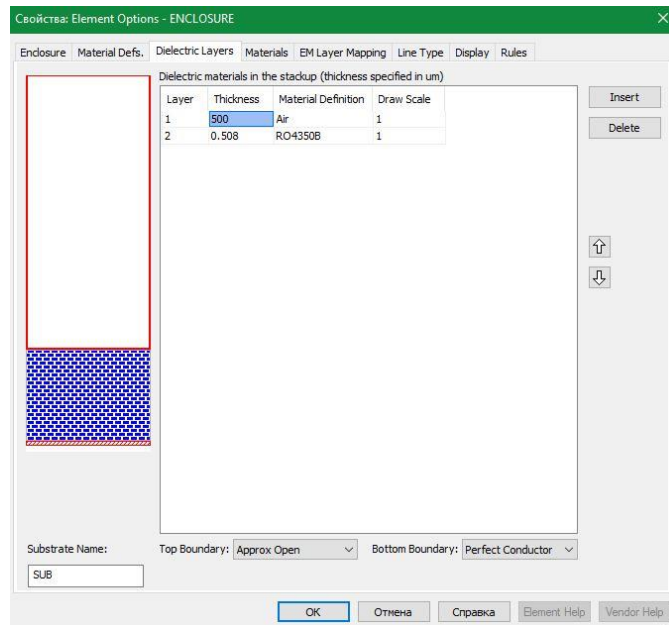
13. Material Defs (визначити матеріали)

У вікні Dielectric Definitions додаємо новий діелектрик, налаштовуємо його параметри відповідно до варіанту завдання. В полі Conductor Definitions додаємо матеріал мідь



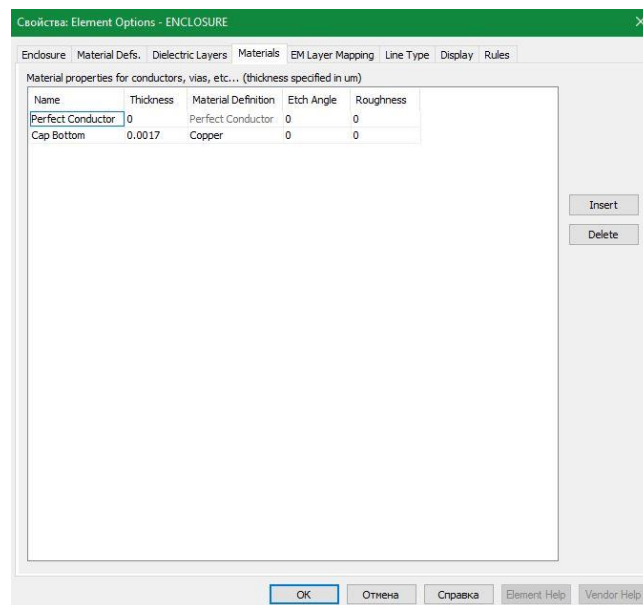
14. Dielectric Layers (діелектричні шари)

Потрібно налаштувати товщину діелектриків, в тому числі товщину повітря (в 10 - 20 разів більше товщини діелектрика). Дані згідно варіанту.



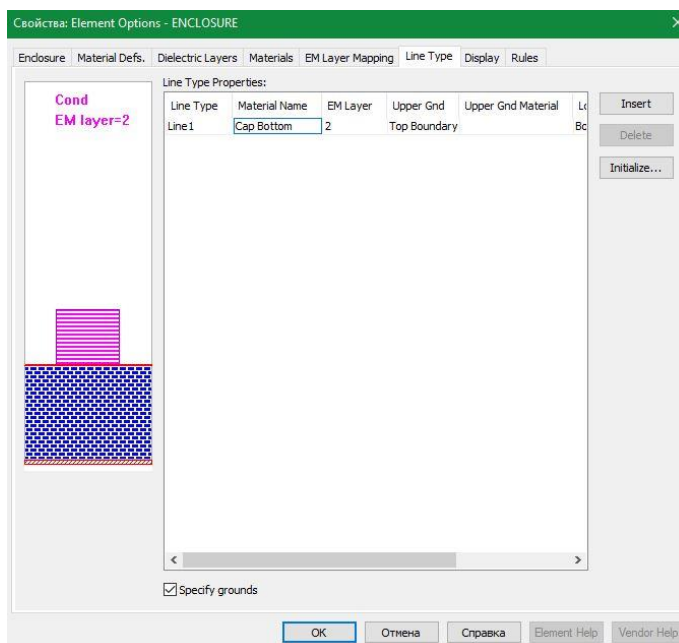
15. Materials (матеріали)

Для шару **Cap Bottom** за матеріал вибираємо мідь (**Copper**) і вводимо потрібну товщину шару провідника на друкованій платі.



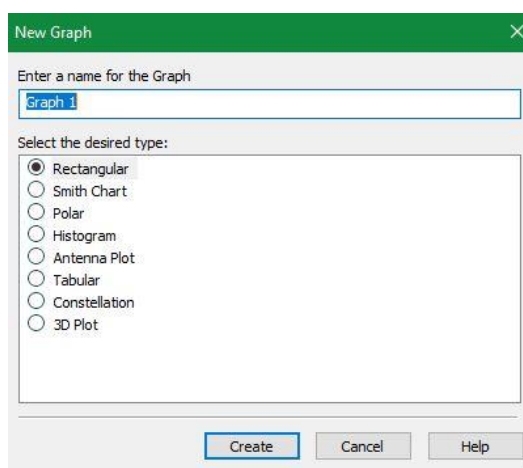
16. Line Type (Тип лінії)

Встановлюємо матеріал провідника, обраний в полі Conductor Definitions вкладки Material Defs (мідь).



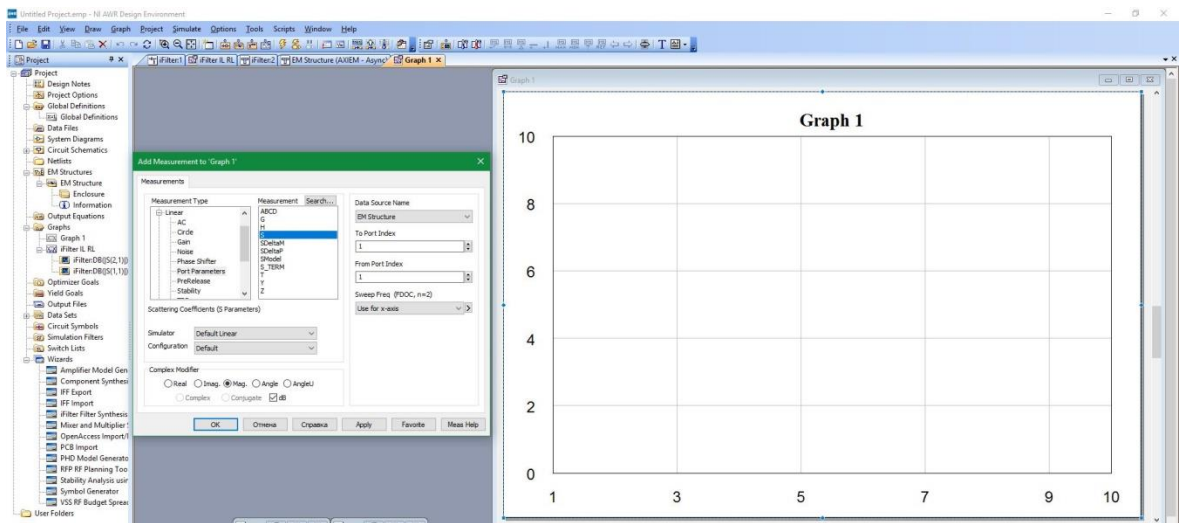
17. Виконання електромагнітного аналізу фільтра

У вкладці Project знайдіть вкладку Graphs і натисніть на неї правою кнопкою миші. Виберіть New Graphs. Потім у вікні виберіть прямокутний графік (Rectangular).



У вкладці **Graph 1** натискаємо на неї правою кнопкою миші і вибираємо **Add Measurement**. У вкладці **Data Source Name** виберіть створену

електромагнітну структуру. У вкладці **Complex Modifier** відмічаємо галочку на **dB**.

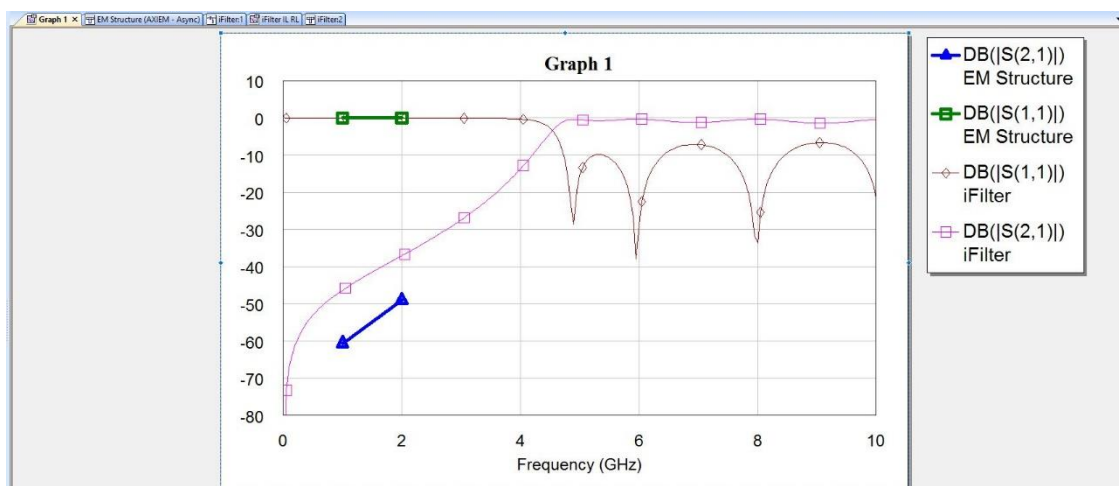


Результати

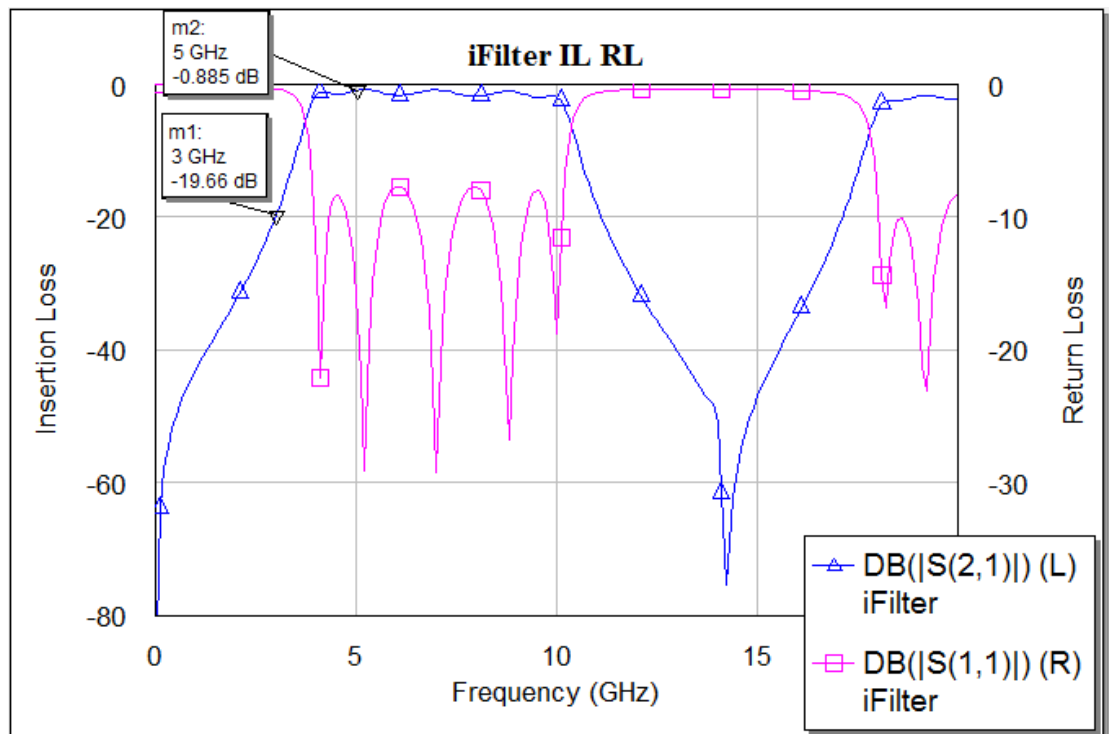
Створені графіки для $S(1,1)$ і $S(2,1)$.

Для цього у вкладці **To Port Index** задаємо значення обох портів рівними 1, натискаємо **Apply**. Потім задаємо в **To Port Index** значення 2, натискаємо **Apply** і **OK**.

Варіант 1



Варіант 11



Висновок

В даній лабораторній роботі ми дізнались, що таке фільтр високих частот та який принцип побудови таких фільтрів, набули навичок проектування фільтра верхніх частот з використанням утиліти iFilter і програми Microwave Office зі складу програмного пакету AWRDesign Environment. Було використано студентську версію Microwave Office.

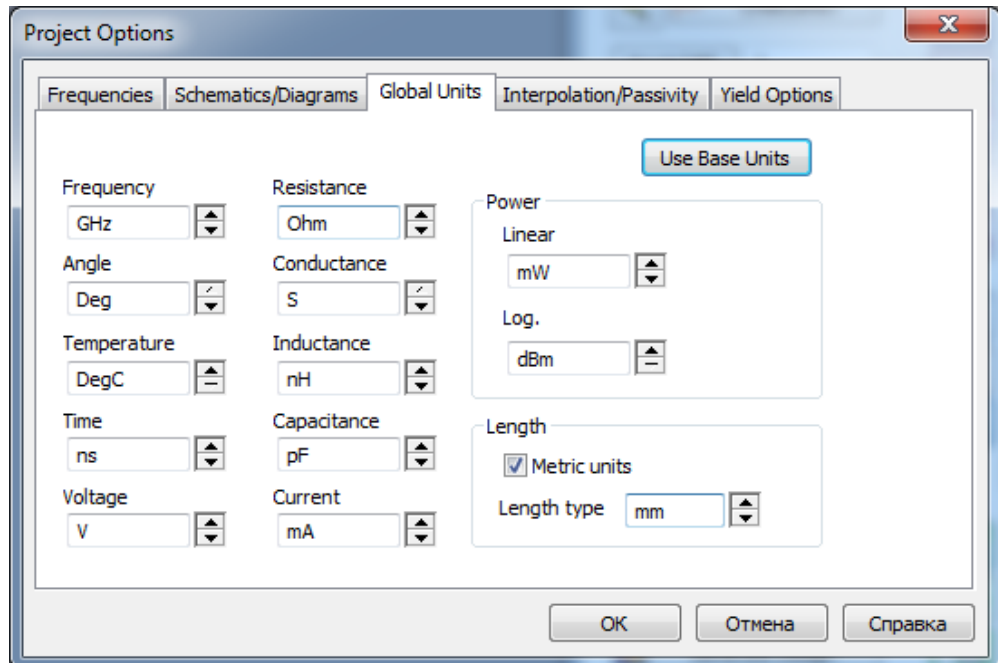
Список використаної літератури:

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Фільтр_високих_частот
2. <http://www.meanders.ru/filters.shtml>
3. А. С. Подстригаев « ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ: ПРАКТИКУМ»

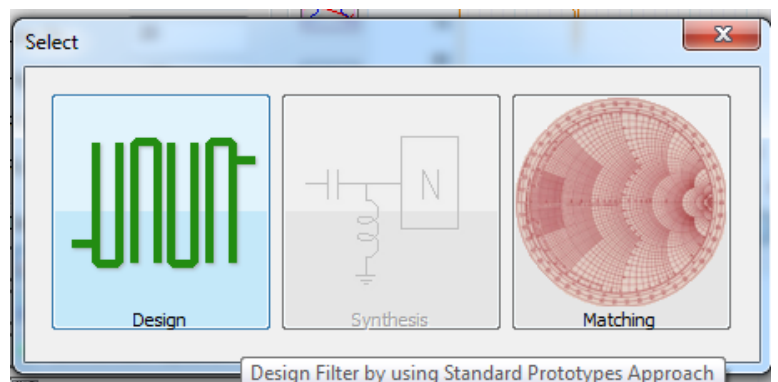
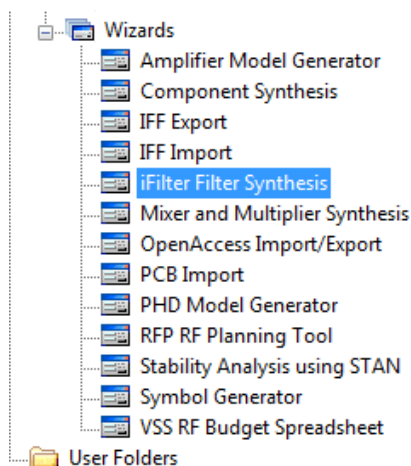
Практична робота №1

Проектування фільтра нижніх частот

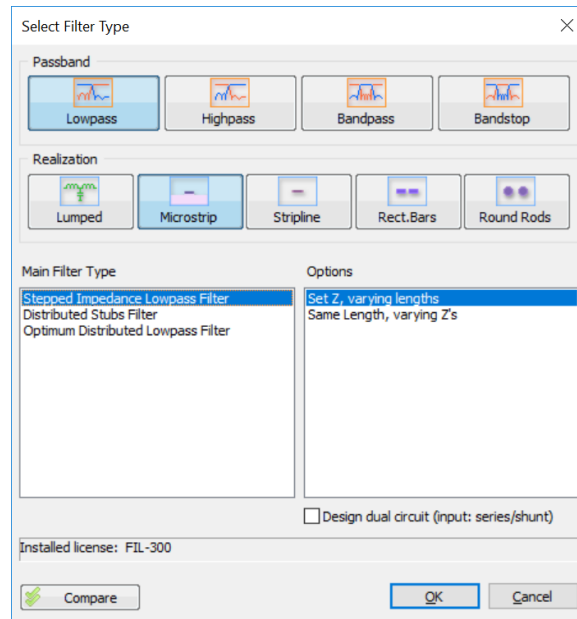
1. Перш за все, заходимо до вкладки Options та обираємо Project Options. Тут нам необхідно змінити розмірності величин.



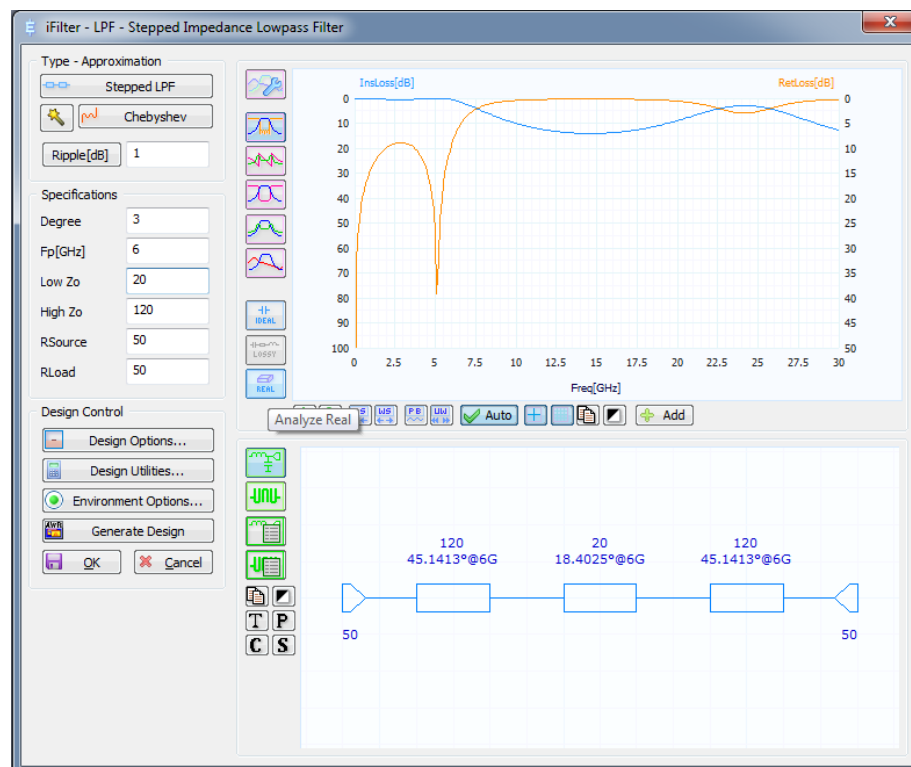
1. У вкладці **Project** знаходимо меню **Wizards** і в ньому запускаємо утиліту **iFilter Filter Wizard**. Обираємо **Design**.



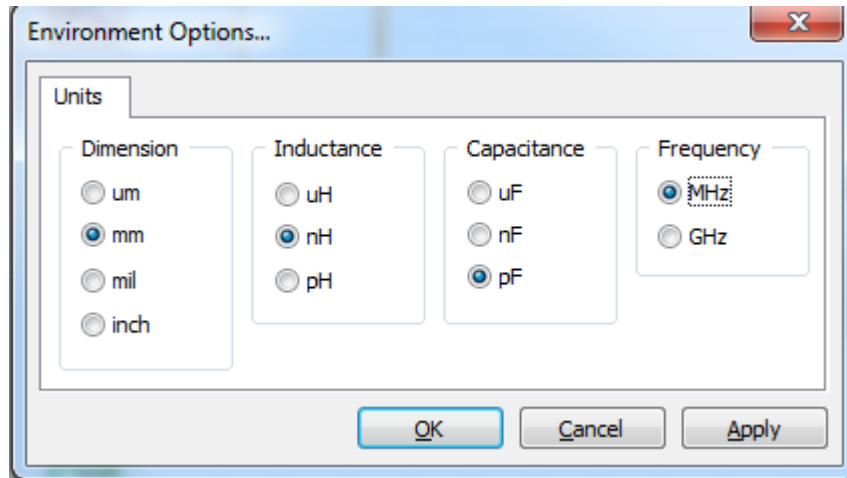
3. У вікні **Select Filter Type** натискаємо по кнопках **Lowpass** і **Microstrip**.
Обираємо тип фільтру **Stepped Impedance Lowpass Filter**.



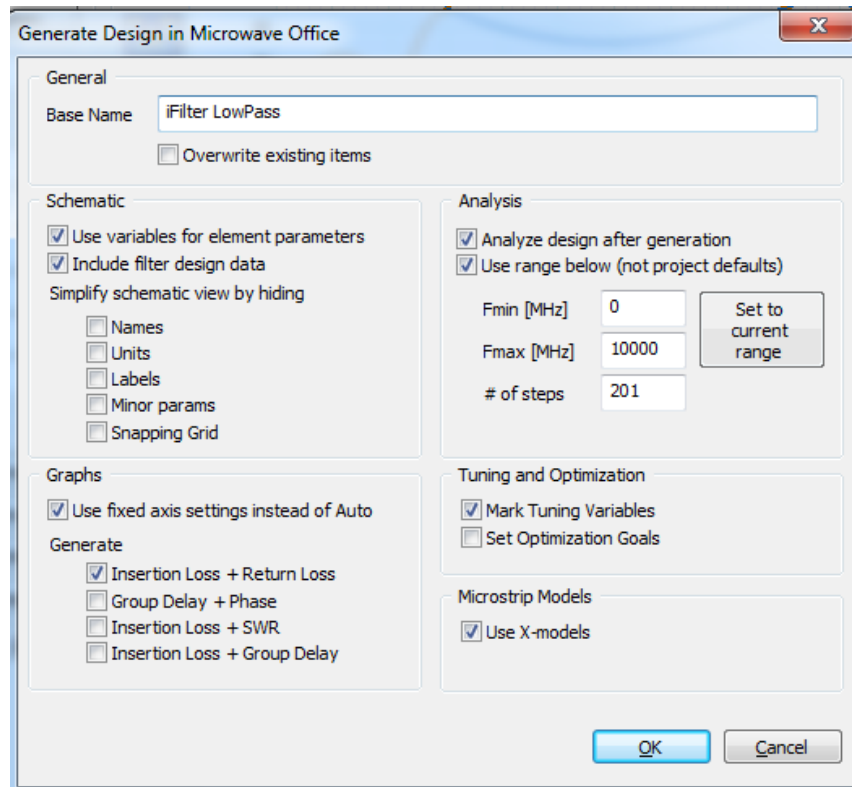
4. У відкритому вікні змінюємо тип аналізу на **Real**. У полі **Ripple [dB]** задаємо значення 1. Значення **Degree** задаємо рівним 3. Частота **Fp** рівна 6 ГГц. Це є основні параметри, інші залишаємо за замовчуванням.



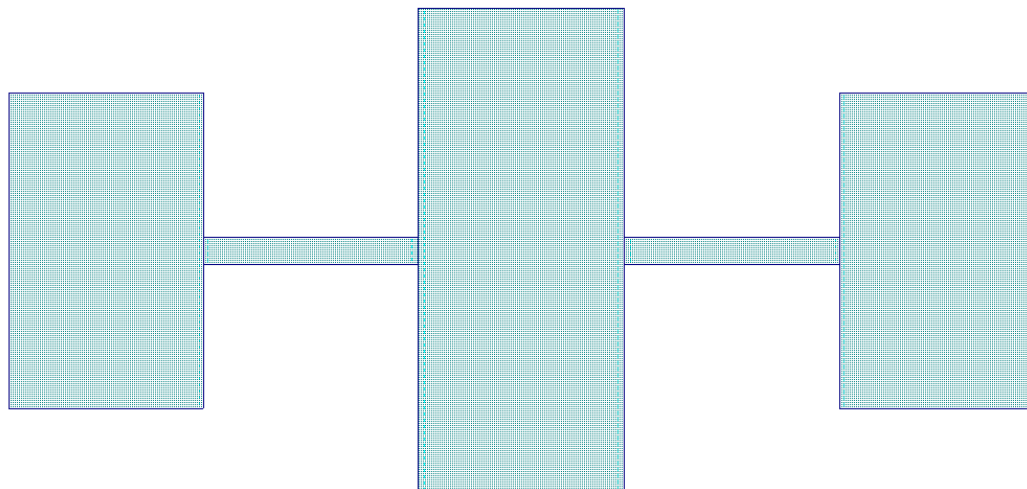
5. У вкладці Environment Options задаємо розмірності у відповідності до скріншоту та натискаємо ОК.



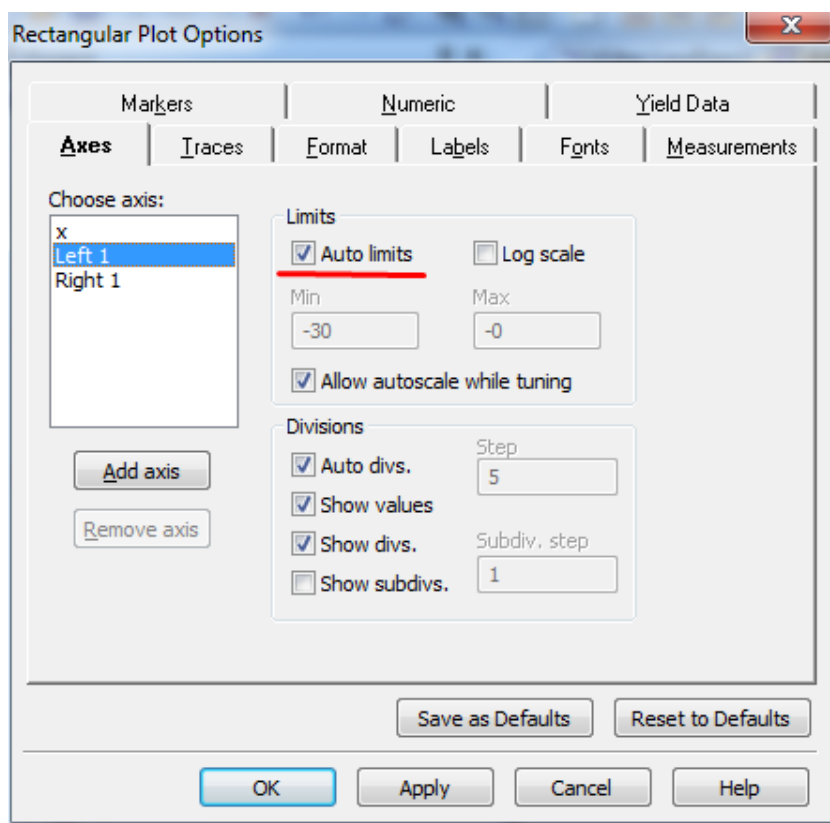
6. Тиснемо Generate Design. Задаємо ім'я фільтру та обираємо робочий діапазон частот. У нашому випадку, через те, що ми обрали F_p 6 ГГц, то зручним діапазоном буде від 0 ГГц до 10 ГГц.



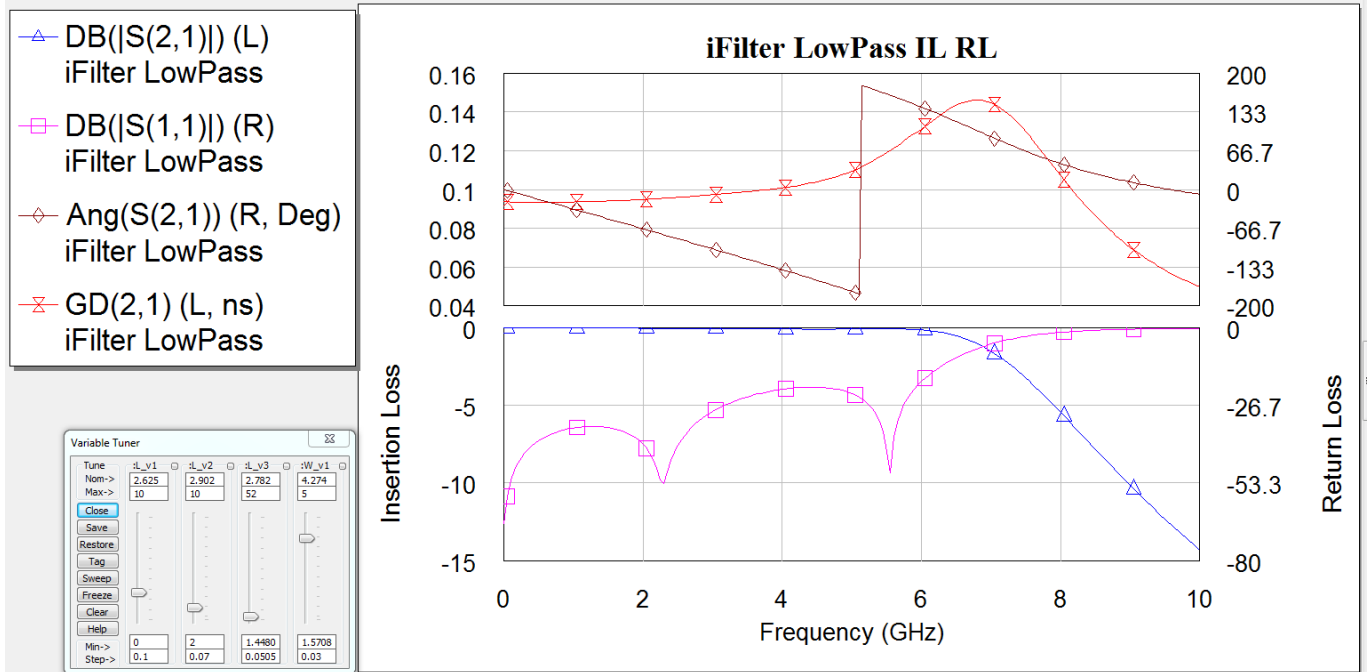
7 .Перейшовши до схеми, обираємо на панелі інструментів View Layout. Таким чином ми отримали топологію нашого фільтру.



8. Побудуємо графіки. IFilter вже побудував нам S11 та S21. Нам залишається додати Фазову характеристику та груповий час затримки. Перед цим, зайдемо в Options та на вкладці Axes Обеземо для Left1 та Right1 параметр Auto Limits.



9. Змінюючи параметри в Tune, ми маємо отримати характеристику, при якій S_{21} до 6 ГГц рівний нулю, а після починає зростати. Це відобразяє роботу нашого фільтра, який добре пропускає лише низькі частоти.



Лабораторна робота №5. Проектування малошумного підсилювача

Мета роботи: придбання навичок проектування малошумного підсилювача (МШП) з використанням програми Microwave Office зі складу програмного пакету AWR Design Environment.

Тривалість лабораторної роботи - 4 години.

Опис методу проектування

У лабораторній роботі необхідно зібрати схему МШП на основі польового транзистора і оптимізувати її основні характеристики для заданої робочої частоти.

Теоретичні відомості

У техніці НВЧ малошумні підсилювачі широко поширені. Так, в радіоприймальних пристроях коефіцієнт шуму всієї схеми визначається шумами першої ланки. Тому намагаються використовувати МШП якомога ближче до входу приймача. Чим раніше в схемі задіяний МШП і чим краще його характеристики, тим менше коефіцієнт шуму всього приймача, а значить, вище його чутливість - одна з основних характеристик радіоприймальних пристроїв.

Суттєвою характеристикою МШП є коефіцієнт шуму. Його зменшення в заданому діапазоні частот є основним завданням проектування.

Сучасні МШП, що працюють в діапазоні НВЧ, будуються на основі біполярного або польового транзисторів. На частотах до 7 ГГц використовується біполярний транзистор, більше цієї частоти - польові транзистори з бар'єром Шоттки (ПТШ), що володіють кращими шумовими і підсилювальними показниками.

З огляду на те, що вхідний і вихідний опір транзистора на практиці не дорівнює хвильовому опору джерела і навантаження і, крім того, має комплексний характер, необхідні вхідні і вихідні погоджуючі ланцюги (ПЛ). Щоб знизити активні втрати, що збільшують коефіцієнт шуму підсилювача, ланцюги будують на реактивних елементах, як правило, з розподіленими параметрами. Як ПЛ використовуються Г-образні ланцюги, чвертьхвильові трансформатори повних опорів, короткозамкнуті і розімкнуті шлейфи та ін.

У лабораторній роботі необхідно оперувати поняттям відносної смуги пропускання (ВСП). Це поняття широко використовується для різних смугових пристроїв. ВСП визначається за формулою

$$\Delta f = (f_2 - f_1) \cdot 100\% / f_0, \text{ де } f_1, f_2 - \text{ межі смуги пропускання,}$$
$$f_0 = f_1 \cdot f_2 - \text{ центральна частота смуги пропускання.}$$

Практична частина

Лабораторна робота №5. Проектування малошумного підсилювача

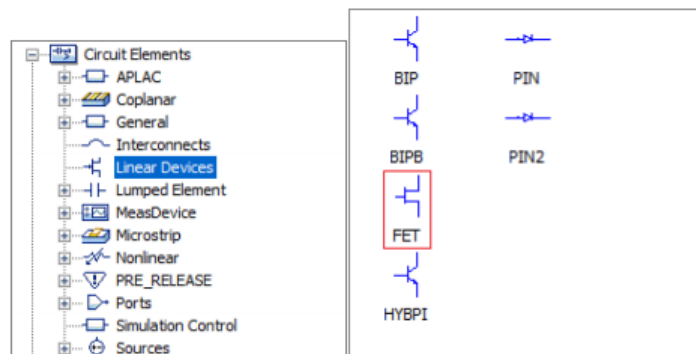
Вихідні дані

Вихідними даними для виконання лабораторної роботи є:

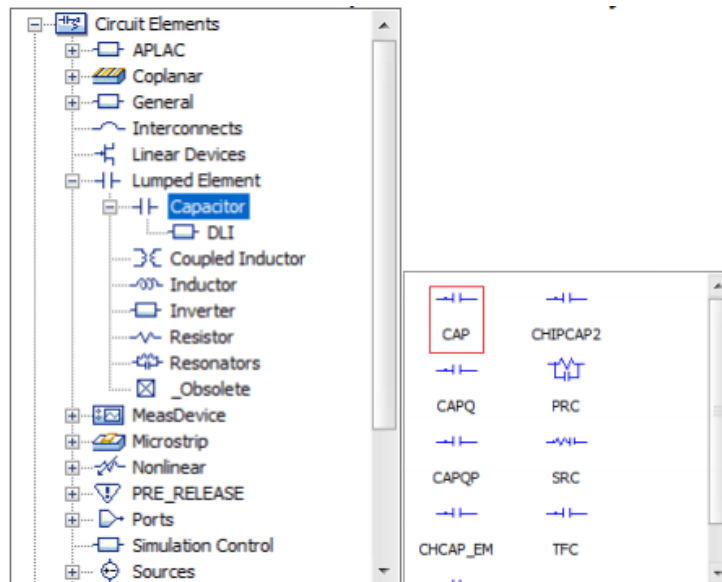
- коефіцієнт підсилення K на центральній частоті f_0 діапазону робочих частот;
- відносна смуга робочих частот Δf ;
- нерівномірність коефіцієнта посилення ΔK в смузі робочих частот;
- максимальний КСХН входу і виходу на частоті f_0 ;
- матеріал діелектрика.

1. Створення схеми МШП

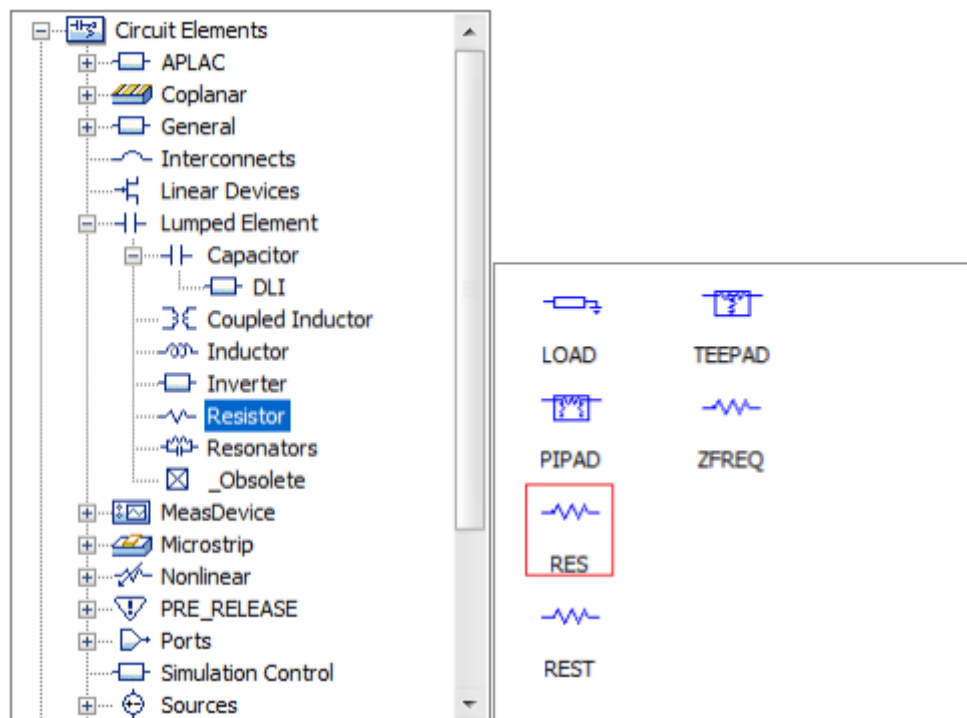
Клацніть на закладці **Elements**. У списку знайдіть папку **Linear Devices** (лінійні пристрої) і клацніть на ній. У нижньому вікні з'являться елементи. Перетягніть елемент **FET** (польовий транзистор) у вікно схеми.



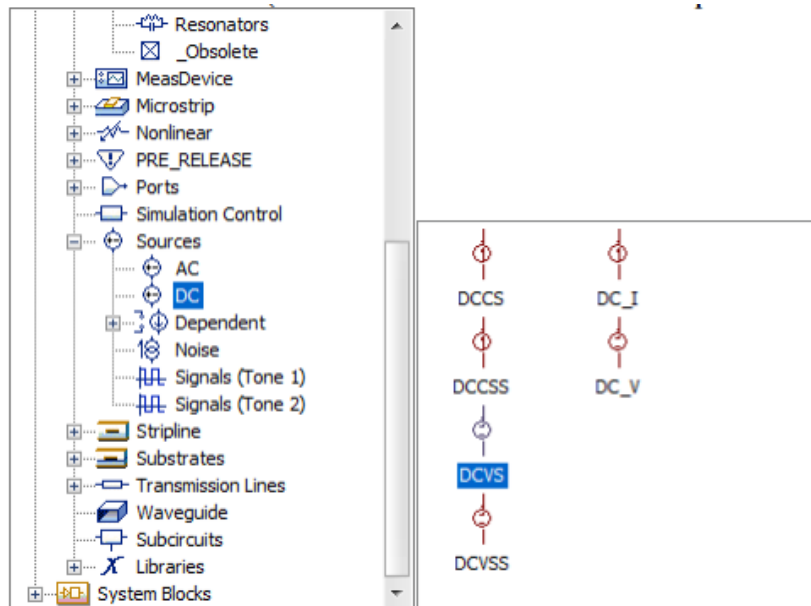
Подвійним кліком розкрийте папку **Lumped Element** (елементи з зосередженими параметрами), клацніть на папці **Capacitor**. З нижнього вікна перенесіть на схему елемент **Cap**.



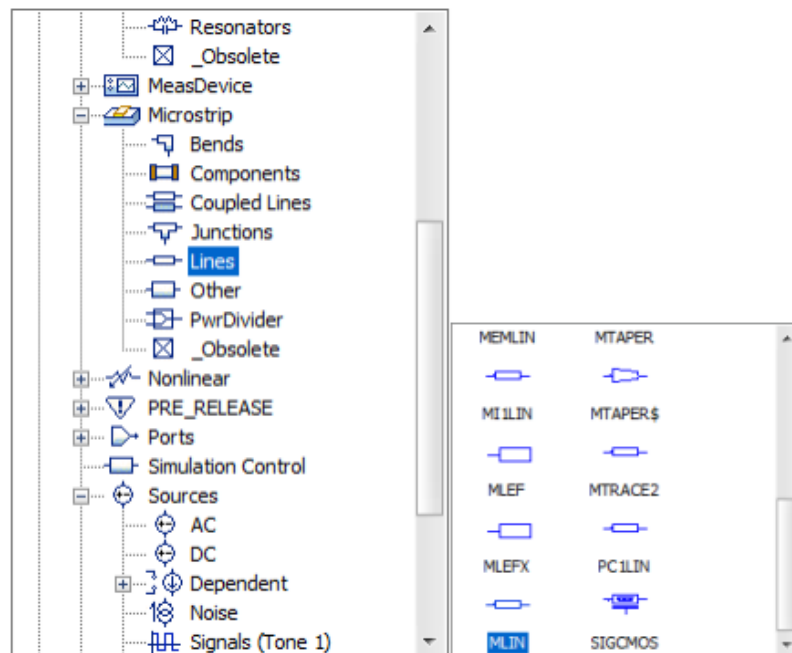
Аналогічно з папки **Resistor** перетягніть елемент **Res**.



Поставте джерело живлення: два рази натисніть на **Sources** (джерела), виберіть **DC** (постійні). З нижнього вікна перетягніть елемент **DCVS** (джерело постійної напруги).



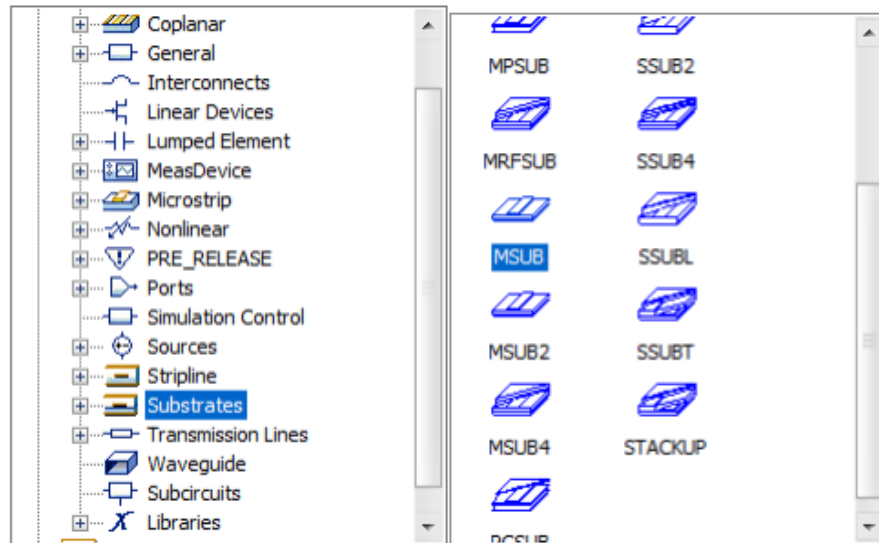
На вході транзистора на затвор потрібно поставити резистор для узгодження. Щоб зменшити втрати, замість нього краще поставити мікрополосковий елемент: відкрийте папку **Microstrip**, виберіть вкладку **Lines**. З нижнього вікна перетягніть елемент **MLIN**.



З головної панелі на вході і виході поставте два порти, ВСТАНОВІТЬ заземлення.



Також потрібно визначити структуру полоскової лінії: в тому ж вікні елементів (зкладка **Elem**) виберіть папку **Substrates** (підкладки). Виберете структуру **MSUB** і перетягніть її в вікно схеми.



Щоб отримати необхідну схемну модель підсилювача, розставте всі елементи, як показано на рис. 5.1.

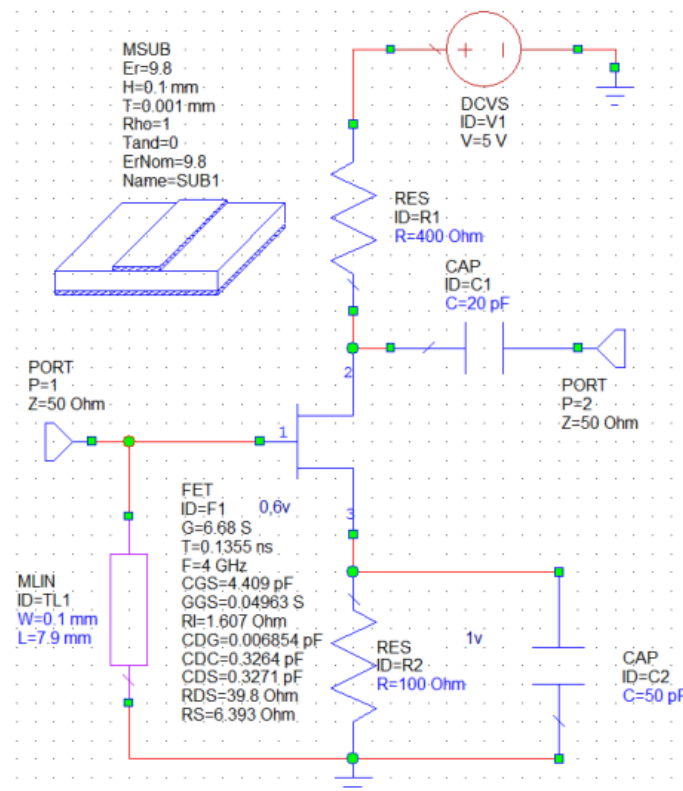


Рис. 5.1. Схемна модель підсилювача в середовищі AWR DE

В отриманій схемній моделі підсилювача елемент **MLIN** є вхідним опором (50 Ом) і задає зміщення робочої точки на транзисторі **FET**. Транзистор **FET** підсилює сигнал. Резистор **R1** обмежує струм від джерела живлення. Резистор **R2** забезпечує падіння напруги на переході затвор-витік $U_{зв}$. Конденсатор **C2** шунтує резистор **R2** і є блокувальною ємністю по ВЧ. Конденсатор **C1** є фільтром по постійній складовій. **V1** - джерело постійної напруги. Коефіцієнт посилення наближено визначається як відношення **R1** / **R2**. Падіння напруги на переході затвор-витік $U_{зв} \approx 0,6$ В. Падіння напруги на резисторі **R2** слід вибирати близько 1 В.

2. Встановлення значень елементів

Елемент **MLIN** є відрізком мікрополоскової лінії. Він має параметри: **L** - довжина і **W** - ширина. Для визначення цих розмірів у головному меню відкрийте пункт **Tools** виберіть вкладку **TXLine** (рис. 5.2.).

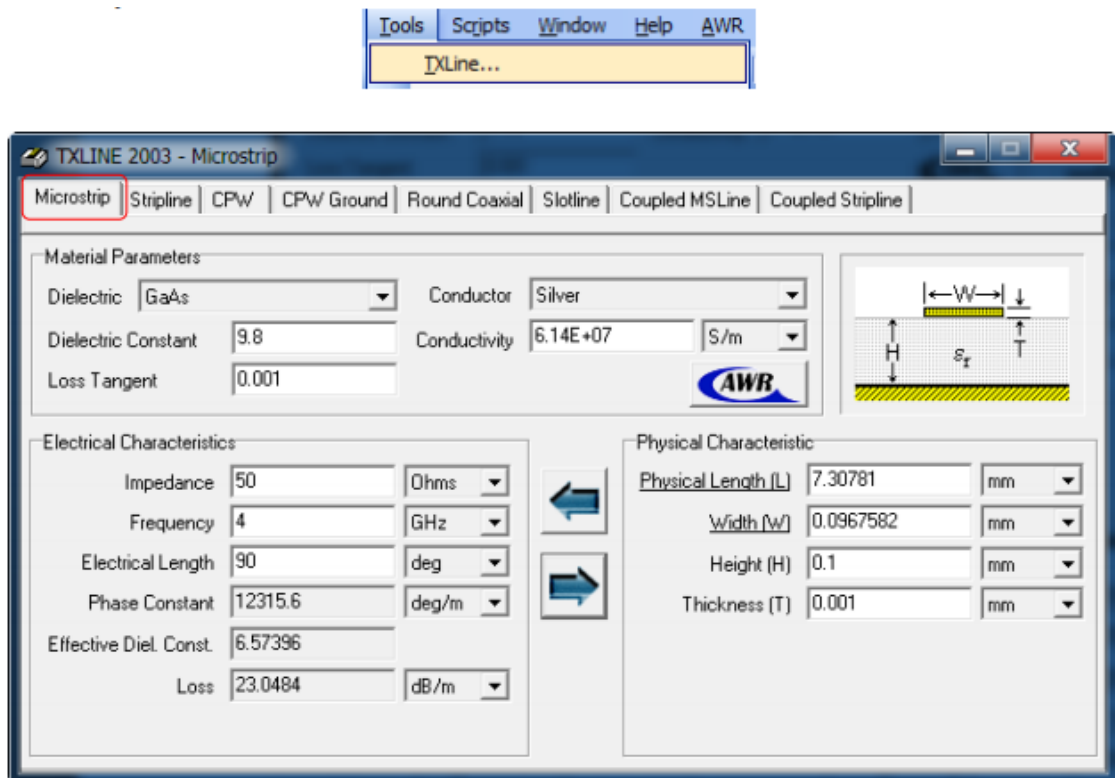


Рис. 5.2. Вікно **TXLINE**

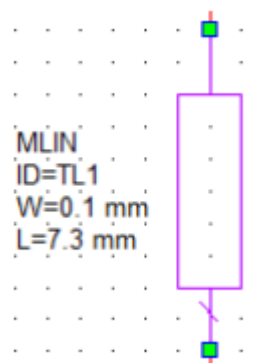
У вікні утиліти **TXLINE** (рис. 5.2) у вкладці **Microstrip** введіть параметри матеріалу відповідно до завдання: діелектрична проникність (Dielectric Constant), тангенс кута діелектричних втрат (Loss Tangent). Встановіть електричні

характеристики: імпеданс (Impedance) 50 Ом, частота (Frequency) відповідно до завдання, електрична довжина (Electrical Length) 90°. Задайте також товщину підкладки (Height) і товщину металевого шару (Thickness), вибравши їх зі стандартного ряду для заданого матеріалу.

Натисніть стрілку, спрямовану вправо. У правому віконці з'являться параметри відрізка мікрополоскової лінії.

Physical Characteristic		
Physical Length (L)	7.30781	mm
Width (W)	0.0967582	mm
Height (H)	0.1	mm
Thickness (T)	0.001	mm

Введіть отримані значення в параметри мікрополоска в моделі підсилювача (рис. 5.1), округливши їх з урахуванням технологічного допуску.

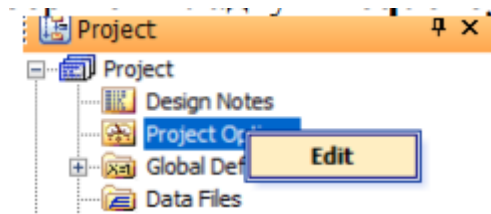


Параметри транзистора **FET** встановіть згідно рис. 5.1.

Ємність конденсатора **C1** визначте за формулою $C_p \approx 1 / 20\omega R_n$. Ємність конденсатора **C2** поставте (1000 пФ). Опір **R1** визначте з формули $U_{зв} = I_c R_v$. Опір **R2** з виразу $R_c = U_{жив} / I_c$.

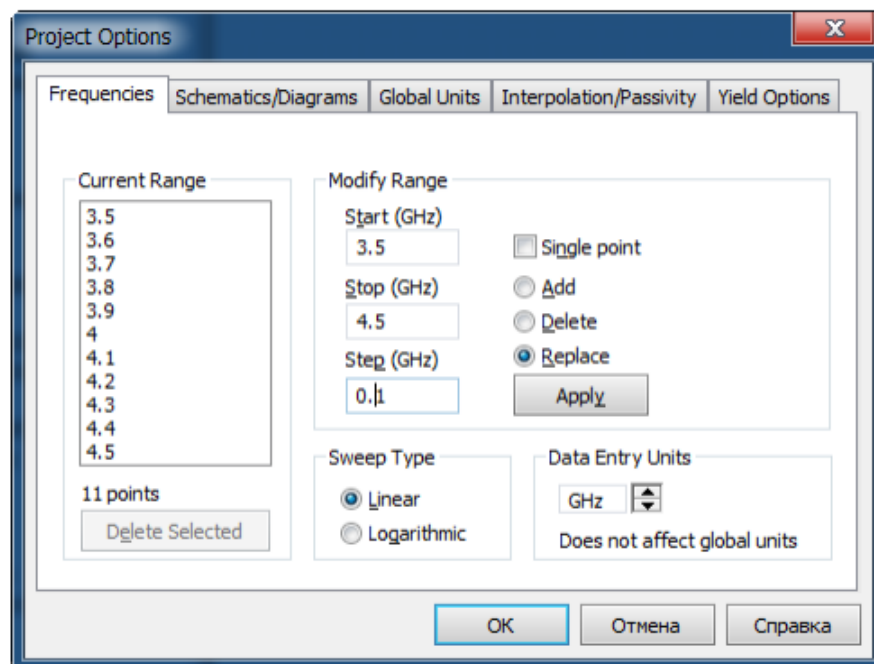
3. Встановлення діапазону частот

Щоб задати робочий діапазон частот, двічі натисніть на **Project Options**, виберіть вкладку **Frequency Values**.



Введіть початкову частоту Start = 3,5 GHz (ГГц), кінцеву частоту Stop = 4,5 GHz і крок «0.1» GHz. Клацніть на кнопці **Apply** (Застосувати).

У вікні **Current Range** з'явиться заданий діапазон

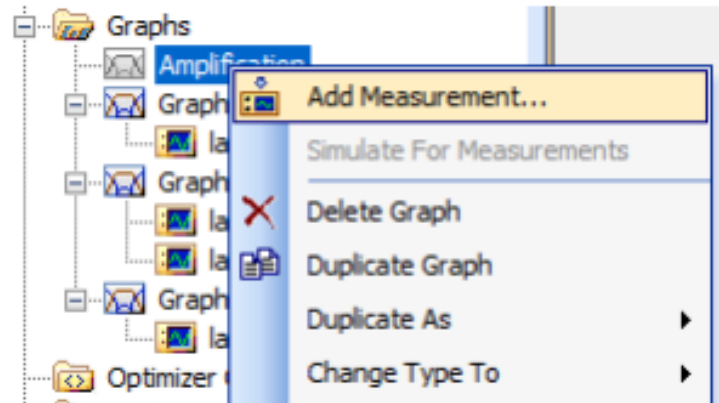
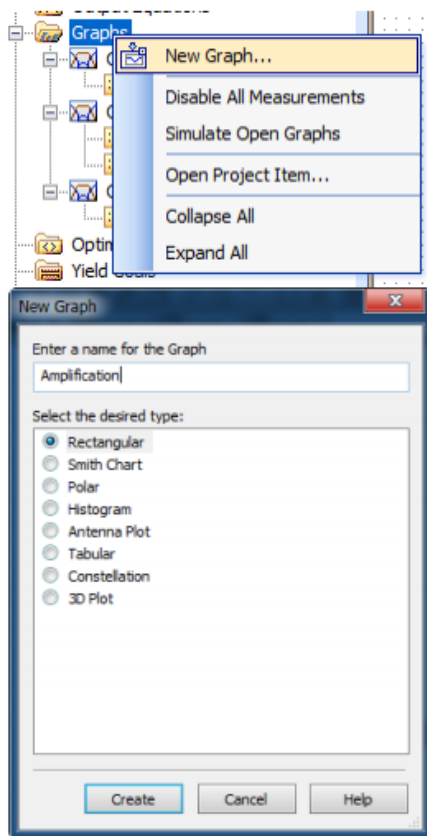


4. Додавання графіка частотної залежності коефіцієнта посилення

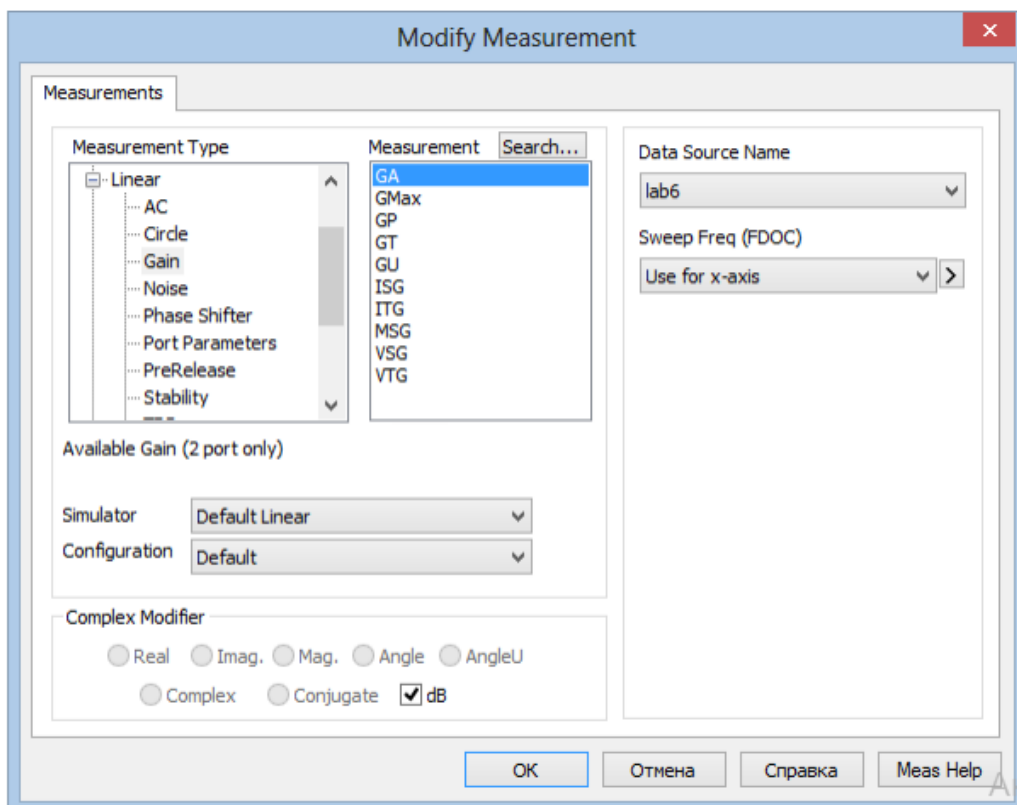
Щоб побудувати частотну залежність коефіцієнта посилення, в проєкт необхідно додати графік. На основній панелі клацніть на кнопку **New Graph** (Новий графік).


З'явиться вікно **Create Graph** (Створити графік). Встановіть **Rectangular** (Прямокутна система координат) і введіть заголовок графіка Amplification (посилення).

Задайте розрахункові величини для графіка: клацніть правою клавішею на рядку Amplification і виберіть **Add Measurement** (Додати вимір).



У вікні **Meas. Type** (Тип вимірювань) виберіть **Linear Gain** (посилення). У вікні **Measurement** (вимір) виберіть GA. У вікні **Data Source Name** виберіть Amplifier. Натисніть **ОК**. Отримайте графік Amplification.



Проаналізуйте модель МШП, натиснувши на кнопку 

Отримайте графік, аналогічний показаному на рис. 5.3.

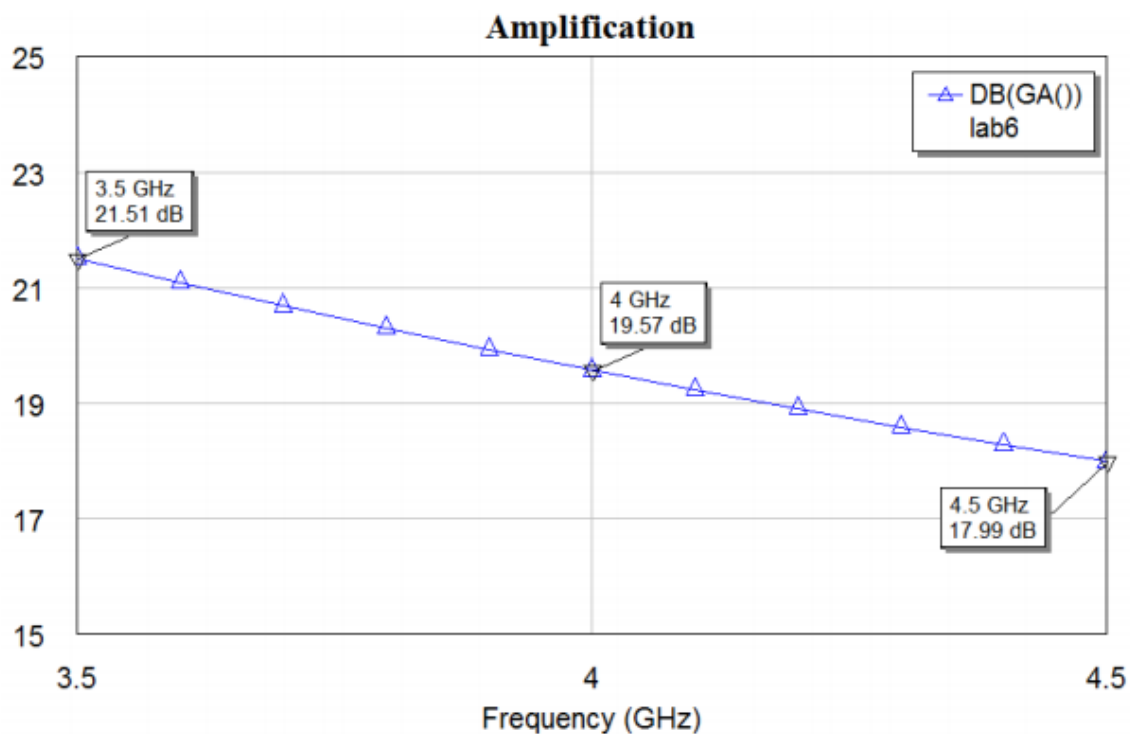
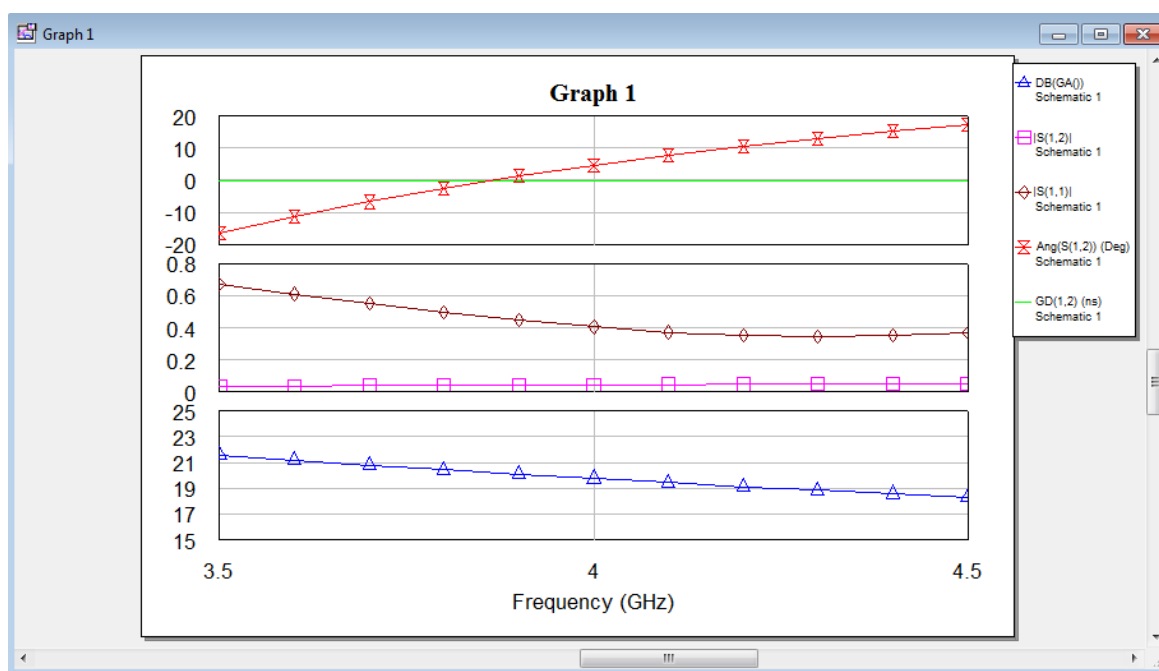


Рис. 5.3. Частотна залежність коефіцієнта посилення МШП

Також додамо графіки $S(1,1)$, $S(1,2)$ та $\text{Ang}(1,2)$, $\text{GD}(1,2)$! Та розподілимо їх на 3 частини, як показано на рис. нижче.



5. Додавання графіка КСХН на вході і виході

Щоб побудувати частотну залежність коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (КСХН), в проект необхідно додати графік. Аналогічно до попереднього пункту, створіть графік у прямокутній системі координат з назвою Standing wave voltage. Задайте розрахункові величини для графіка: клацніть правою клавішею на рядку Standing wave voltage і виберіть Add Measurement (Додати вимірювання).

У вікні Meas. Type (Тип вимірювань) виберіть Linear, у вікні Measurement (Вимірювання) виберіть VSWR (КСХН). У вікні Data Source Name виберіть назву моделі (рис. 5.4). В Port Index виберіть 1, натисніть Apply, потім виберіть 2 і знову натисніть Apply. Натисніть ОК.

Проаналізуйте модель МШП, натиснувши на кнопку  (Analyze).

Отримайте графік, аналогічний наведеному на рис. 5.5.

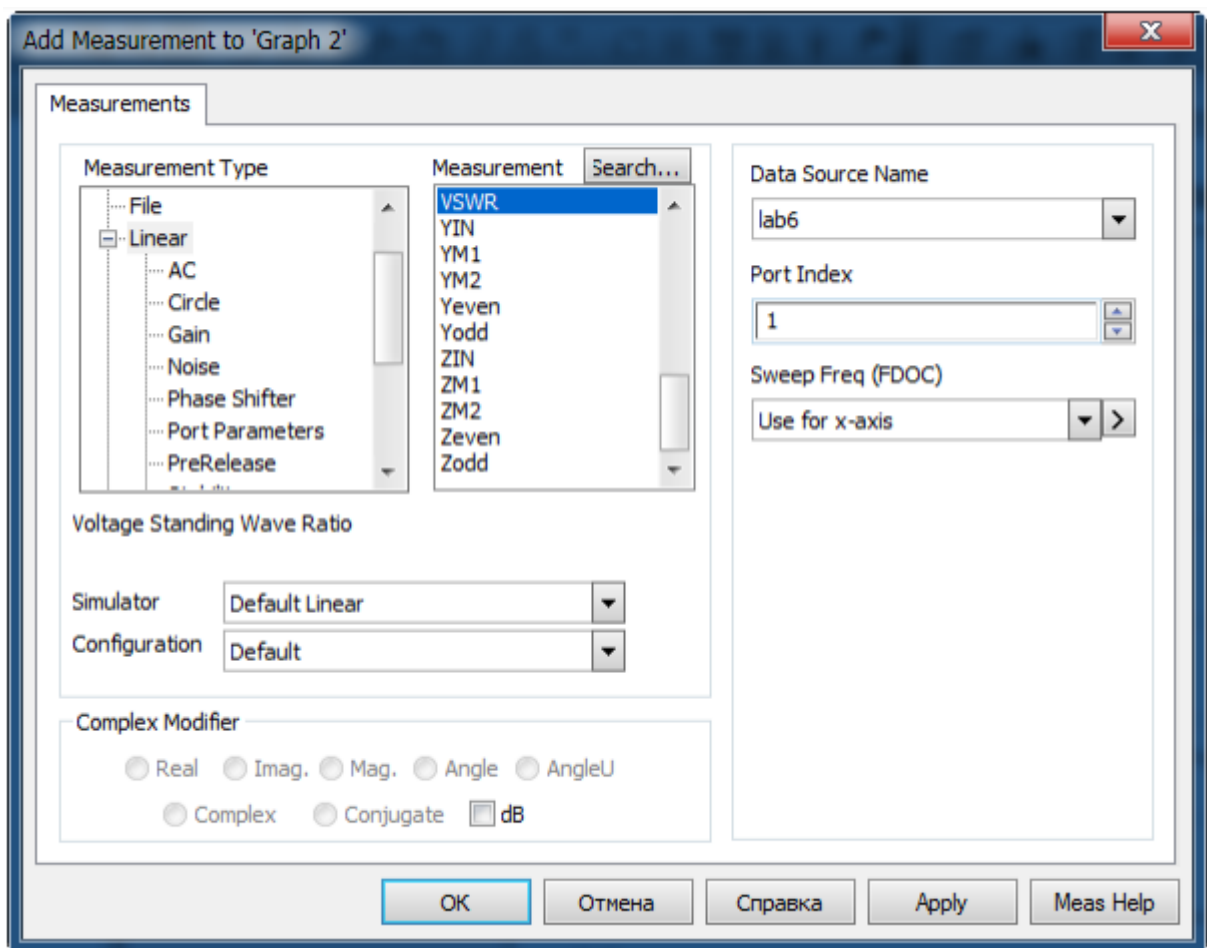


Рис. 5.4. Додавання вимірювання КСХН

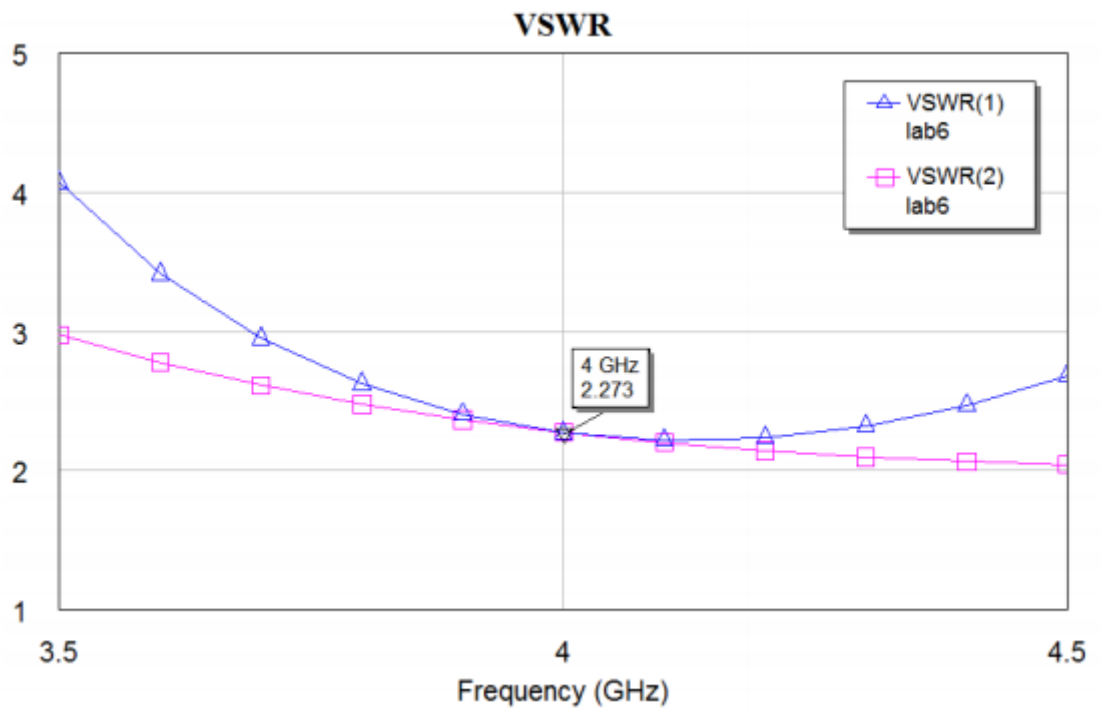
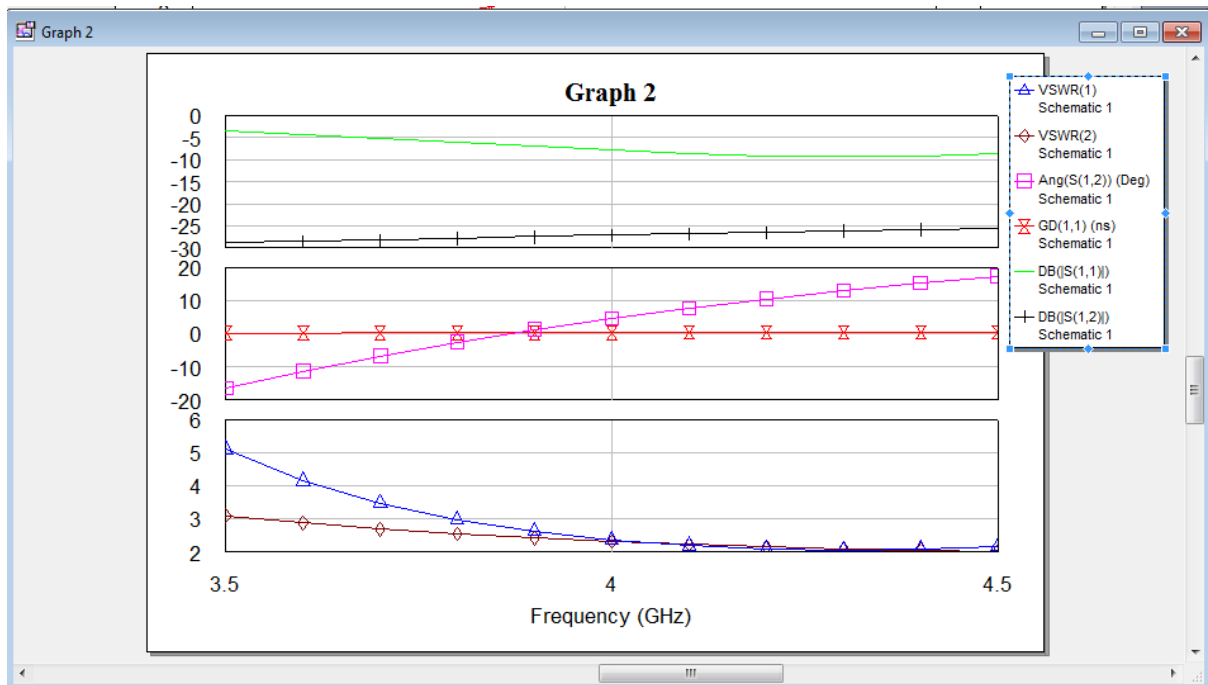


Рис. 5.5. Частотні залежності КСХН входу і виходу підсилювача

Також додамо графіки $S(1,1)$, $S(1,2)$ та $\text{Ang}(1,2)$, $\text{GD}(1,2)$! Та розподілимо їх на 3 частини, як показано на рис. нижче.



6. Шумова характеристика МШП

Щоб проаналізувати рівень шумів підсилювача, створіть новий графік. Додайте обчислення: **Meas. Type - Noise, Measurement - NF, Two port Name - Amplifier** (рис. 5.6).

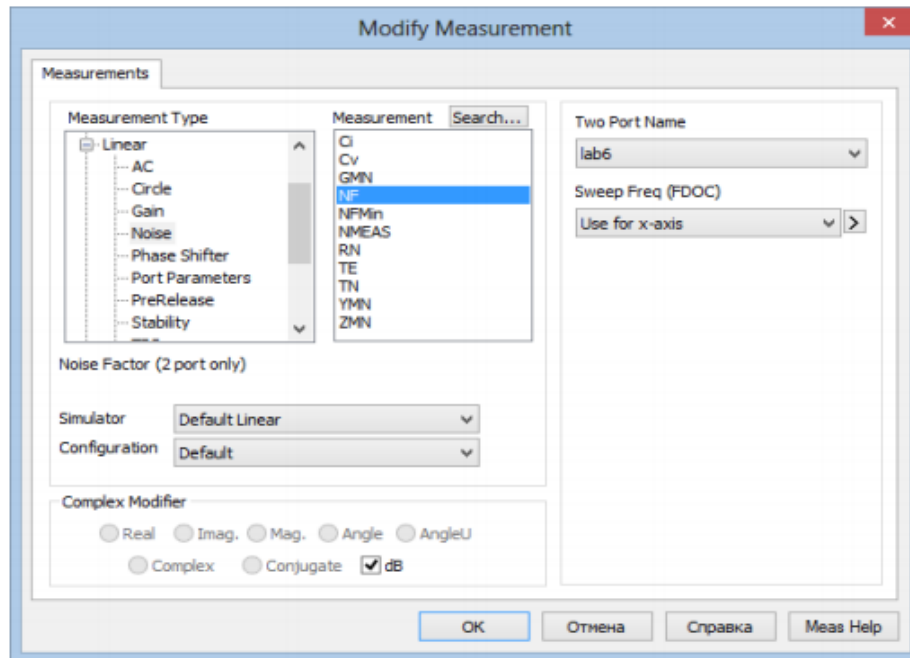



Рис. 5.6. Додавання вимірювання коефіцієнта шуму

Знову проаналізуйте модель МШП, натиснувши кнопку . Отримайте частотну залежність коефіцієнта шуму (рис. 5.7).

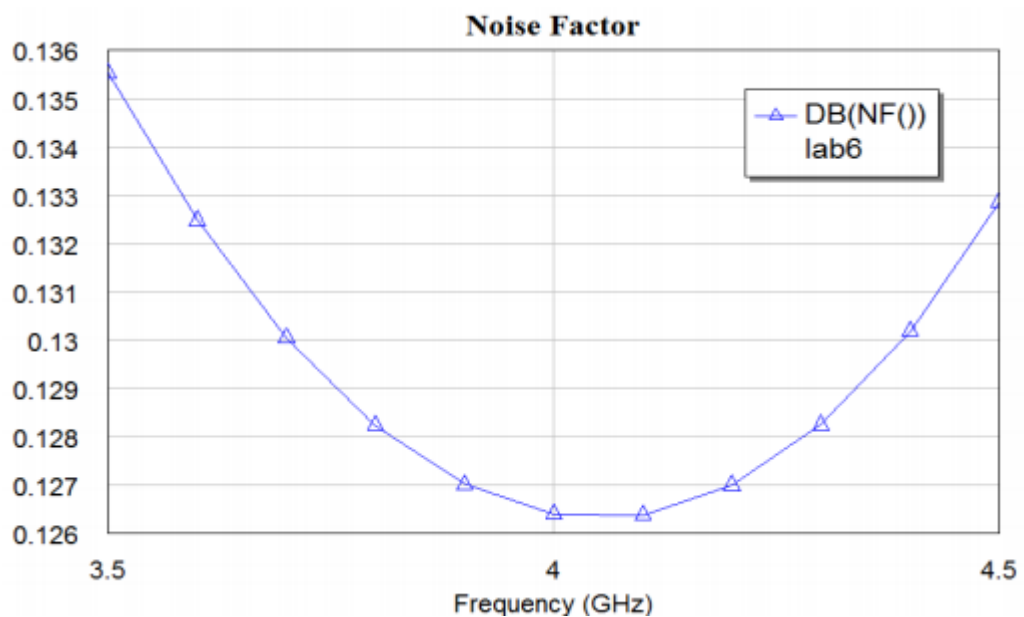
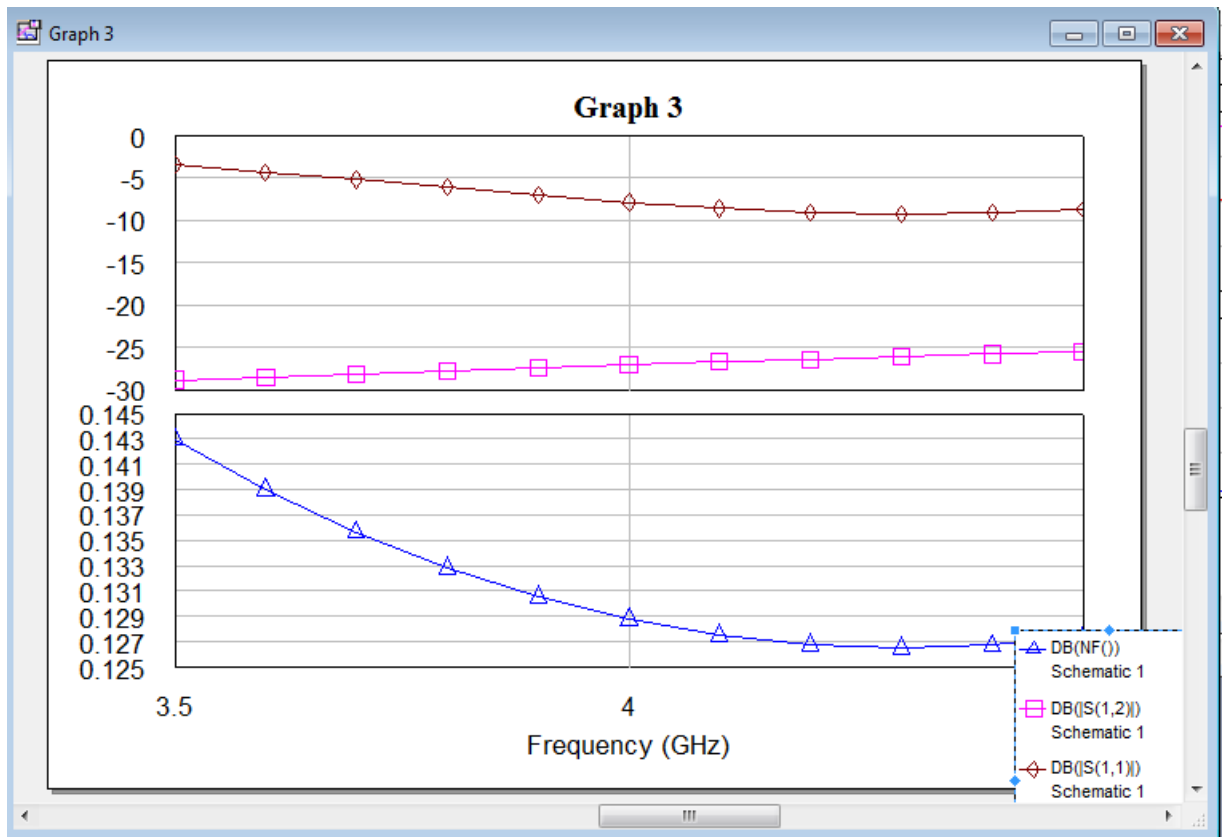


Рис. 5.7. Частотна залежність коефіцієнта шуму

Також додамо графіки $S(1,1)$, $S(1,2)$! Та розподілимо їх на 2 частини, як показано на рис. нижче.



7. Оптимізація

Як і раніше, для моделі може знадобитися оптимізація. Щоб отримати заданий коефіцієнт посилення, доцільно змінювати, перш за все, опори резисторів $R1$, $R2$ і ємність конденсатора $C2$. Крім того, можна відкоригувати довжину смужки в колі зворотнього зв'язку. Це дозволить вирівняти частотні характеристики. Зменшити КСХН дозволить правильний підбір розділових ємностей.

Практична робота №2

Пристрої надвисоких частот на базі метаматеріалів

Теоретичні відомості

2.1. Метаматеріали

‘Одним з найбільш повних і кваліфікованих оглядів, присвячених метаматеріалів які з'явилися останнім часом можна назвати монографії [1, 2] та огляд [3]. У них, зокрема, відображено наступне:

Метаматеріал - композиційний матеріал, освоєння якого почалося на рубежі ХХ і ХХІ століть. Штучна періодична структура у складі метаматеріала модифікує його діелектричну і магнітну проникності, що дозволяє управляти законами дисперсії, заломлення і віддзеркалення електромагнітних хвиль у метаматеріалів. Теоретичні та експериментальні дослідження і технічні додатки метаматеріалів охоплюють широкий діапазон частот від радіохвиль до діапазону видимого світла. За останні роки у низці лабораторій досягнуті великі успіхи в дослідженні та застосуванні метаматеріалів у надвисокочастотному діапазоні (1-100GHz). Розглянуто роботи з розробки та освоєнню метаматеріалів у надвисокочастотному діапазоні, опубліковані за останні 8-10 лет. Просудилися штучні лінії передачі в якості одновимірних метаматеріалів. Розглянуто резонатори, фільтри, фазообертачі, розроблені із застосуванням "метаматеріальної ідеології ". Приділено увагу використанню метаматеріалів в антенною техніці.

Там дано таке визначення метаматеріала:

Метаматеріал - композиційний матеріал, властивості якого обумовлені не стільки властивостями складових його елементів, скільки штучно створеної періодичною структурою з макроскопічних елементів, що володіють довільними розмірами і формою. У дуже грубому наближенні такі макроскопічні елементи можна розглядати як штучно внесені у вихідний матеріал атоми надзвичайно великих розмірів. Штучна періодична структура модифікує діелектричну і магнітну проникності вихідного матеріалу. Розробник метаматеріалів має можливість вибору різних вільних параметрів (розміри структур, форма, постійний і змінний період решітки елементів, що утворюють структуру). Одне з

можливих властивостей метаматеріалів - негативний коефіцієнт заломлення, який проявляється при одночасній заперечності діелектричної та магнітної проникності матеріалу.

Найкращим чином це проілюстровано в роботі Л.І. Мандельштама (рис. 2.1.1.)

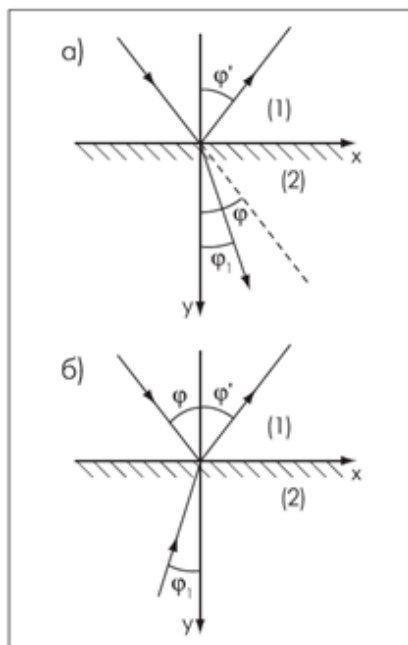
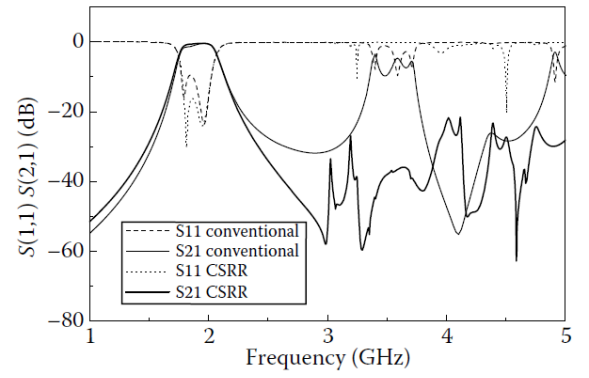
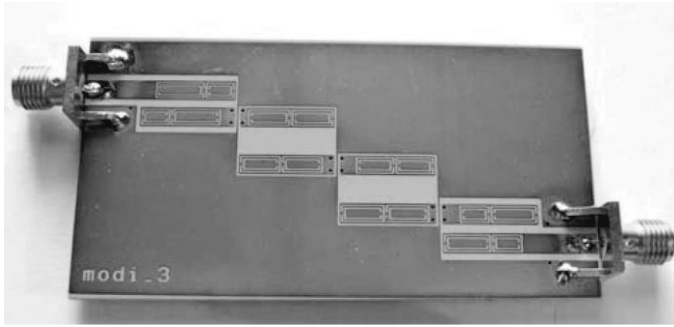
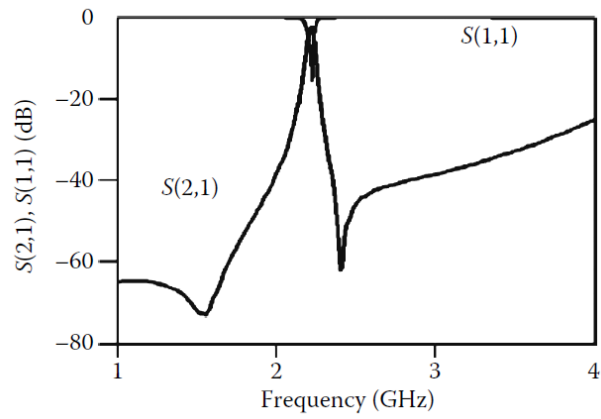
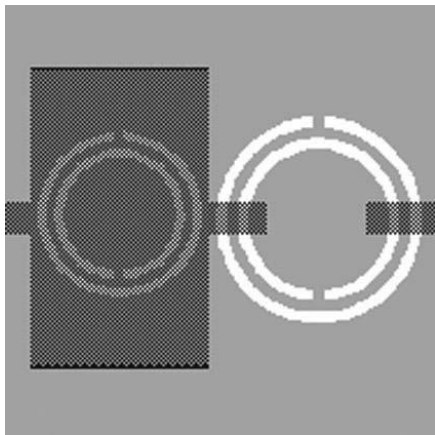


Рис. 2.1.1. Заломлення променя: а) у звичайній середовищі, б) в середовищі, де групова швидкість хвиль негативна.

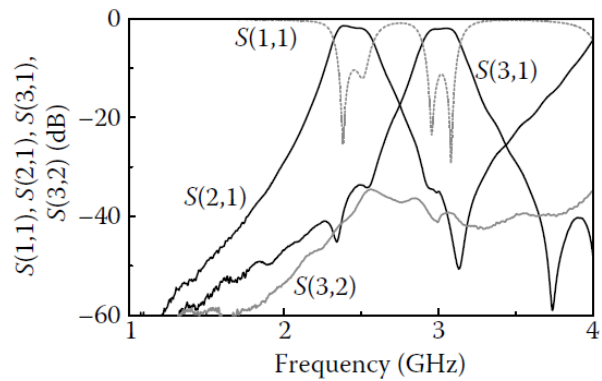
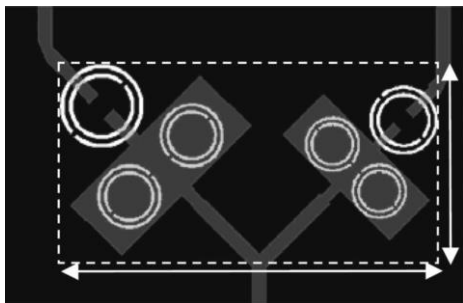
Інтерес до матеріалів з негативним коефіцієнтом заломлення починається з роботи радянського фізика В.Г. Веселаго, яка була опублікована в журналі "Успіхи фізичних наук" за 1967 г. [23]. У роботі було вказано на можливість існування матеріалу з негативним коефіцієнтом заломлення, який був названий "лівостороннім". Матеріал з позитивним коефіцієнтом заломлення по аналогії слід назвати "правостороннім". Автор дійшов висновку, що в лівосторонньому матеріалі майже всі відомі оптичні явища поширення хвиль істотно змінюються, хоча в той час матеріали з негативним коефіцієнтом заломлення ще не були відомі.



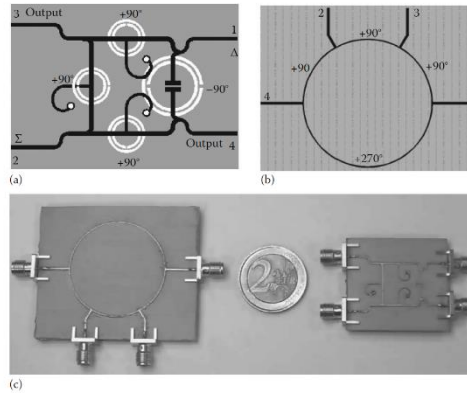
Compact Band Pass Filter and Diplexer Design



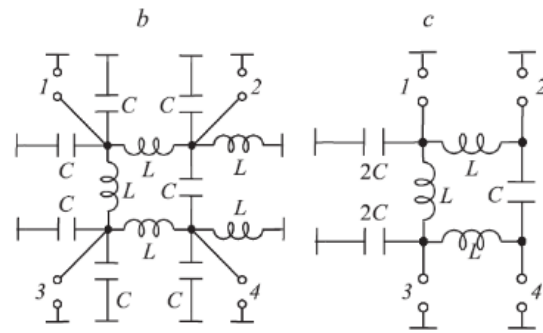
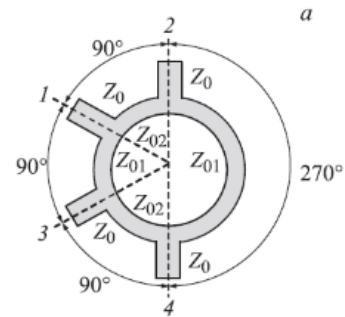
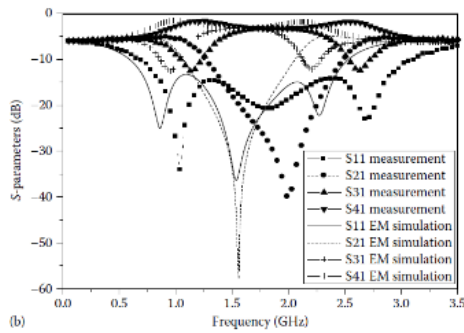
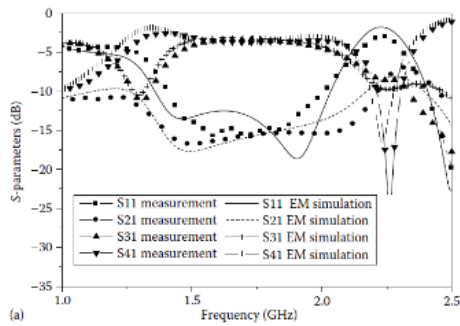
Диплексори



Дільники потужності

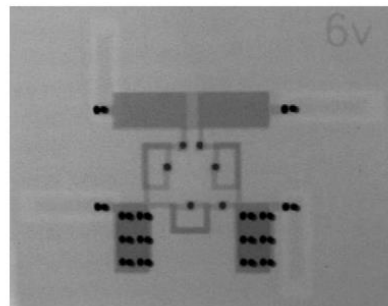
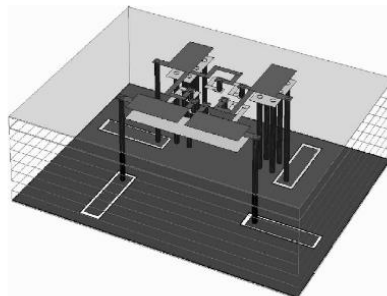


Гібридні мости

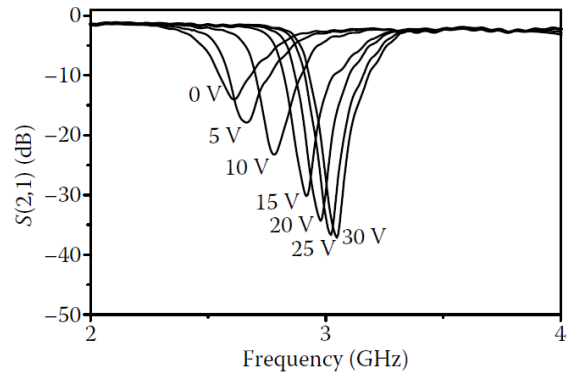
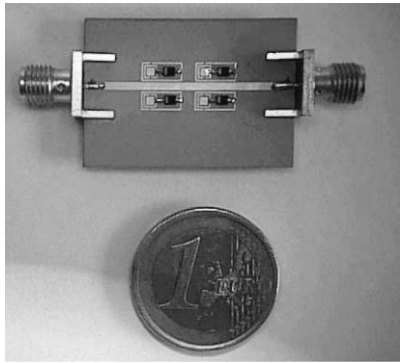


a

b

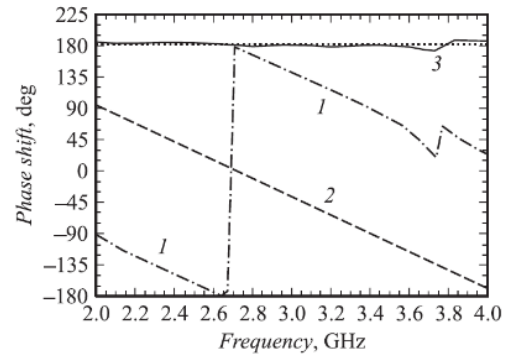
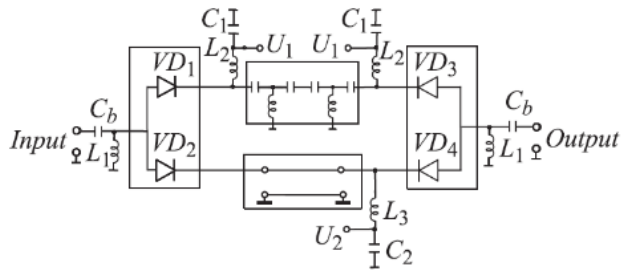


Структура багатослойної ІС гібридного кільця у компланарному виконанні

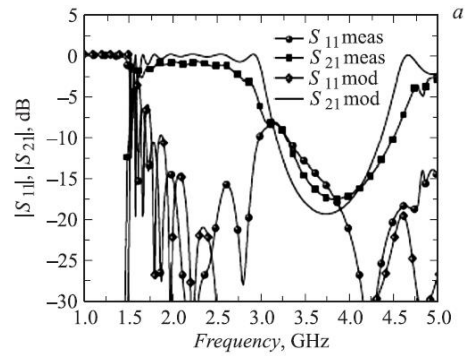
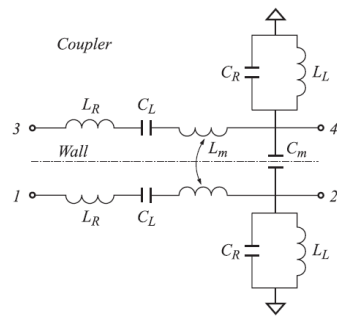


Терагерци

Переналаштовувачі фільтри



Фазообертачі



Спрямований відгалужувач

Високоімпедансна поверхня

Розглянемо властивості межі розділу між вільним простором і штучним матеріалом.

Метою є розробка матеріалу, який по відношенню до електромагнітній хвилі НВЧ-діапазону має поверхневий імпеданс, величина якого суттєво перевершує хвильовий опір вільного простору $Z_0 = 120 \pi$. Поверхня, яка має такий великий поверхневий імпеданс, прийнято називати "магнітною стінкою". Відомо, що добре проводить метал має поверхневий імпеданс по відношенню до електромагнітній хвилі НВЧ-діапазону, вимірюваний сотими частками Ома. Добре провідний метал прийнято називати "електричною стінкою".

У природі не існує матеріалу, який би володів властивостями магнітної стінки. В якійсь мірі цими властивостями володіють феромагнітні матеріали з великою величиною магнітної проникності. Магнітну стінку можна здійснити за допомогою штучних прийомів. На рис. 5.9 показана схема конструкції, утвореної металевими елементами в формі "грибочків" [8]. Конструктивні розміри кожного грибочка багато менше довжини електромагнітної хвилі, що падає з вільного простору на структуру, утворену грибочками. На рис. 5.9, с показана еквівалентна схема ланцюга, утвореної двома сусідніми грибочками. Ніжка грибочка утворює зосереджену індуктивність, а зазор між капелюшками формує зосереджену ємність.

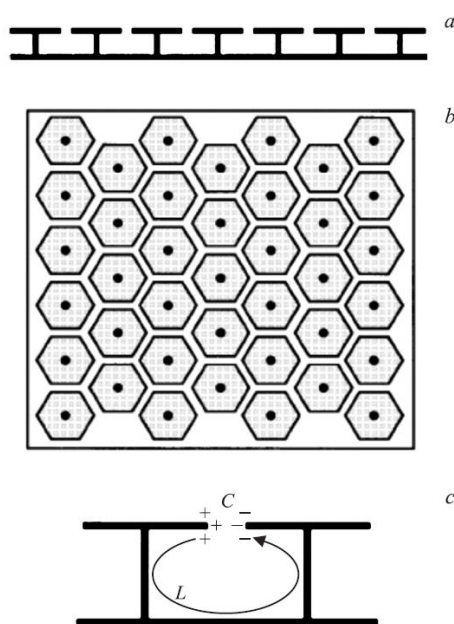


Рис. 5.9. Схема ланцюга

Штучна магнітна стінка зберігає свої "магнітні" властивості в досить вузькій смузі частот, що визначається її резонансною природою.

Таким чином, застосовуючи підложку, частково заповнену DNG-матеріалом, можна мініатюризувати габарити друкованої антени. Основна проблема, яку належить вирішувати розробникам, - це пошук метаматеріалів, що мають невелику дисперсію електромагнітних параметрів.

Використана література

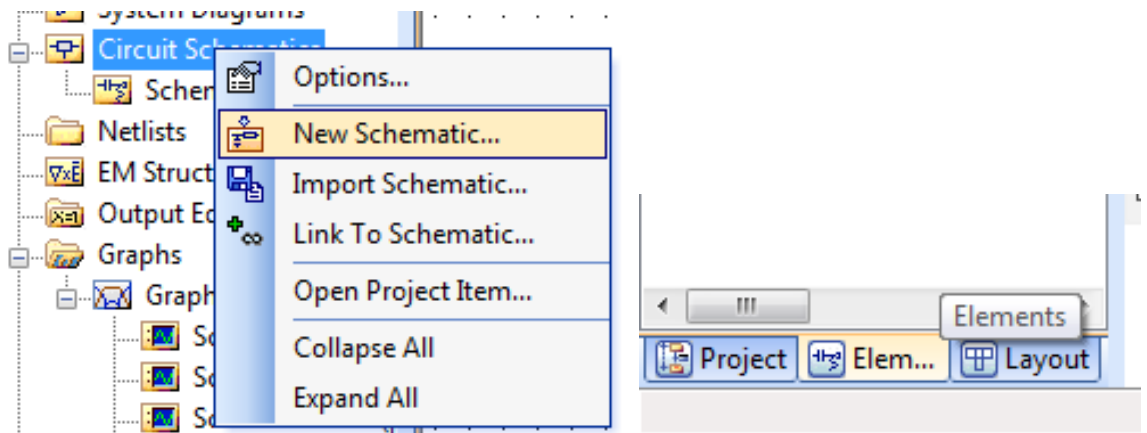
1. Metamaterials handbook / Ed. F. Capolino. – CRC Press. Taylor & Francis Group, 2009 (Vol. 1. Theory and phenomena of metamaterials, Vol. 2. Applications of metamaterials)
2. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И. Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных материалов / Под ред. Г.М. Зверева.- К.-М.: Аверс. 2012.- 360 с.
3. <http://journals.ioffe.ru/jtf/2013/01/p3-28.pdf>
4. Мандельштам Л.И. Лекции по некоторым вопросам теории колебаний (1944 г.). Четвертая лекция/В кн.: Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. – М.: Наука, 1972, с. 431–437.
5. Веселаго В.Г. // УФН. 1967. Т. 92. Вып. 3. С. 517–526.
6. Metamaterials handbook / Ed. F. Capolino. – CRC Press. Taylor & Francis Group, 2009 (Vol. 1. Theory and phenomena of metamaterials, Vol. 2. Applications of metamaterials)
7. Ильченко М.Е. СВЧ устройства с использованием нескольких типов колебаний диэлектрических резонаторов / М.Е. Ильченко, А.П. Живков // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 32, № 5. – С. 56–59. (есть англ. версия: М. Е. Il'chenko and A.P. Zhivkov "UHF devices based on several dielectric-cavity mode types", Izvestiya VUZ, Radioelektronika, vol. 32, No. 5, pp. 56-59, 1989).
8. Ильченко М.Е., Живков А.П., Орлов А.Т. Фильтры на базе резонаторов с близкими по частоте модами как ячейки метаматериалов.// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – № 1 (104). – С. 7–14.

9. Ильченко М.Е. Инверсия мод колебаний в ячейках метаматериалов / М.Е. Ильченко, А.П. Живков // Tenth International Scientific Conference “Modern Challenges in Telecommunications” (Київ, 19-22 квітня 2016 р.). м. Київ, 2016. Стр.20 – 23.
10. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн: М.: Наука. - 1989.-544 с.
11. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике // Первая миля. 2010. № 3–4. С. 44–61.
12. Tang M.C., Xiao S., Wang B., Guan J., Deng T. // IEEE Anten. and Propag. Magazine. 2011. Vol. 53. N 6. P. 31–42.
13. A.Semichaevsky and A. Akyurtlu. Homogenization of Metamaterial Loaded Substrates and Superstrates for Antennas, – Progress In Electromagnetics Research, № 71, 2007, p.129–147.
14. Пахотин В.А. Излучение электрически короткой антенны из ограниченного объема газоразрядной плазмы. – Письма в ЖТФ, 2007, том 33, вып. 8, с. 22–29.
15. T.Ueda, N.Michishita, T.Itoh. Lefthanded metamaterial structures using dielectric resonators. – EMTS 2007, International URSI Commission B, Electromagnetic Theory Symposium, July 26–28, 2007, Ottawa, Canada.
16. J.F.Wang et al. Wide-angle polarization-independent planar left-handed metamaterials based on dielectric resonators. – Progress In Electromagnetics Research B, 2009, vol. 12, p. 243–258.
17. Irina Vendik, Mikhail Odit, Dmitryi Kozlov. 3D Metamaterial Based on a Regular Array of Resonant Dielectric Inclusions. – Radioengineering, vol. 18, № 2, June 2009.
18. http://rf.harris.com/media/RF-3192C-AT422_tcm26-20804.pdf
19. <http://rf.harris.com/productaccessories/?pid=9287>

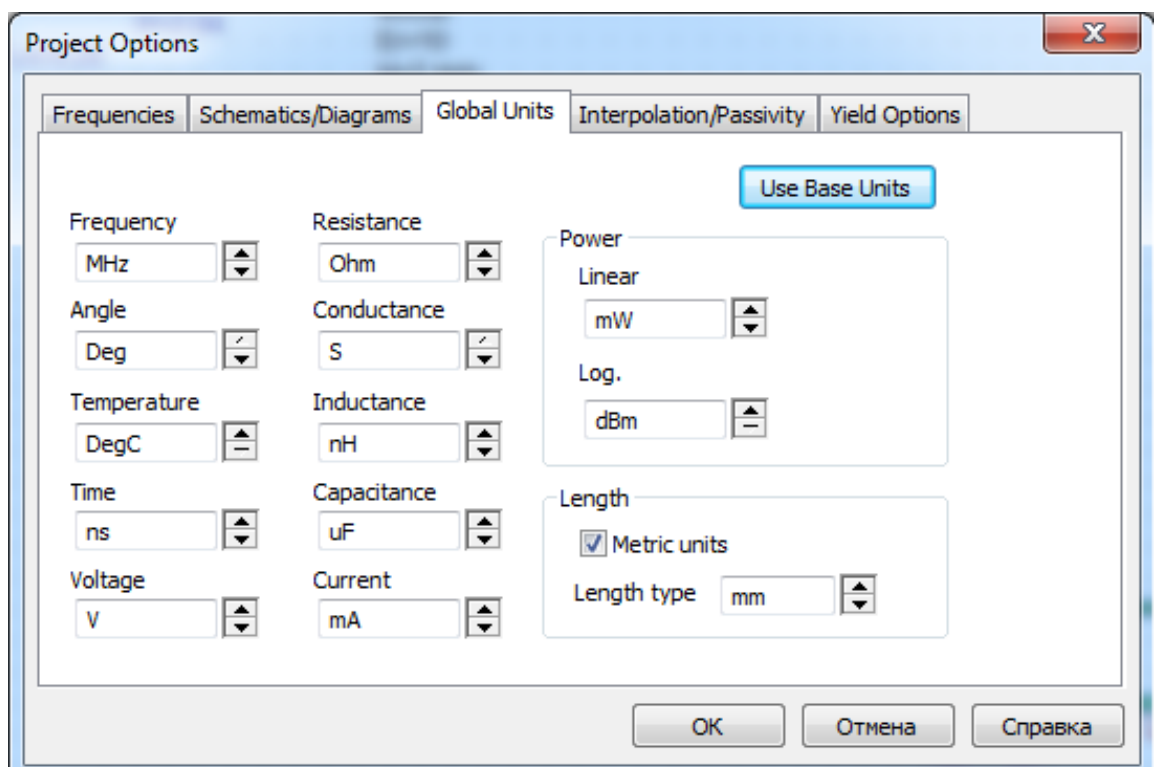
Практична робота №2

Проектування смугового фільтра на базі комірки метаматеріалу

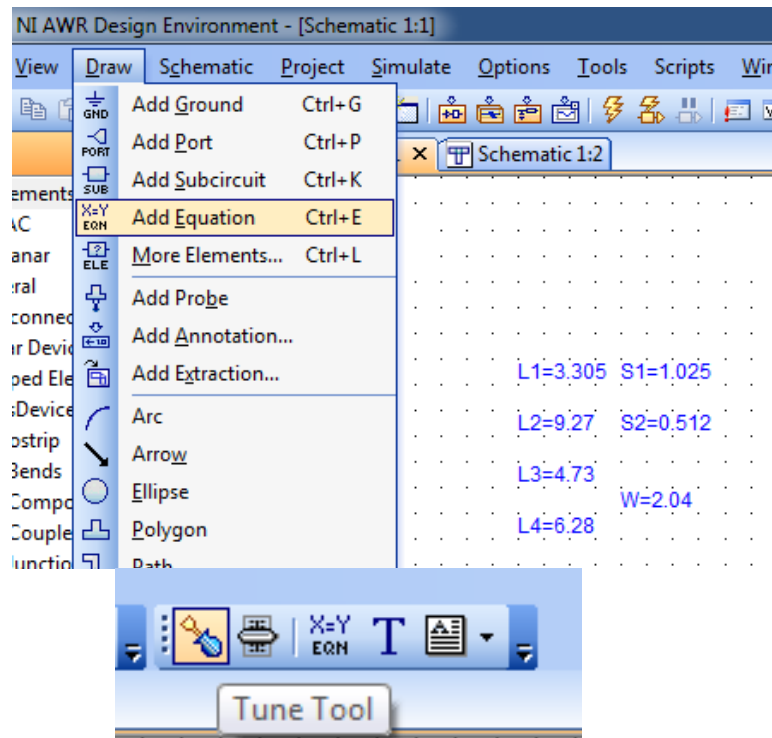
1. Створюємо нову схему, ПКМ по Circuits Schematics, New Schematic. Переходимо на вкладки Elements. Ми будемо працювати з микросмуговими елементами.



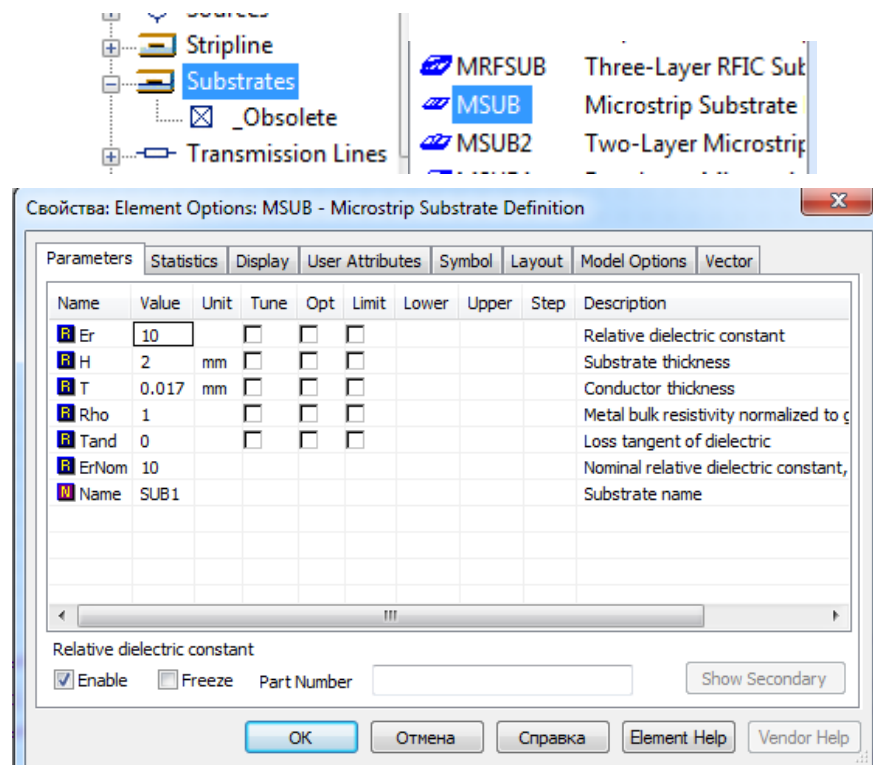
2. Задаємо розмірність величин. Відкриваємо вкладку Options та обраємо Project Options.



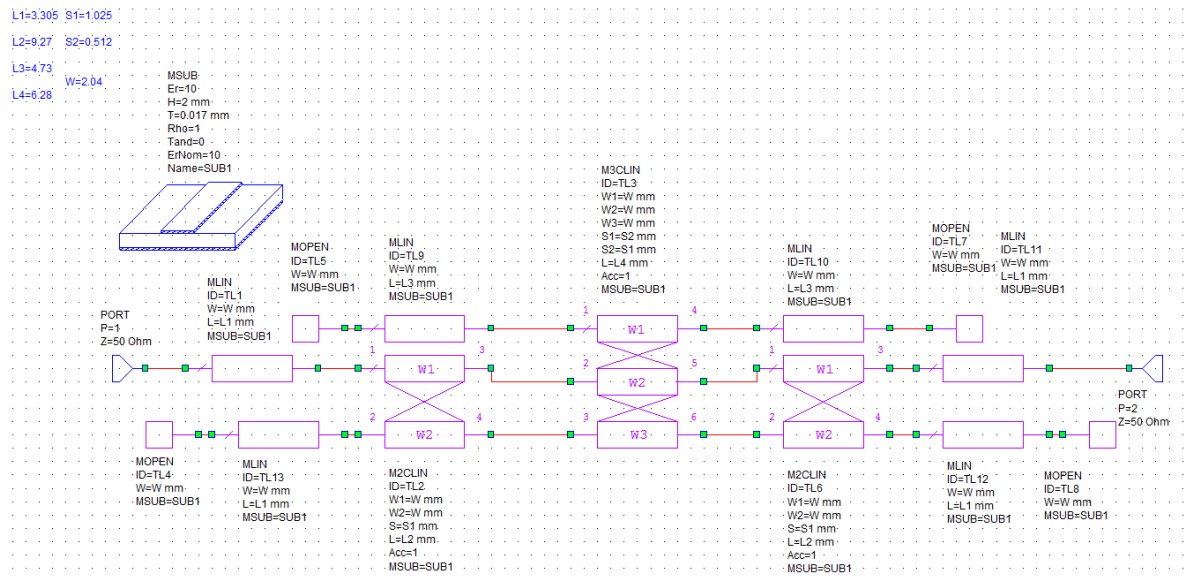
3. Додаємо до схеми змінні. Для цього у вкладці Draw обираємо Add Equation. Після чого за допомогою Tune Tool додаємо їх до тюну.



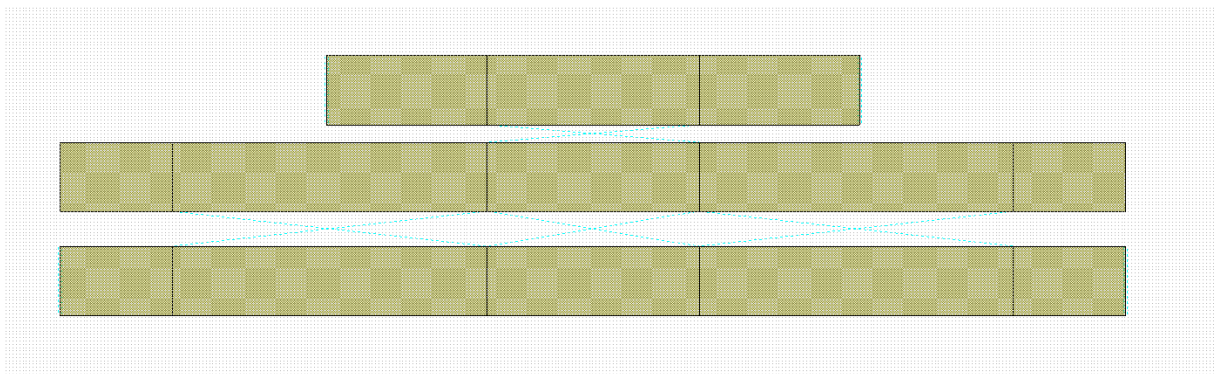
4. Встановлюємо підложку та задаємо її параметри.



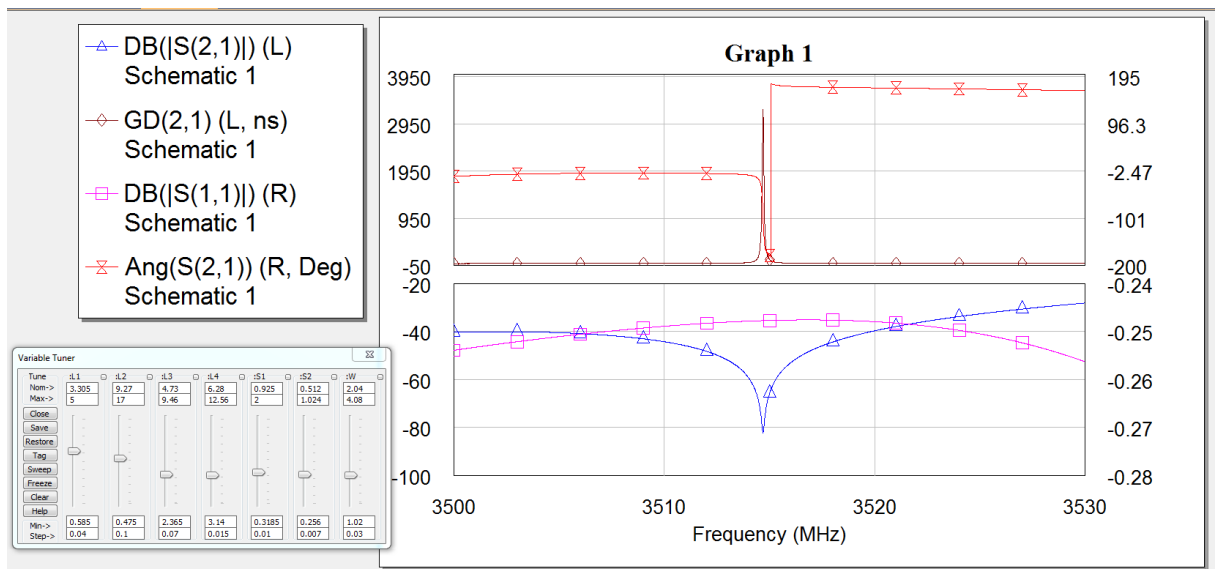
2. Із мікросмугових елементів реалізуємо нашу схему



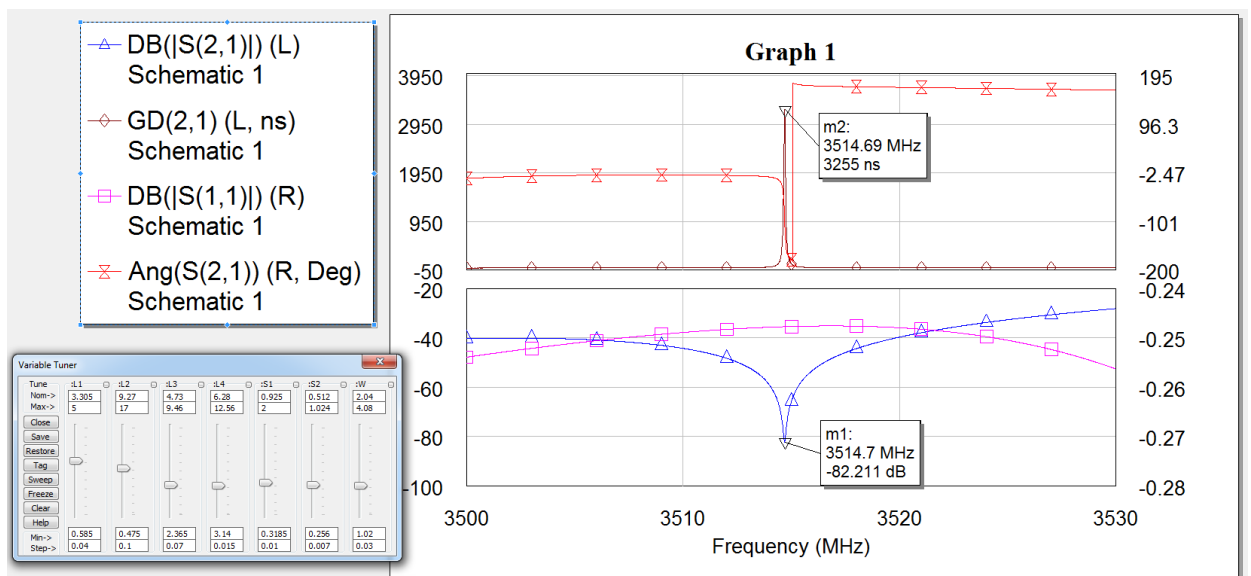
3. На панелі інструментів обираємо View Layout та отримуємо нашу топологію. За необхідності згрупуйте елементи. Для цього комбінацією клавіш **ctrl+A** обираємо всі елементи та на панелі натискаємо **Snap Together**.



4. Будемо графіки S_{11} , S_{21} , фазову характеристику та груповий час затримки. Тепер за допомогою зміни у Type величин S , ми маємо отримати велике затухання S_{21} . Для цього ми зменшуємо діапазон частот у налаштуванні проекту. Після чогу знову змінюємо наші параметри. Зручно при цьому орієнтуватись по GD. На частоті де в нас є пік, там і буде резонанс. Після кількох ітерацій, ми отримаємо таку характеристику.



5. Для більшої наглядності, додамо маркери. Для цього натискаємо ПКМ по графіку та обираємо Add Marker. Тиснемо лкм спочатку S21. Після чого, тиснемо ПКМ по новому вікні та обираємо Min. Повторюємо тіж кроки для GD, али тут обираємо Max.



Додаток 1

Варіанти

Варіанти	Лаб. роб. №1	Лаб. роб. №2	Лаб. роб. №3	Лаб. роб. №4	Лаб. роб. №5	Практ. роб. №1
1	$f_{c1} = 4 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 5 \text{ ГГц}$ $L_3=30\text{дБ}$ $f_{31} = 3 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 6 \text{ ГГц}$ ТММ 6	$\tau=10\text{нс}$ $f_1 = 4 \text{ ГГц}$ $f_2 = 5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0	$N = 5$ $f = 5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8	$f_3 = 3,75 \text{ ГГц}$ $L_3=30\text{дБ}$ $f_c = 5 \text{ ГГц}$ RO4350B	$K=20\text{дБ}$ $f_0 = 3,5 \text{ ГГц}$ $f = 10 \%$ $K \leq 5\text{дБ}$ $\text{КСВ}_{\text{ВВХ/ВВЫХ}} \leq 3$ ФЛАН-3,8	$f_c = 3 \text{ ГГц}$ $L_3=30\text{дБ}$ $f_3 = 4 \text{ ГГц}$ RO4003C
2	$f_{c1} = 5 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 6 \text{ ГГц}$ $L_3=30\text{дБ}$ $f_{31} = 4 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 7 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8	$\tau=20\text{нс}$ $f_1 = 4 \text{ ГГц}$ $f_2 = 5 \text{ ГГц}$ RO4003C	$N = 3$ $f = 5,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-3,8	$f_c = 4 \text{ ГГц}$ $L_3=30\text{дБ}$ $f_3 = 5 \text{ ГГц}$ ТММ 6	$K=18\text{дБ}$ $f_0 = 3,75 \text{ ГГц}$ $f = 10 \%$ $K \leq 5\text{дБ}$ $\text{КСВ}_{\text{ВВХ/ВВЫХ}} \leq 3$ ФЛАН-5,0	$f_c = 4 \text{ ГГц}$ $L_3=30\text{дБ}$ $f_3 = 5 \text{ ГГц}$ ТММ 6

3	$f_{c1} = 6$ ГГц $f_{c2} = 7$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_{31} = 4,5$ ГГц $f_{32} = 8,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$\tau = 10$ нс $f_1 = 5$ ГГц $f_2 = 6$ ГГц ТММ 10i	$N = 5$ $f = 6$ ГГц ФЛАН-2,8	$f_3 = 5,75$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_c = 7$ ГГц ТММ 6	$K = 18$ дБ $f_0 = 4$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 RO4003C	$f_c = 5$ ГГц $L_3 = 25$ дБ $f_3 = 6,2$ ГГц RO4350B
4	$f_{c1} = 7$ ГГц $f_{c2} = 8$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_{31} = 5,5$ ГГц $f_{32} = 9,5$ ГГц ФЛАН-5,0	$\tau = 20$ нс $f_1 = 5$ ГГц $f_2 = 6$ ГГц Поликор ВК-100-1	$N = 3$ $f = 6,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$f_3 = 6,75$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_c = 8$ ГГц RO4350B	$K = 20$ дБ $f_0 = 4,25$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 RO4003C	$f_c = 6$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_3 = 7,5$ ГГц ФЛАН-2,8
5	$f_{c1} = 8$ ГГц $f_{c2} = 9$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_{31} = 6,5$ ГГц $f_{32} = 10,5$	$\tau = 10$ нс $f_1 = 6$ ГГц $f_2 = 7$ ГГц ФЛАН-5,0	$N = 5$ $f = 7$ ГГц ФЛАН-2,8	$f_3 = 2,25$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_c = 3,5$ ГГц ТММ 6	$K = 18$ дБ $f_0 = 4,5$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3	$f_c = 2,5$ ГГц $L_3 = 40$ дБ $f_3 = 4$ ГГц ФЛАН-3,8

	ГГц ФЛАН-5,0				RO4003C	
6	$f_{c1} = 2$ ГГц $f_{c2} = 2,5$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_{31} = 1$ ГГц $f_{32} = 3,5$ ГГц RO4350B	$\tau = 20$ нс $f_1 = 6$ ГГц $f_2 = 7$ ГГц RO4003C	$N = 3$ $f = 7,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$f_3 = 3,25$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_c = 4,5$ ГГц ФЛАН-2,8	$K = 15$ дБ $f_0 = 4,75$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВНВХ/ВЫХ ≤ 3 ТММ 10i	$f_c = 3,5$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_3 = 4,5$ ГГц ФЛАН-5,0
7	$f_{c1} = 2,5$ ГГц $f_{c2} = 3$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_{31} = 1,5$ ГГц $f_{32} = 4$ ГГц RO4350B	$\tau = 10$ нс $f_1 = 7$ ГГц $f_2 = 8$ ГГц ТММ 10i	$N = 5$ $f = 8$ ГГц ФЛАН-2,8	$f_3 = 4,25$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_c = 5,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$K = 15$ дБ $f_0 = 5$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВНВХ/ВЫХ ≤ 3 ФЛАН-5,0	$f_c = 4,5$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_3 = 5,5$ ГГц RO4003C
8	$f_{c1} = 3$ ГГц $f_{c2} = 3,5$ ГГц $f_{31} = 2$ ГГц	$\tau = 20$ нс $f_1 = 7$ ГГц $f_2 = 8$ ГГц	$N = 3$ $f = 8,5$ ГГц	$f_3 = 5,25$ ГГц $L_3 = 25$ дБ $f_c = 7$ ГГц	$K = 15$ дБ $f_0 = 5,25$ ГГц $f = 10$ %	$f_c = 5,5$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_3 = 7$ ГГц

	$f_{з2} = 4,5$ ГГц RO4350B	Поликор ВК- 100-1	ФЛАН-2,8	RO4003C	КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 ФЛАН-3,8	ФЛАН-5,0
9	$f_{с1} = 3,5$ ГГц $f_{с2} = 4$ ГГц $L_3=25$ дБ $f_{з1} = 2$ ГГц $f_{з2} = 5,5$ ГГц RO4350B	$\tau=10$ нс $f_1 = 2$ ГГц $f_2 = 2,5$ ГГц ФЛАН-5,0	$N = 5$ $f = 9$ ГГц ФЛАН-2,8	$f_3 = 6,25$ ГГц $L_3=30$ дБ $f_с = 8$ ГГц ФЛАН-5,0	$K=15$ дБ $f_0 = 5,5$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 RO4003C	$f_с = 6,5$ ГГц $L_3=30$ дБ $f_3 = 8$ ГГц ФЛАН-3,8
10	$f_{с1} = 4$ ГГц $f_{с2} = 4,5$ ГГц $L_3=25$ дБ $f_{з1} = 2,5$ ГГц $f_{з2} = 6$ ГГц ФЛАН-5,0	$\tau=20$ нс $f_1 = 2,5$ ГГц $f_2 = 3$ ГГц RO4003C	$N = 3$ $f = 9,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$f_3 = 1,5$ ГГц $L_3=20$ дБ $f_с = 2,5$ ГГц RO4350B	$K=15$ дБ $f_0 = 5,75$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 ТММ 10i	$f_с = 2,75$ ГГц $L_3=30$ дБ $f_3 = 4$ ГГц ФЛАН-2,8
11	$f_{с1} = 4,5$ ГГц $f_{с2} = 5,5$ ГГц $L_3=30$ дБ $f_{з1} = 3,5$ ГГц	$\tau=10$ нс $f_1 = 3$ ГГц $f_2 = 3,5$ ГГц	$N = 5$ $f = 10$ ГГц	$f_3 = 3$ ГГц $L_3=30$ дБ $f_с = 4$ ГГц	$K=20$ дБ $f_0 = 3,25$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ	$f_с = 3,75$ ГГц $L_3=30$ дБ $f_3 = 5$ ГГц

	$f_{32} = 6,5$ ГГц ТММ 6	ТММ 10i	ФЛАН-2,8	RO4003C	КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 ФЛАН-3,8	RO4350B
12	$f_{c1} = 5,5$ ГГц $f_{c2} = 6,5$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_{31} = 4,5$ ГГц $f_{32} = 7,5$ ГГц ФЛАН-2,8	$\tau = 20$ нс $f_1 = 3,5$ ГГц $f_2 = 4$ ГГц Поликор ВК- 100-1	$N = 3$ $f = 10,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$f_3 = 4$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_c = 5$ ГГц RO4350B	$K = 18$ дБ $f_0 = 3$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 ФЛАН-5,0	$f_c = 4,75$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_3 = 6$ ГГц ТММ 6
13	$f_{c1} = 6,5$ ГГц $f_{c2} = 7,5$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_{31} = 5$ ГГц $f_{32} = 9$ ГГц ФЛАН-3,8	$\tau = 10$ нс $f_1 = 3,5$ ГГц $f_2 = 4,5$ ГГц ФЛАН-5,0	$N = 5$ $f = 11$ ГГц ФЛАН-2,8	$f_3 = 5$ ГГц $L_3 = 25$ дБ $f_c = 6,2$ ГГц ТММ 6	$K = 15$ дБ $f_0 = 2,75$ ГГц $f = 10$ % $K \leq 5$ дБ КСВН _{ВХ/ВЫХ} ≤ 3 Поликор ВК-100-1	$f_c = 5,75$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_3 = 7$ ГГц RO4003C

14	$f_{c1} = 7,5 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 8,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_{31} = 6,5 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 9,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0	$\tau = 20 \text{ нс}$ $f_1 = 4,5 \text{ ГГц}$ $f_2 = 5,5 \text{ ГГц}$ RO4003C	$N = 3$ $f = 11,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-3,8	$f_3 = 6 \text{ ГГц}$ $L_3 = 30 \text{ дБ}$ $f_c = 7,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8	$K = 18 \text{ дБ}$ $f_0 = 2,5 \text{ ГГц}$ $f = 10 \%$ $K \leq 5 \text{ дБ}$ КСВНвх/вых ≤ 3 Поликор ВК-100-1	$f_c = 6,75 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_3 = 8 \text{ ГГц}$ RO4350B
15	$f_{c1} = 7,5 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 8,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_{31} = 6,5 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 9,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0	$\tau = 10 \text{ нс}$ $f_1 = 5,5 \text{ ГГц}$ $f_2 = 6,5 \text{ ГГц}$ ТММ 10i	$N = 5$ $f = 12 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8	$f_3 = 2,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 40 \text{ дБ}$ $f_c = 4 \text{ ГГц}$ ФЛАН-3,8	$K = 20 \text{ дБ}$ $f_0 = 3,5 \text{ ГГц}$ $f = 5 \%$ $K \leq 2,5 \text{ дБ}$ КСВНвх/вых $\leq 2,8$ ФЛАН-3,8	$f_c = 2,25 \text{ ГГц}$ $L_3 = 30 \text{ дБ}$ $f_3 = 3,5 \text{ ГГц}$ ТММ 6

16	$f_{c1} = 4 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 5,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_{31} = 2,5 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 7 \text{ ГГц}$ ТММ 6	$\tau = 20 \text{ нс}$ $f_1 = 6,5 \text{ ГГц}$ $f_2 = 7,5 \text{ ГГц}$ Поликор ВК- 100-1	$N = 3$ $f = 12,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-3,8	$f_3 = 3,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 30 \text{ дБ}$ $f_c = 4,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0	$K = 18 \text{ дБ}$ $f_0 = 3,75 \text{ ГГц}$ $f = 5 \%$ $K \leq 2,5 \text{ дБ}$ КСВНВХ/ВЫХ $\leq 2,8$ ФЛАН-5,0	$f_c = 3,25 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_3 = 4,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8
17	$f_{c1} = 5 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 6,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_{31} = 3,5 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 8 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8	$\tau = 10 \text{ нс}$ $f_1 = 7,5 \text{ ГГц}$ $f_2 = 8,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0	$N = 5$ $f = 13 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0	$f_3 = 4,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 30 \text{ дБ}$ $f_c = 5,5 \text{ ГГц}$ RO4003C	$K = 18 \text{ дБ}$ $f_0 = 4 \text{ ГГц}$ $f = 5 \%$ $K \leq 2,5 \text{ дБ}$ КСВНВХ/ВЫХ $\leq 2,8$ RO4003C	$f_c = 4,25 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_3 = 5,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-3,8
18	$f_{c1} = 6 \text{ ГГц}$ $f_{c2} = 7,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 20 \text{ дБ}$ $f_{31} = 4,5 \text{ ГГц}$ $f_{32} = 9 \text{ ГГц}$ RO4003C	$\tau = 20 \text{ нс}$ $f_1 = 8 \text{ ГГц}$ $f_2 = 9 \text{ ГГц}$ RO4003C	$N = 3$ $f = 13,5 \text{ ГГц}$ ФЛАН-2,8	$f_3 = 5,5 \text{ ГГц}$ $L_3 = 30 \text{ дБ}$ $f_c = 7 \text{ ГГц}$ ФЛАН-3,8	$K = 20 \text{ дБ}$ $f_0 = 4,25 \text{ ГГц}$ $f = 5 \%$ $K \leq 2,5 \text{ дБ}$ КСВНВХ/ВЫХ $\leq 2,8$ RO4003C	$f_c = 5,25 \text{ ГГц}$ $L_3 = 25 \text{ дБ}$ $f_3 = 7 \text{ ГГц}$ ФЛАН-5,0

19	$f_{c1} = 7$ ГГц $f_{c2} = 8,5$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_{31} = 5,5$ ГГц $f_{32} = 10$ ГГц RO4350B	$\tau = 10$ нс $f_1 = 9$ ГГц $f_2 = 10$ ГГц TMM 10i	$N = 5$ $f = 14$ ГГц ФЛАН-2,8	$f_3 = 6,5$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_c = 8$ ГГц ФЛАН-5,0	$K = 18$ дБ $f_0 = 4,5$ ГГц $f = 5$ % $K \leq 2,5$ дБ КСВНВХ/ВЫХ $\leq 2,8$ RO4003C	$f_c = 6,25$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_3 = 8$ ГГц RO4003C
20	$f_{c1} = 8$ ГГц $f_{c2} = 9,5$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_{31} = 6,5$ ГГц $f_{32} = 11$ ГГц ФЛАН-5,0	$\tau = 20$ нс $f_1 = 10$ ГГц $f_2 = 11$ ГГц Поликор ВК-100-1	$N = 3$ $f = 14,5$ ГГц ФЛАН-3,8	$f_3 = 2,75$ ГГц $L_3 = 30$ дБ $f_c = 4$ ГГц ФЛАН-2,8	$K = 15$ дБ $f_0 = 4,75$ ГГц $f = 5$ % $K \leq 2,5$ дБ КСВНВХ/ВЫХ $\leq 2,8$ TMM 10i	$f_c = 1,5$ ГГц $L_3 = 20$ дБ $f_3 = 2,5$ ГГц RO4350B