

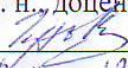
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.396.6

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

к. т. н., доцент Чухов В. В.

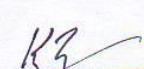

« 12 » 12 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Дослідження проектування
частотних фільтрів у програмі RFSim99

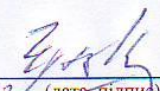
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ЗТРм-22-1


19.12.23 (дата, підпис)

Кузьменко З. С.

Керівник роботи
к.т.н., доц.


19.12.23 (дата, підпис)

Чухов В. В.

Житомир
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему _____
Дослідження проєктування
частотних фільтрів у програмі RFSim99

Виконав: студент 2 курсу, групи ЗТРм-22-1
спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка» _____

Кузьменко З. С. _____

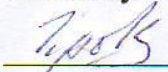
Керівник _____ Чухов В. В. _____

Рецензент _____ Коломієць Р.О. _____

Житомир
2023

«Затверджено»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

 Владислав ЧУХОВ

«27» 10 2022 р.

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну магістерську роботу

Кузьменко Захар Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження проектування частотних фільтрів у програмі RFSim99

затверджено наказом по університету від «22» 11 2023 р. № 679

2. Мета дослідження: дослідження коректності отримуваних у програмі RFSim99 результатів проектування частотних фільтрів

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.):
частотні фільтри на зосереджених елементах; дециметровий,
початок сантиметрового діапазону частот; програма RFSim99

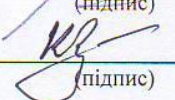
4. Основні задачі дослідження: порівняльний аналіз програм проектування мікрохвильових частотних фільтрів; процедура проектування частотних фільтрів у програмі RFSim99; коректність отримуваних у програмі RFSim99 результатів щодо проектування частотних фільтрів на зосереджених елементах

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2023 р.

6. Дата видачі завдання «27» 10 2022 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

(підпис)

Чухов В. В.

(прізвище, ініціали)

Кузьменко З. С.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота присвячена дослідженню дослідження коректності отримуваних у програмі RFSim99 результатів проектування частотних фільтрів на зосереджених елементах.

Показано, що для задачі проектування частотного фільтра на зосереджених елементах можна використовувати програму RFSim99, не використовуючи при цьому складніші програмні продукти.

ABSTRACT

This qualification work is devoted to the study of the correctness of the design results of frequency filters on concentrated elements obtained in the RFSim99 program.

It is shown that the RFSim99 program can be used for the task of designing a frequency filter on lumped elements, without using more complex software products.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 51 с., 68 рисунків, 8 джерел за переліком посилань. Робота складається з трьох розділів.

У першому розділі розглянуто класичний алгоритм проектування частотних фільтрів, його реалізацію на низці сучасних програмних продуктів. Також проведено короткий порівняльний аналіз цих програм.

У другому розділі розглянуто ключові елементи інтерфейсу програми RFSim99, а також проектування у ній частотних фільтрів з використанням їхніх вбудованих схемних рішень.

У третьому розділі досліджено коректність отримуваних у програмі RFSim99 результатів щодо проектування частотних фільтрів на зосереджених елементах.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналітичний огляд літературних джерел.....	8
1.1 Класифікація основних типів фільтрів.....	8
1.2 Поширені програмні середовища моделювання мікрохвильових частотних фільтрів.....	11
2 Алгоритм проектування частотного фільтра у RFSim99.....	15
2.1 Огляд інтерфейсу RFSim99.....	15
2.2. Проектування частотних фільтрів у RFSim99.....	24
3 Дослідження проектування частотного фільтра у RFSim99.....	26
3.1 Приклади проектування частотних фільтрів за вбудованими схемами.....	26
3.2 Дослідження частотного фільтра.....	28
Висновки.....	50
Перелік посилань.....	51

ВСТУП

Актуальність теми. Використання допоміжних інструментів, у т.ч. спеціалізованих програм завжди буде у полі зору дослідників, оскільки такі інструменти дозволяють суттєво економити час при проектуванні частотних фільтрів. Проте такі програми є різного рівня складності. Доцільно проаналізувати на коректність отримуваних результатів проектування ті з них, які є певною «золотою серединою» – не використовують занадто простий чи складний часовитратний математичний апарат, не потребують багато часу на освоєння.

Мета дослідження: дослідження коректності отримуваних у програмі RFSim99 результатів проектування частотних фільтрів.

Задачі дослідження:

- порівняльний аналіз програм проектування мікрохвильових частотних фільтрів;
- процедура проектування частотних фільтрів у програмі RFSim99;
- коректність отримуваних у програмі RFSim99 результатів щодо проектування частотних фільтрів на зосереджених елементах.

Об'єкт дослідження: процес проходження коливань через частотно-селективні кола.

Предмет дослідження: проектування частотних фільтрів у програмі RFSim99.

Практична значимість: показано, що для задачі проектування частотного фільтра на зосереджених елементах можна використовувати програму RFSim99, не використовуючи при цьому складніші програмні продукти.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Класифікація основних типів фільтрів

Терміном фільтр (частотний фільтр) називають прилад, який здатен здійснювати частотну селекцію чи виділення електричних сигналів певних частот.

Вимоги до частотних характеристик фільтрів задають, вказуючи частотну смугу пропускання, у межах якої внесене послаблення $A = 20 \lg(U_{in}/U_{out})$ не повинно перевищувати деякого допустимого значення. Поза смугою пропускання внесене послаблення має бути якомога більшим. Іноді оговорюють частотну залежність фази коефіцієнта передачі, найчастіше у вигляді допустимого відхилення від лінійного закону при зміні частоти у смузі пропускання. Під U_{in} розуміють потужність падаючої хвилі на вході фільтра, а під потужністю U_{out} – потужність хвилі на його виході.

У смузі пропускання ідеального фільтра $A = 0$, а в смузі затримки $A = \infty$. За взаємним розташуванням смуг пропускання та затримки, тобто за формою амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), фільтри поділяють на:

- фільтр нижніх частот (ФНЧ) пропускає лише частоти, які розташовані нижче за певну задану частоту (частоту зрізу). Всі частоти вищі за частоту зрізу послаблюються (рисунок 1.1, а);

- фільтр верхніх частот (ФВЧ) пропускає лише частоти, які розташовані вище, ніж частота зрізу (рисунок 1.1, б);

- смугові фільтри (СФ) пропускають лише ті частоти, які розташовані у певній смузі та послаблюють всі частоти поза цією смугою. Смуговий фільтр має верхню та нижню частоти зрізу. Відповідний вибір цих частот дозволяє виділяти різні частотні ділянки ФКГ сигнала (рисунок 1.1, в);

- режекторні фільтри (РФ) послаблюють всі частоти між двома частотами зрізу (рисунок 1.1, г).

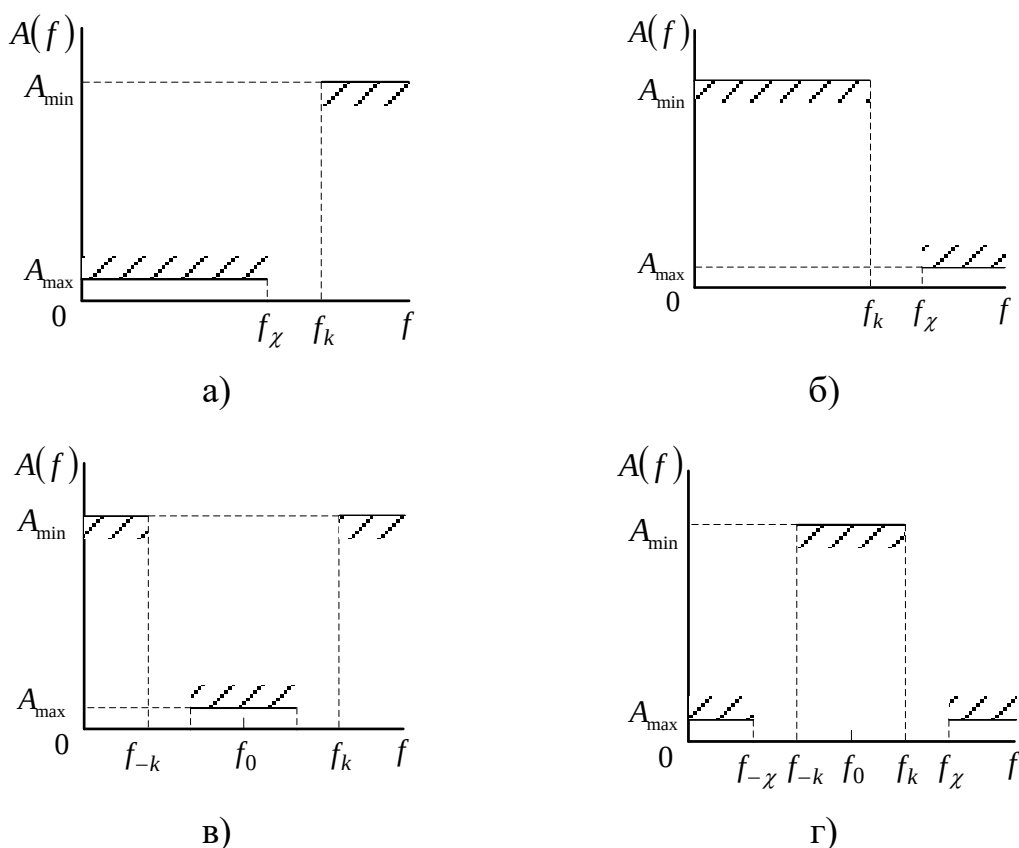


Рисунок 1.1 – АЧХ фільтрів: ФНЧ (а), ФВЧ (б), СФ (в), РФ (г)

В ідеальних фільтрах у смузі затримки вхідна потужність не приходить на вихід. Вона або повністю відбивається від входу фільтра, або поглинається в його елементах. У першому випадку фільтри відносять до фільтрів відбивного типу, в другому – до фільтрів поглинаючого типу.

Зауважимо, що повне значення внесених фільтром втрат складається з теплових втрат та втрат, спричинених відбиттям частини енергії від його входу.

Для зменшення теплових втрат фільтри відбивного типу зазвичай виконують з реактивних елементів. Параметри реактивних елементів підбирають так, щоб на частотах смуги пропускання відбиті від них хвилі компенсували одна одну на вході фільтра. При цьому потужність на вході фільтра проходить на його вихід практично без відбиття. На частотах смуги затримки компенсація відбитих хвиль відсутня і потужність на вході фільтра практично повністю відбивається від нього.

Синтез фільтрів умовно можна розбити на три етапи. На першому етапі розв'язується задача апроксимації. Це пошук аналітичної функції

(математичного описання), яка з потрібною точністю відтворює вид заданої характеристики пристрою (фільтра у даному випадку). Такою характеристикою може бути частотна, фазова або перехідна. Згідно цього, синтез розподіляють на синтез у частотній області (частотні та фазові характеристики) і на синтез у часовій області (перехідні характеристики). Синтез у частотній області поширеніший, ніж синтез у часовій області. Далеко не кожен вид частотної (фазової) характеристики можна отримати за допомогою використовуваних каскадів, тому на апроксимуючі функції накладається обмеження.

На наступному етапі розв'язується задача реалізації – пошук сукупності кіл, що містять вихідні елементи (пасивні елементи, або активні ланки потрібного порядку), які дають в результаті характеристики, досить близькі до вибраної апроксимуючої функції. Зазвичай другим етапом є пошук способу з'єднання використовуваних ланок в єдиний пристрій (структурний синтез). У зв'язку з тим, що будь-яку необхідну характеристику можна реалізувати великою кількістю різних способів, структурний синтез є неоднозначною задачею. Як правило, розглядають декілька найбільш простих реалізацій (наприклад, ланки першого та другого порядків), які потім уточнюють, залучаючи додаткові критерії оптимізації вибраного рішення. Критеріями оптимізації можуть бути мінімальна кількість активних або пасивних елементів, чутливість до зміни їхніх параметрів і т.д.

Третім, заключним етапом є вибір виду самих ланок, тобто електричних схем тих вихідних елементів, з яких складається весь пристрій. Безпосередня реалізація апроксимуючої функції високого порядку є доволі складною. Тому її частіше представляють у вигляді комбінації більш простих парціальних функцій не вище другого порядку.

Зазвичай синтезують ФНЧ, а фільтри інших типів зводять до АЧХ ФНЧ за допомогою спеціальних частотних перетворень.

Ідеальну АЧХ для ФНЧ неможливо тримати за допомогою схеми зі скінченної кількості елементів n . Тому зазвичай використовують прийнятніший для практики спосіб задання вимог до АЧХ: у смузі пропускання

значення внесеного затухання не повинно перевищувати задане значення $A_{\max}$, а у смузі затримки внесене затухання має бути більшим за задане значення $A_{\min}$ (рисунок 1.1). Таку АЧХ апроксимують тією чи іншою функцією.

На практиці найчастіше зустрічається два способи апроксимації ідеальної АЧХ, які дозволяють для даної кількості елементів n максимально наблизити реальну характеристику фільтра до ідеальної.

За першого способу параметри елементів фільтра підбирають таким чином, щоб отримати максимально плоску АЧХ (характеристику Батерворта). Ця характеристика називається максимально плоскою тому, що затухання монотонно збільшується зі збільшенням частоти.

За другого способу апроксимації реалізують рівномірно пульсуючу характеристику (характеристику Чебишева). Ця характеристика найменше відхиляється від ідеальної у смузі пропускання фільтра. За однакової кількості елементів n характеристика Чебишева має більшу стрімкість за характеристику Батерворта поза смугою пропускання, але при цьому у неї гірша рівномірність у смузі пропускання.

1.2 Поширені програмні середовища моделювання мікрохвильових частотних фільтрів

Зручно користуватись при розв'язанні таких задач онлайн-калькуляторами. Наприклад, від компаній Analog Devices [1] (рисунок 1.1) чи Texas Instruments [2] (рисунок 1.1).

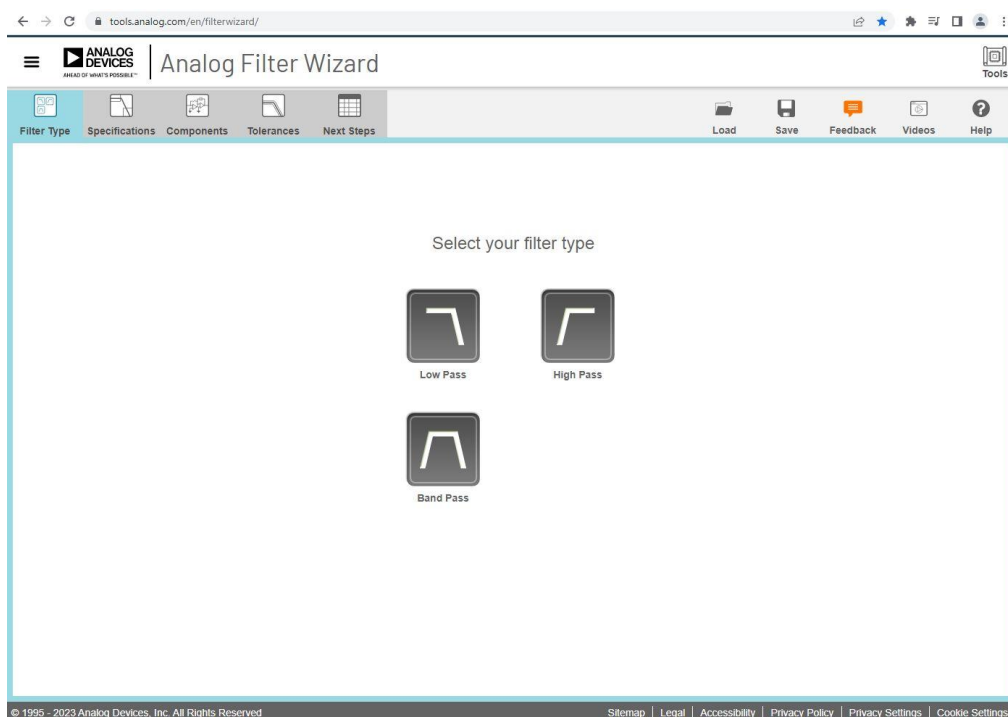


Рисунок 1.1 – Онлайн-калькулятор від компанії Analog Devices

У цих калькуляторах реалізовано описану вище послідовність проектування частотного фільтра – від задання вимог до фільтра, підбір апроксимуючого полінома до реалізації його на конкретному операційному підсилювачі у вигляді електричної принципової схеми.

Проте для проектування мікрохвильових фільтрів вони, на жаль, не підходять, оскільки пропонують схемні активних фільтрів для частот, помітно нижчих за мікрохвильові.

Потрібно підбирати інше програмне середовище. Подальший аналіз джерел інформації привів до такого списку: CST STUDIO SUITE, Ansys HFSS, FEKO, Microwave Office, QucsStudio та RFSim99.

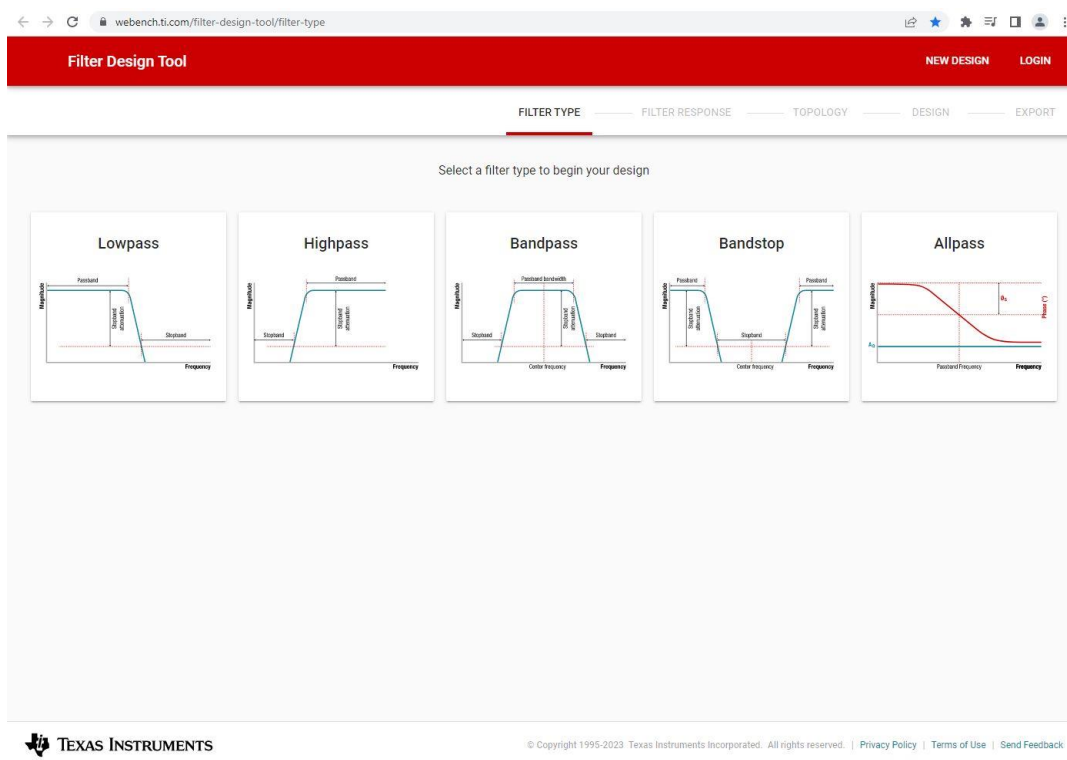


Рисунок 1.2 – Онлайн-калькулятор від компанії Texas Instruments

CST STUDIO SUITE, Ansys HFSS, FEKO, Microwave Office (MWO) є високопродуктивними програмами для електромагнітного моделювання, у першу чергу для мікрохвильової інженерії та антенної техніки [3 – 7].

Для прикладу, на рисунку 1.3 [3] показано результати моделювання електромагнітного поля програмою CST STUDIO SUITE.

Але потрібно пам'ятати про ключові особливості цих програмних продуктів: вони є комерційними (і доволі дорогими, а студентські ліцензії на них не завжди доступні); потребують чимало дискового простору для інсталяції та апаратних ресурсів при роботі.

Щодо QucsStudio [8], то тут простіше – вона не є комерційним програмним продуктом, працює без інсталяції. Проте на її опанування потрібно теж чимало часу.

А що ж тоді RFSim99 [8]? Це безкоштовна програма для моделювання високочастотних кіл, працює без інсталяції. RFSim99 дозволяє проектувати як окремі компоненти (катушки, довгі лінії, конденсатори, катушки тощо), так і нарисовану принципову схему складного пристрою на екрані – подібно, наприклад, до MWO: вставляючи/перетаскуючи елементи з меню. Так, з

функціоналом розглянутих програм вона непорівнювана. Зате її можна швидко опанувати. Відкритим залишається питання щодо коректності отримуваних у ній результатів. З'ясуємо це у наступних розділах.

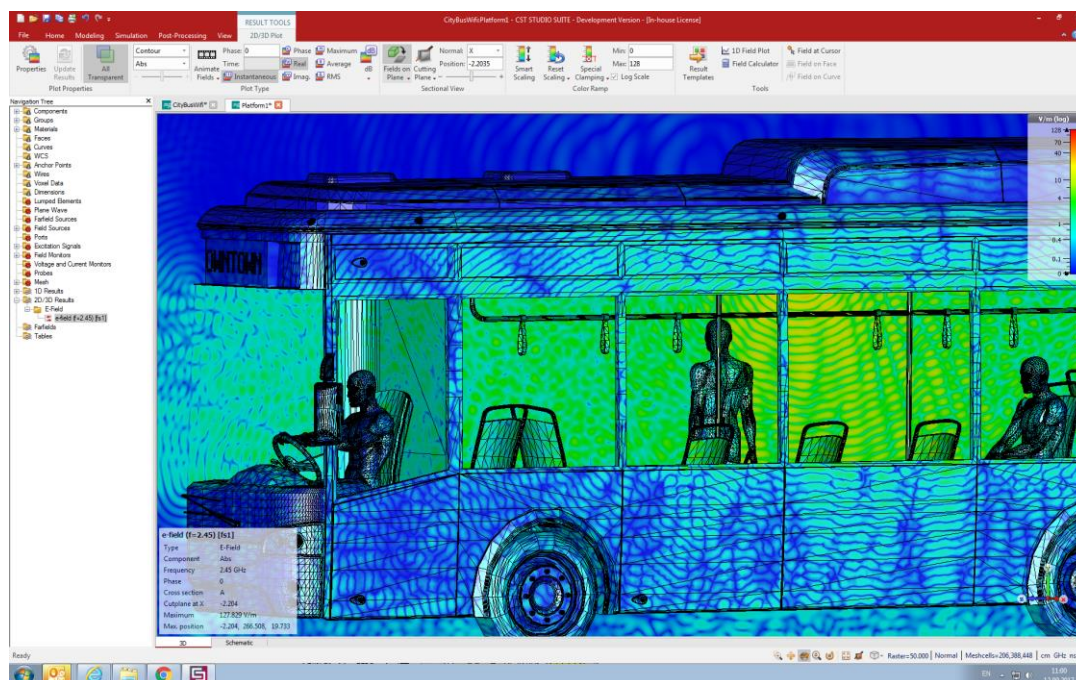


Рисунок 1.2 – Приклад результатів моделювання за допомогою CST STUDIO SUITE

ВИСНОВКИ

У розділі коротко розглянуто класичний алгоритм проектування частотних фільтрів, його реалізацію на низці сучасних програмних продуктів. Також проведено короткий порівняльний аналіз цих програм. Відкритим залишається питання щодо коректності отримуваних у програмі RFSim99 результатів. Це і буде досліджено у наступних розділах.

РОЗДІЛ 2

АЛГОРИТМ ПРОЕКТУВАННЯ ЧАСТОТНОГО ФІЛЬТРА У RFSim99

2.1 Огляд інтерфейсу RFSim99

Основний екран програми показано на рисунку 2.1

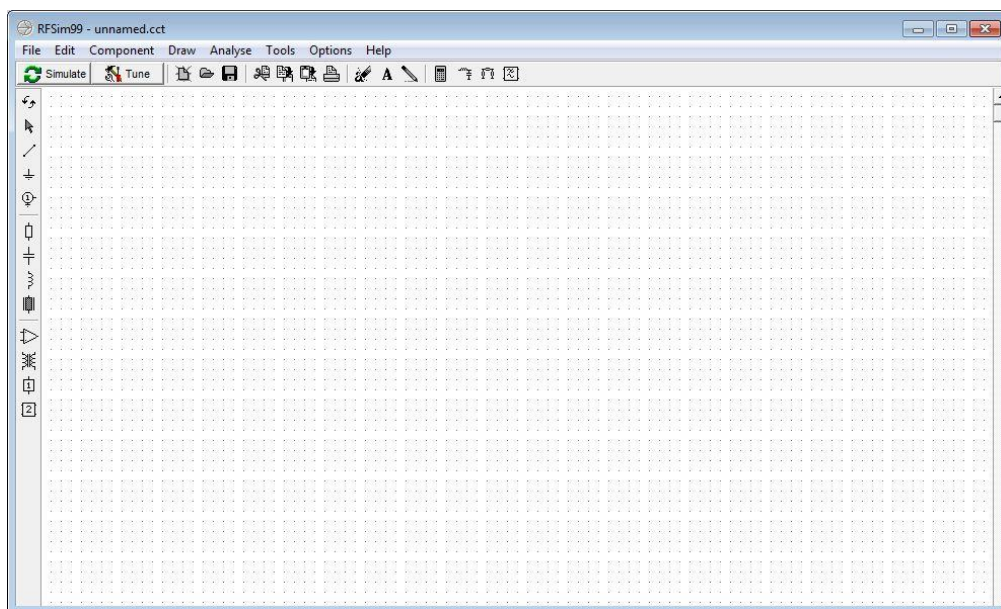


Рисунок 2.1 – Основний екран програми RFSim99

Принципову схему можна створити кількома способами. Перший – автоматично, якщо це стандартний пристрій (фільтр (рисунки 2.2), атенюатор (рисунки 2.3), пристрій узгодження (рисунки 2.4)). У цьому випадку достатньо задати вихідні параметри і схему буде автоматично створено.

У другому випадку – нарисувати власноруч.

Вибрати стандартний пристрій можна також і через лінійку інструментів – фільтр (рисунки 2.5), атенюатор (рисунки 2.6), пристрій узгодження (рисунки 2.7).

Важливим моментом також є те, що крім номіналів програм враховує розкид їхніх значень. За замовчуванням це $\pm 1\%$ для резистора, $\pm 2\%$ для конденсатора та $\pm 5\%$ для котушки індуктивності (рисунки 2.8).

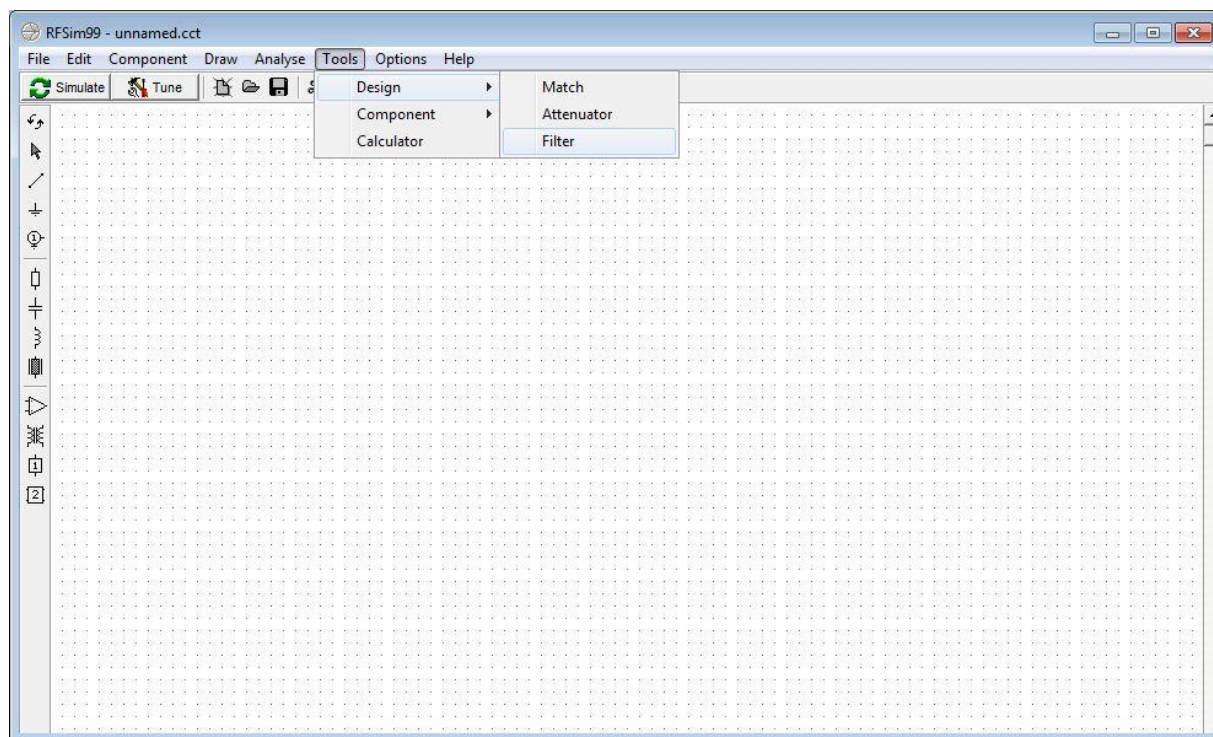


Рисунок 2.2 – Вибір готової схеми фільтра

Обидва варіанти схем (готову та створену власноруч) можна редагувати та модифікувати.

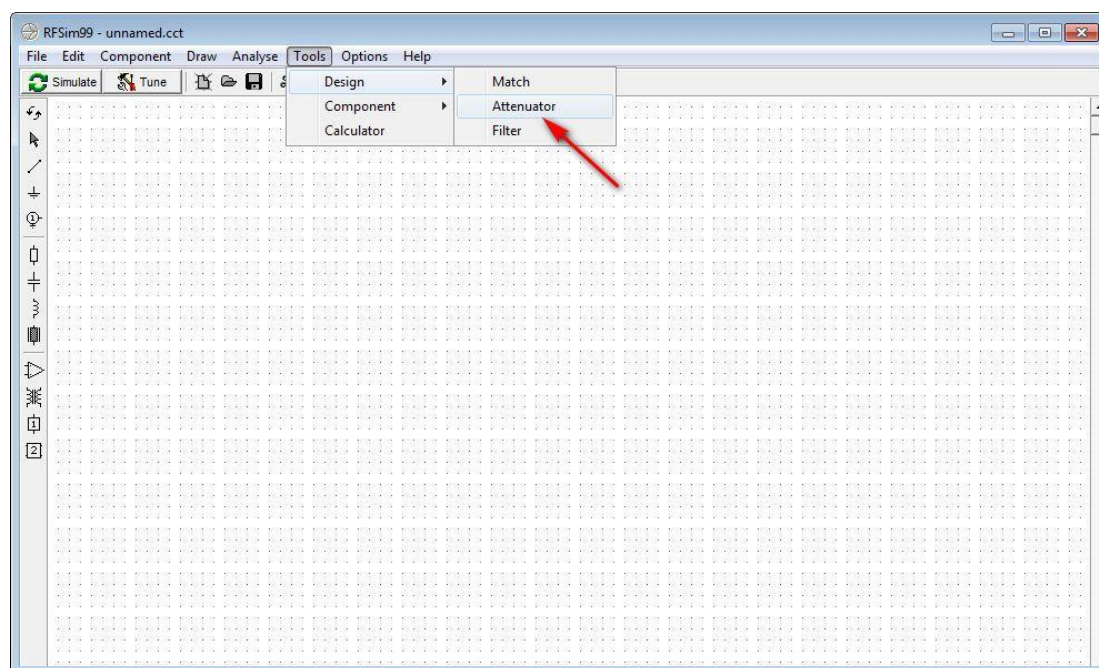


Рисунок 2.3 – Вибір готової схеми атенюатора

Є контекстне меню, а також меню Edit, де більше можливостей.

Також є можливість використовувати як елементи схеми дво- та триполюсними з заданими S – параметрами. Це дозволяє описувати нестандартні пристрої.

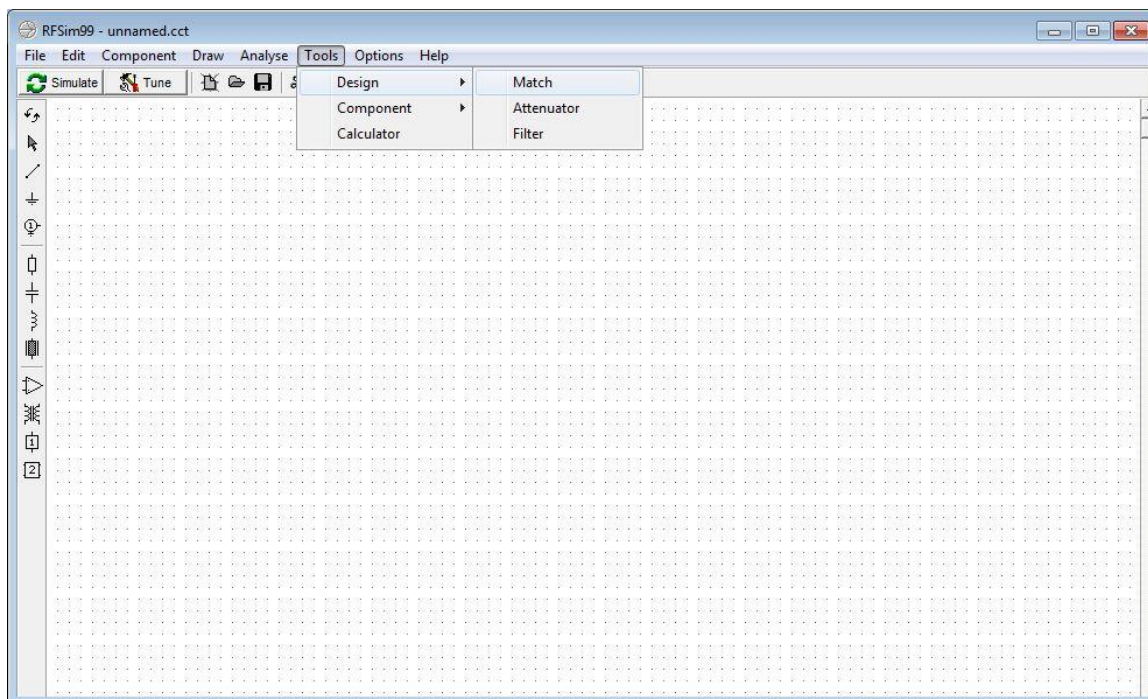


Рисунок 2.4 – Вибір готової схеми пристрою узгодження

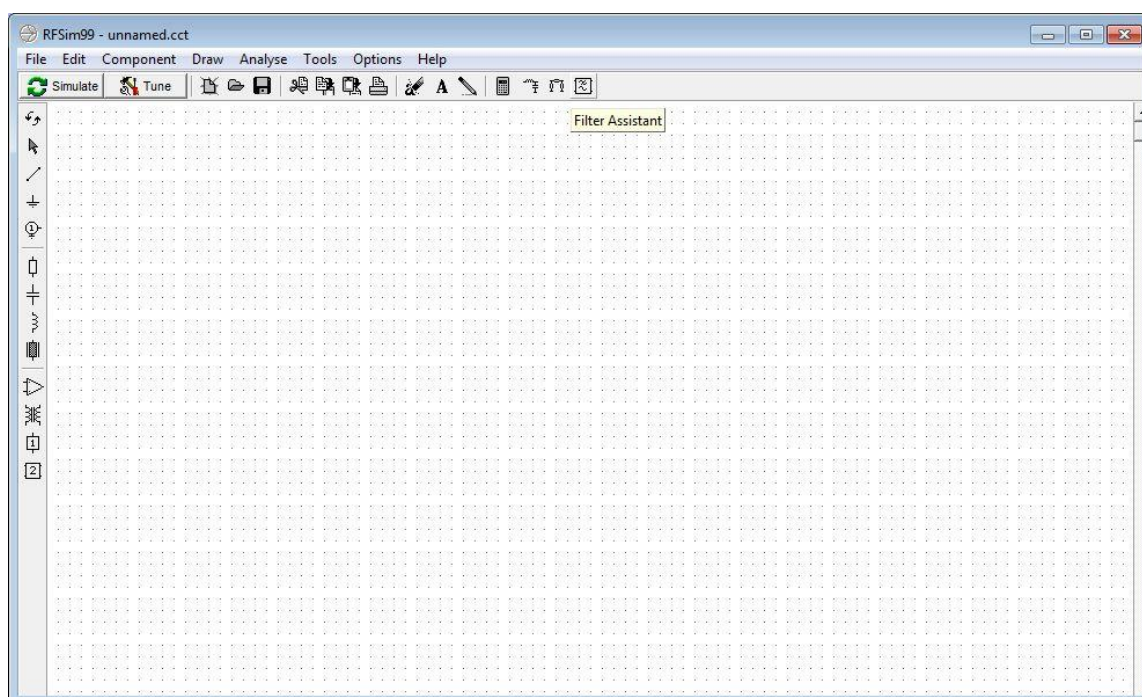


Рисунок 2.5 – Вибір схеми фільтра за допомогою лінійки інструментів

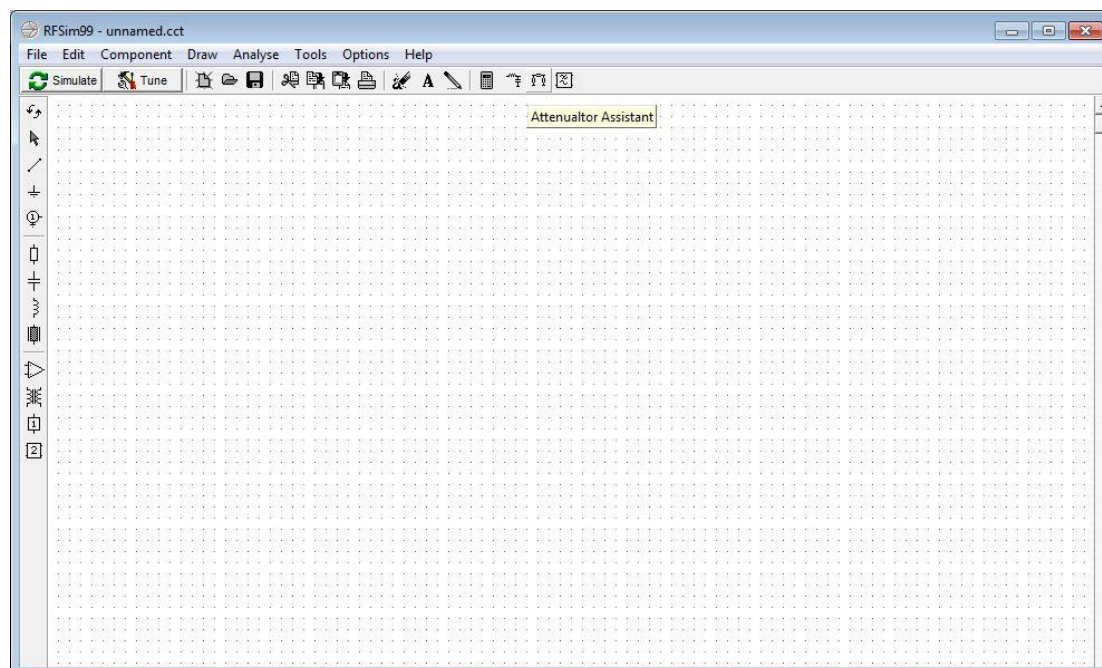


Рисунок 2.6 – Вибір схеми атенюатора за допомогою лінійки інструментів

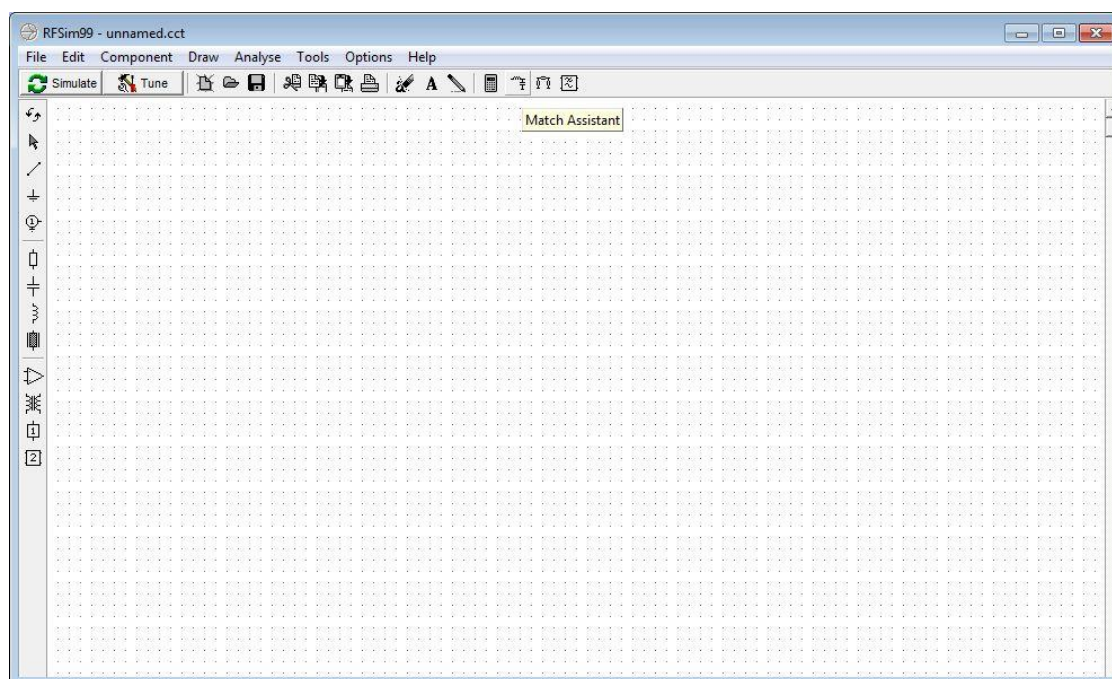


Рисунок 2.7 – Вибір схеми пристрою узгодження за допомогою лінійки інструментів

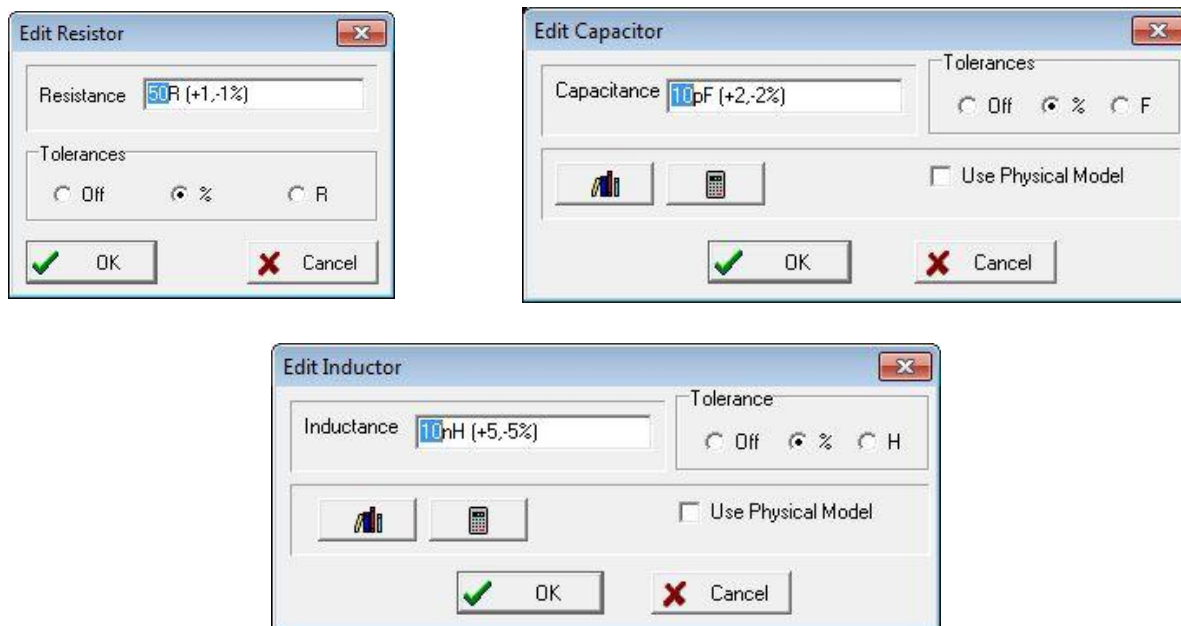


Рисунок 2.8 – Допуски за замовчуванням на елементи

Також можна включити режим, коли кожен елемент враховуватиметься за своєю фізичною еквівалентною схемою (наприклад, конденсатор з втратами та паразитною індуктивністю).

Після створення схеми натискаємо кнопку натиснувши кнопку «Simulate» (рисунок 2.9).

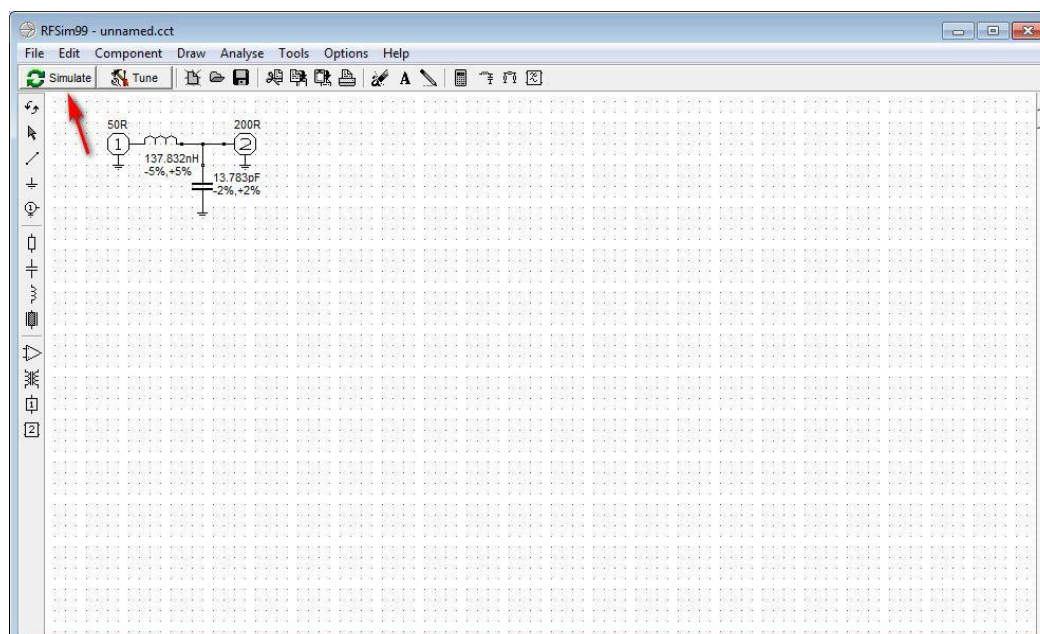


Рисунок 2.9 – Запуск аналізу схеми

Результати будуть у графічній формі у новому вікні – рисунок 2.10.

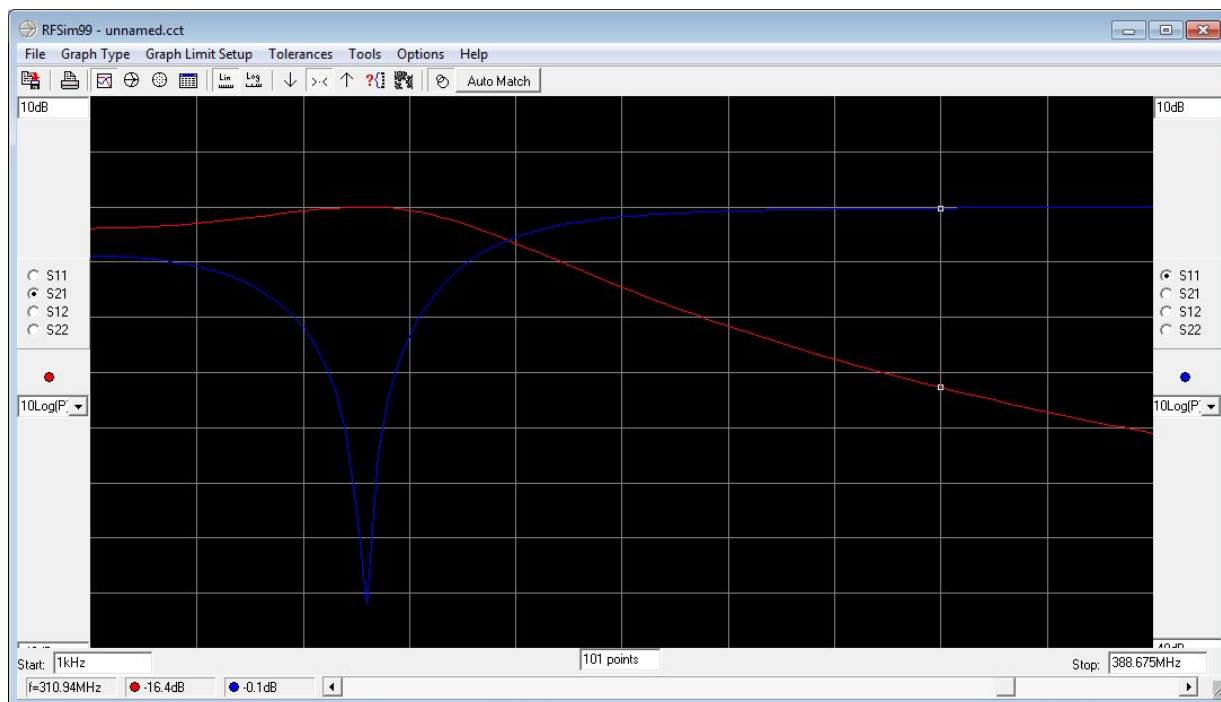


Рисунок 2.10 – Вікно результатів аналізу

Графіки можна налаштувати: вибрати елемент матриці розсіяння; вибрати ширину досліджуваної смуги частот (тут після числа потрібно вказати порядок порядку: Hz, kHz, MHz, GHz, рисунок 2.11); масштаб по осі ординат (логарифмічний чи лінійний) та його крок (за замовчуванням це 10 дБ, рисунок 2.12).

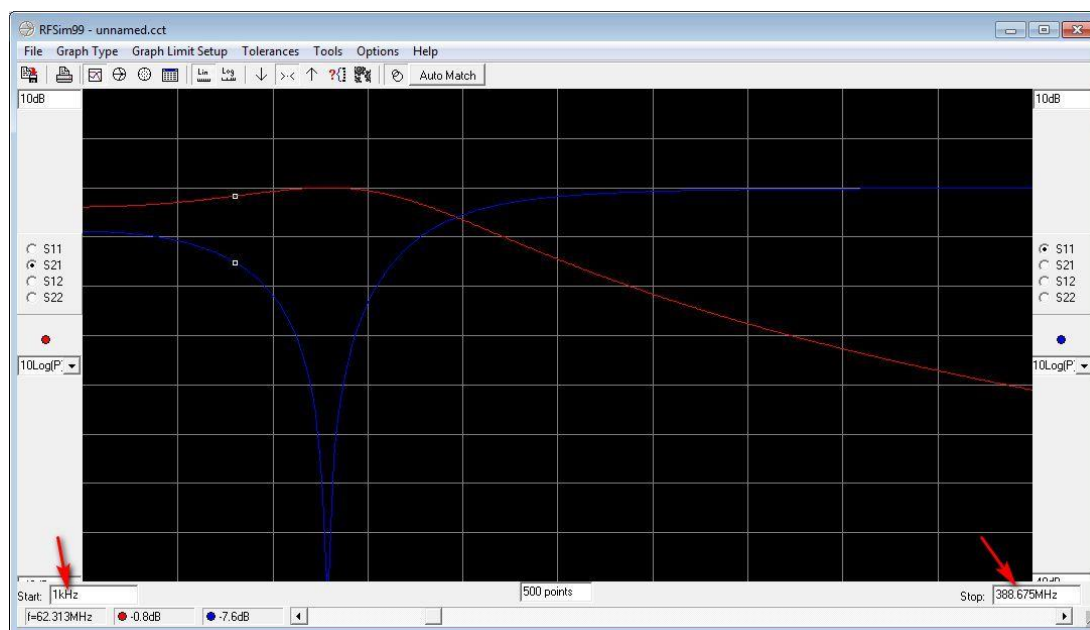


Рисунок 2.11 – Ширина частотного вікна для аналізу

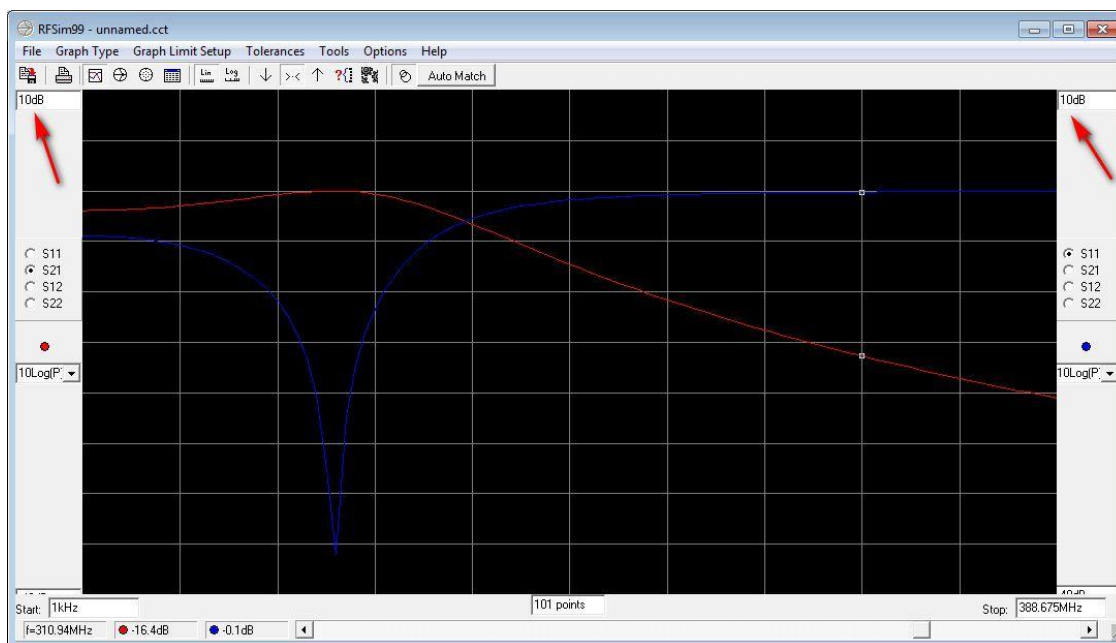


Рисунок 2.12 – Масштаб по осі ординат

Графік будується на основі 101 розрахованих точок (за замовчуванням), для детальнішого аналізу (типовий приклад – вузькосмугові фільтри) доцільно встановлювати більшу кількість точок (максимум 500 точок), рисунок 2.13.

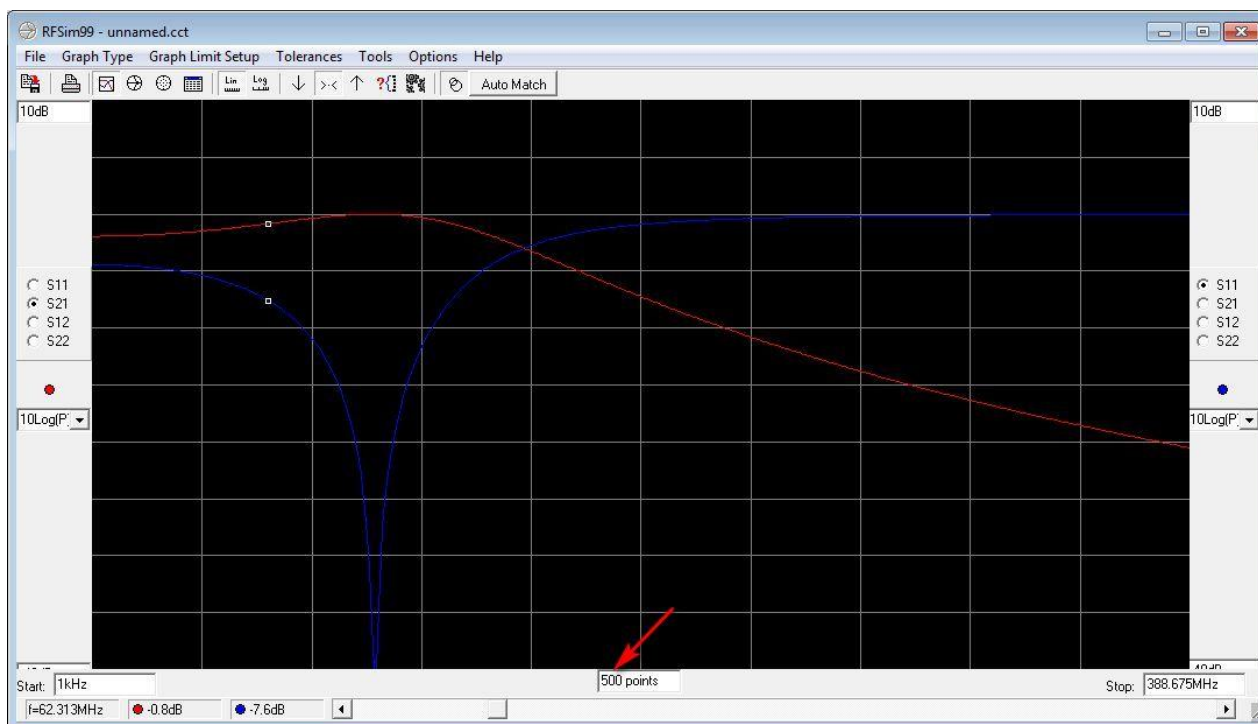


Рисунок 2.13 – Встановлення кількості розраховуваних точок на графіках

Вихідні графіки можна також побудувати у полярній (рисунок 2.14), але й також у формі діаграми Смітта (рисунок 2.15), а також у формі таблиці (рисунок 2.16).

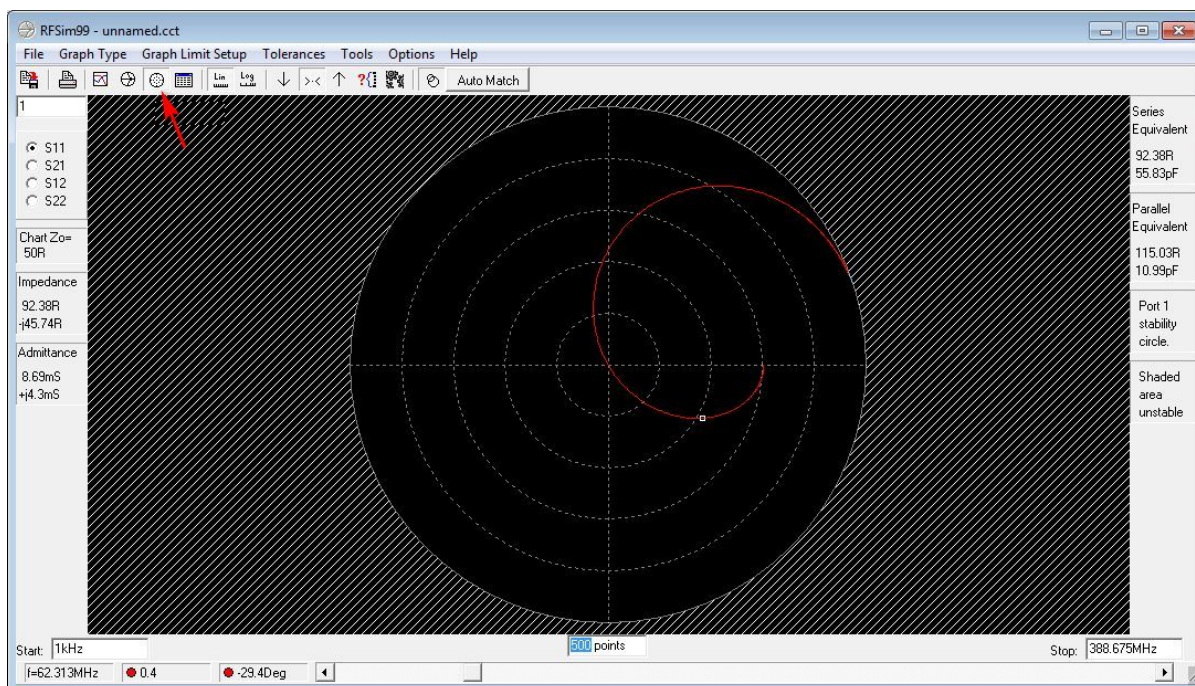


Рисунок 2.14 – Відображення результатів аналізу у полярній системі координат

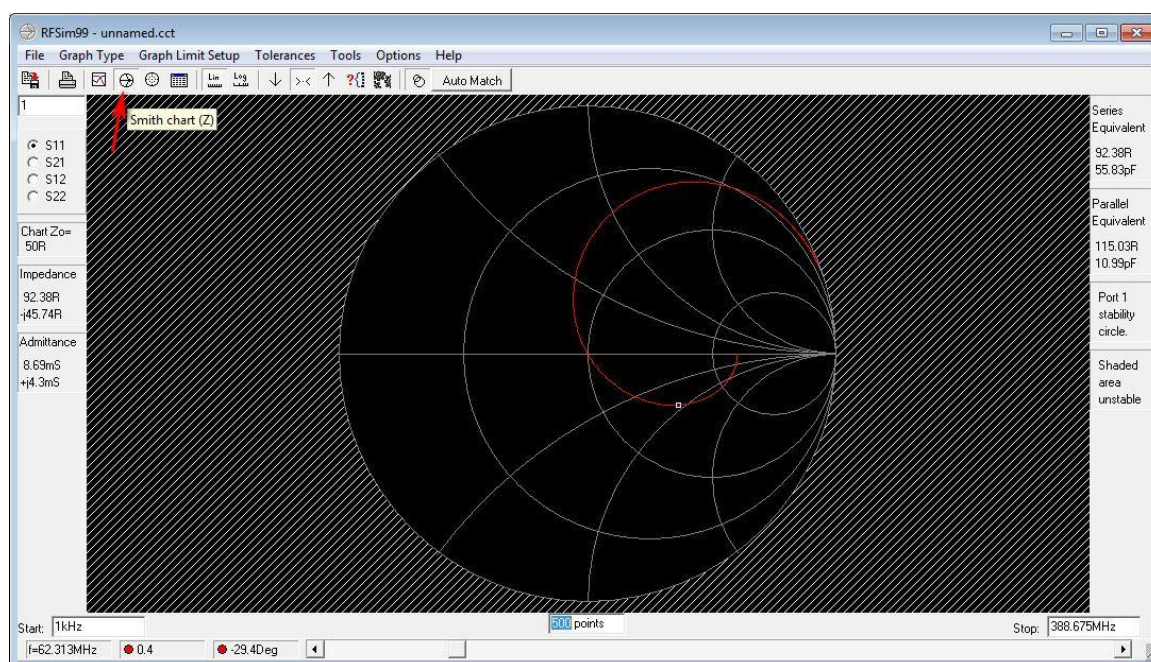
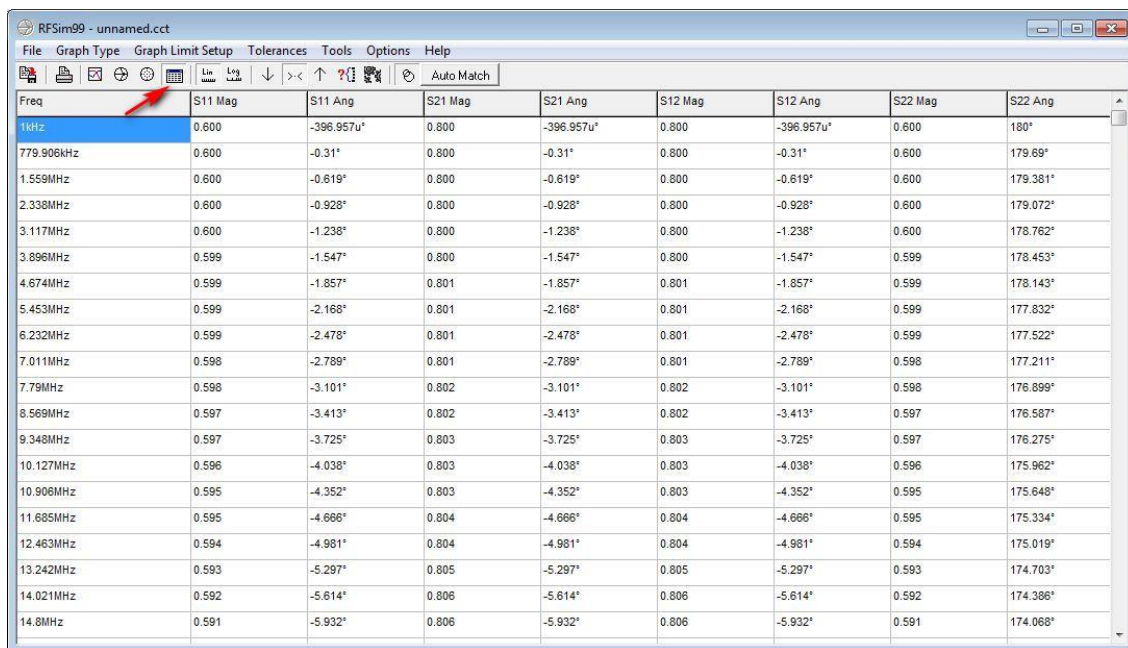


Рисунок 2.15 – Відображення результатів аналізу у формі діаграми Смітта



Freq	S11 Mag	S11 Ang	S21 Mag	S21 Ang	S12 Mag	S12 Ang	S22 Mag	S22 Ang
1kHz	0.600	-396.957u°	0.800	-396.957u°	0.800	-396.957u°	0.600	180°
779.906kHz	0.600	-0.31°	0.800	-0.31°	0.800	-0.31°	0.600	179.69°
1.559MHz	0.600	-0.619°	0.800	-0.619°	0.800	-0.619°	0.600	179.381°
2.338MHz	0.600	-0.928°	0.800	-0.928°	0.800	-0.928°	0.600	179.072°
3.117MHz	0.600	-1.238°	0.800	-1.238°	0.800	-1.238°	0.600	178.762°
3.896MHz	0.599	-1.547°	0.800	-1.547°	0.800	-1.547°	0.599	178.453°
4.674MHz	0.599	-1.857°	0.801	-1.857°	0.801	-1.857°	0.599	178.143°
5.453MHz	0.599	-2.168°	0.801	-2.168°	0.801	-2.168°	0.599	177.832°
6.232MHz	0.599	-2.478°	0.801	-2.478°	0.801	-2.478°	0.599	177.522°
7.011MHz	0.598	-2.789°	0.801	-2.789°	0.801	-2.789°	0.598	177.211°
7.79MHz	0.598	-3.101°	0.802	-3.101°	0.802	-3.101°	0.598	176.899°
8.569MHz	0.597	-3.413°	0.802	-3.413°	0.802	-3.413°	0.597	176.587°
9.348MHz	0.597	-3.725°	0.803	-3.725°	0.803	-3.725°	0.597	176.275°
10.127MHz	0.596	-4.038°	0.803	-4.038°	0.803	-4.038°	0.596	175.962°
10.906MHz	0.595	-4.352°	0.803	-4.352°	0.803	-4.352°	0.595	175.648°
11.685MHz	0.595	-4.666°	0.804	-4.666°	0.804	-4.666°	0.595	175.334°
12.463MHz	0.594	-4.981°	0.804	-4.981°	0.804	-4.981°	0.594	175.019°
13.242MHz	0.593	-5.297°	0.805	-5.297°	0.805	-5.297°	0.593	174.703°
14.021MHz	0.592	-5.614°	0.806	-5.614°	0.806	-5.614°	0.592	174.386°
14.8MHz	0.591	-5.932°	0.806	-5.932°	0.806	-5.932°	0.591	174.068°

Рисунок 2.16 – Відображення результатів аналізу у формі таблиці

У контексті розробки серійних пристроїв програма може враховувати розкид номіналів.

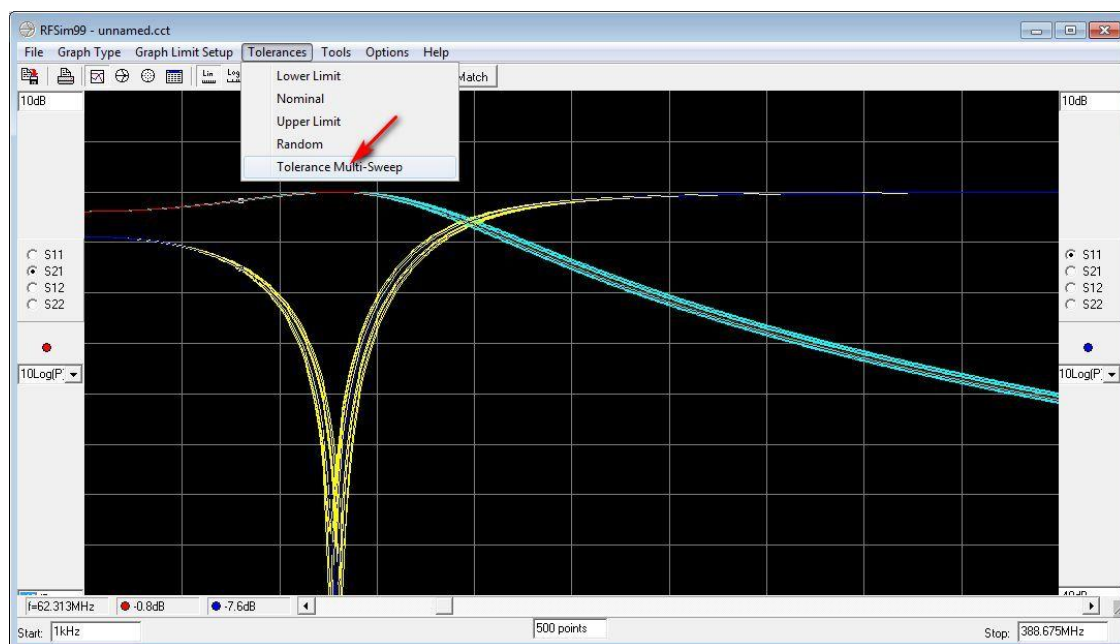


Рисунок 2.17 – Врахування розкиду номіналів

Можна враховувати як нижню (Lower limit), так і верхню (Upper limit) межі розкиду, а також накладати один на один певну кількість графіків (Tolerance Multi-Sweep) – рисунок 2.17. На цій ілюстрації лінії червоного та синього кольорів – це графіки за номінальними значеннями, решта графіків побудовані за випадкових (у межах заданих допусків) значеннях елемента

схеми. Кількість таких графіків (проходів) задається вручну користувачем – рисунок 2.18.

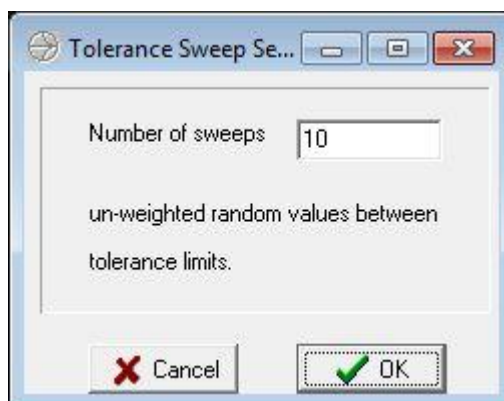


Рисунок 2.18 – Вікно задання кількості проходів

2.2 Проектування частотних фільтрів у RFSim99

У RFSim99 є можливість нарисувати власну схему фільтра, так і скористатись вбудованими схемними рішеннями фільтрів (рисунки 2.19, 2.20).

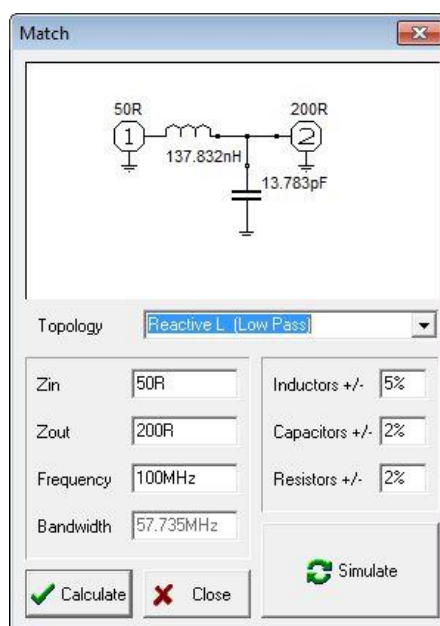


Рисунок 2.19 – Діалогове вікно вбудованих схемних рішень фільтрів

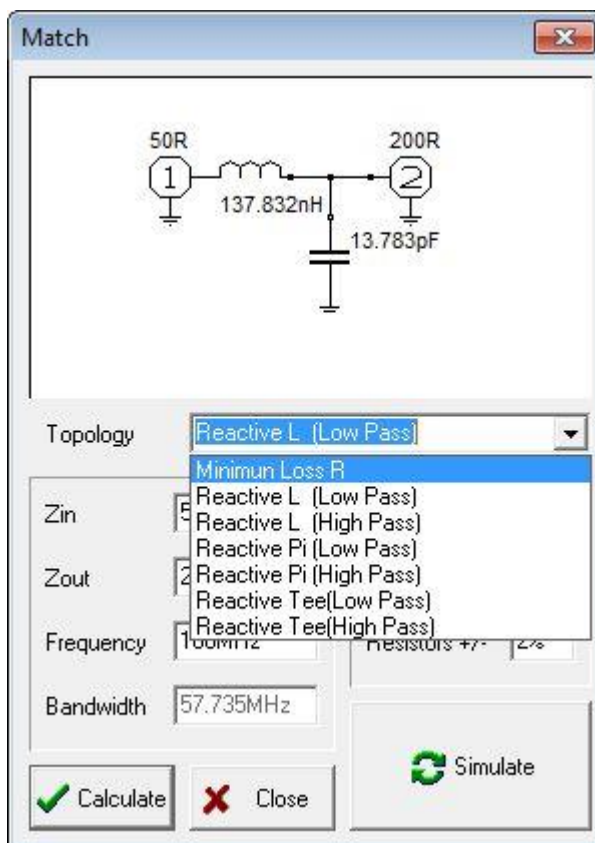


Рисунок 2.20 – Перелік вбудованих схемних рішень фільтрів

Для них можна встановити вхідний та вихідний опори, центральну частоту, а також допуски на номінали елементів схеми фільтра.

Після натискання кнопки «Calculate» буде розраховано та показано у цьому ж вікні смугу пропускання фільтра. А для аналізу фільтра також потрібно натиснути кнопку «Simulate».

ВИСНОВКИ

У розділі розглянуто ключові елементи інтерфейсу програми RFSim99, а також проектування частотних фільтрів з використанням їхніх вбудованих схемних рішень.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЧАСТОТНОГО ФІЛЬТРА У RFSim99

3.1 Приклади проектування частотних фільтрів за вбудованими схемами

Розглянемо кілька прикладів проектування частотних фільтрів за вбудованими схемами. На рисунку 3.1 показано схему фільтра нижніх частот, а на рисунку 3.2 – його амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) та модуль коефіцієнта відбиття.

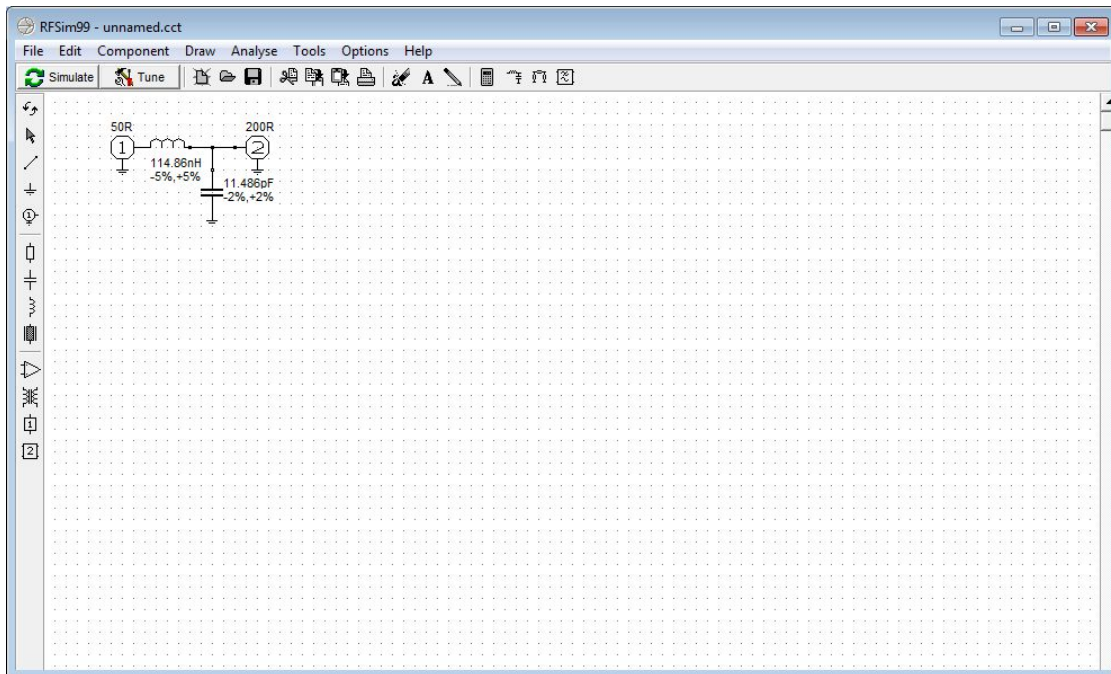


Рисунок 3.1 – Схема фільтра нижніх частот

На рисунку 3.3 показано схему фільтра верхніх частот, а на рисунку 3.4 – його амплітудно-частотну характеристику та модуль коефіцієнта відбиття. Потім для цієї схеми було змінено опір виходу (порт 2) з 200 Ом на 50 Ом. Амплітудно-частотну характеристику та модуль коефіцієнта відбиття набули вигляду, як показано на рисунку 3.5. Бачимо, що модуль коефіцієнта відбиття суттєво змінився.

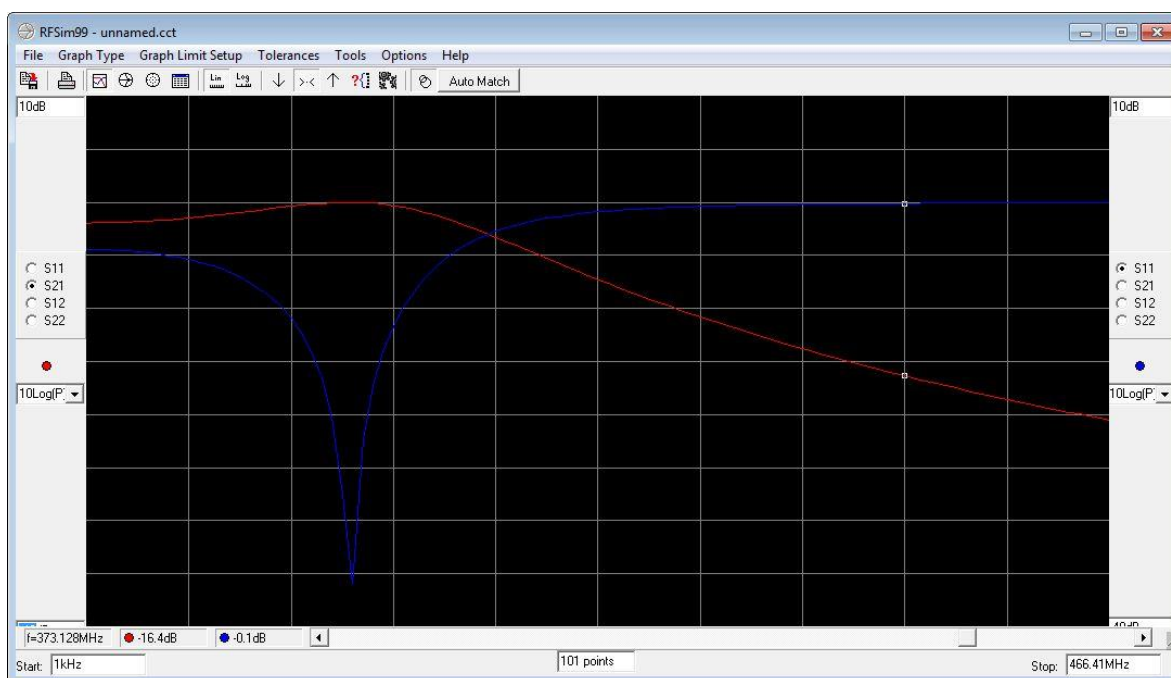


Рисунок 3.2 – АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття розглядуваного фільтра нижніх частот

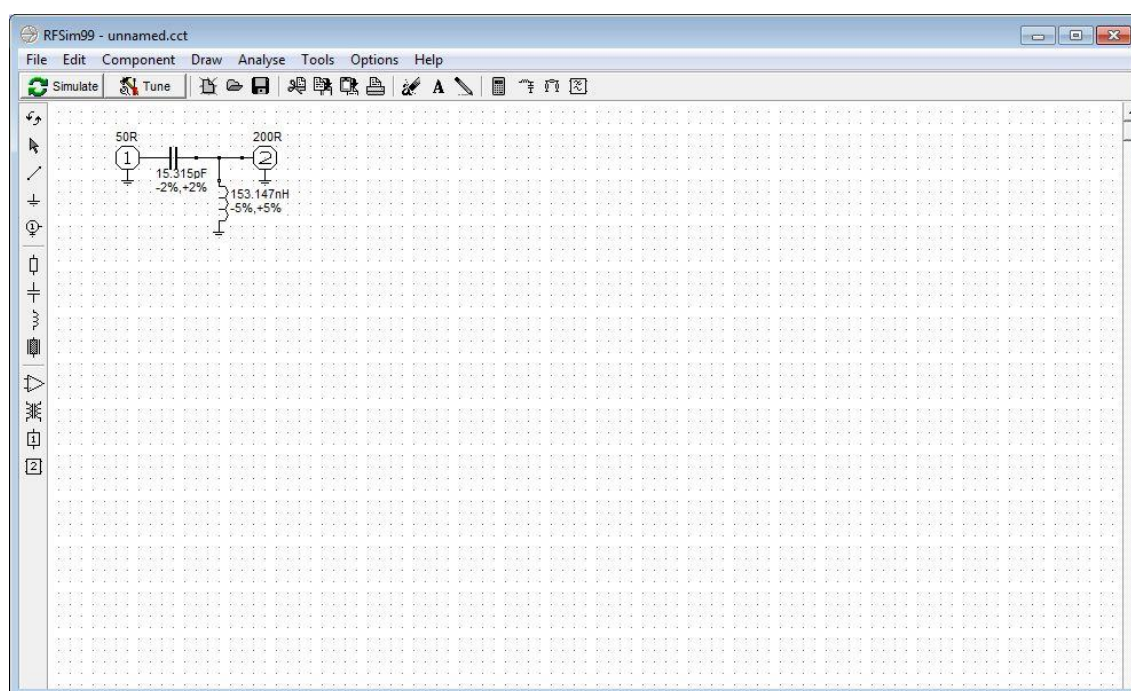


Рисунок 3.3 – Схема фільтра верхніх частот

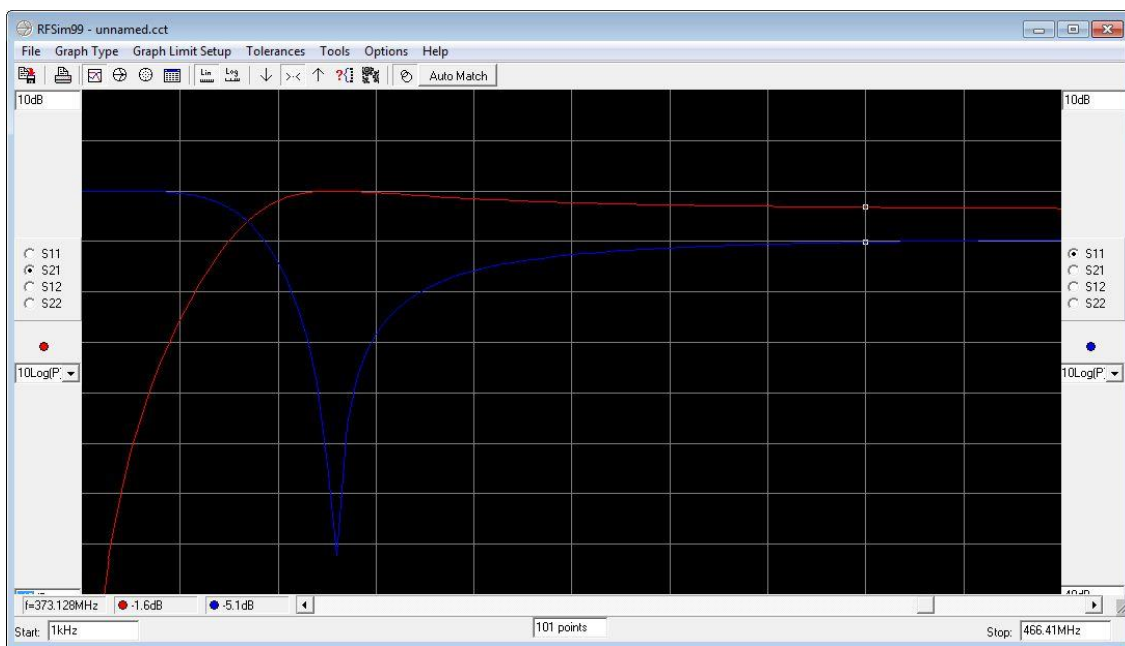


Рисунок 3.4 – АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття розглядуваного фільтра верхніх частот (опір навантаження 200 Ом)

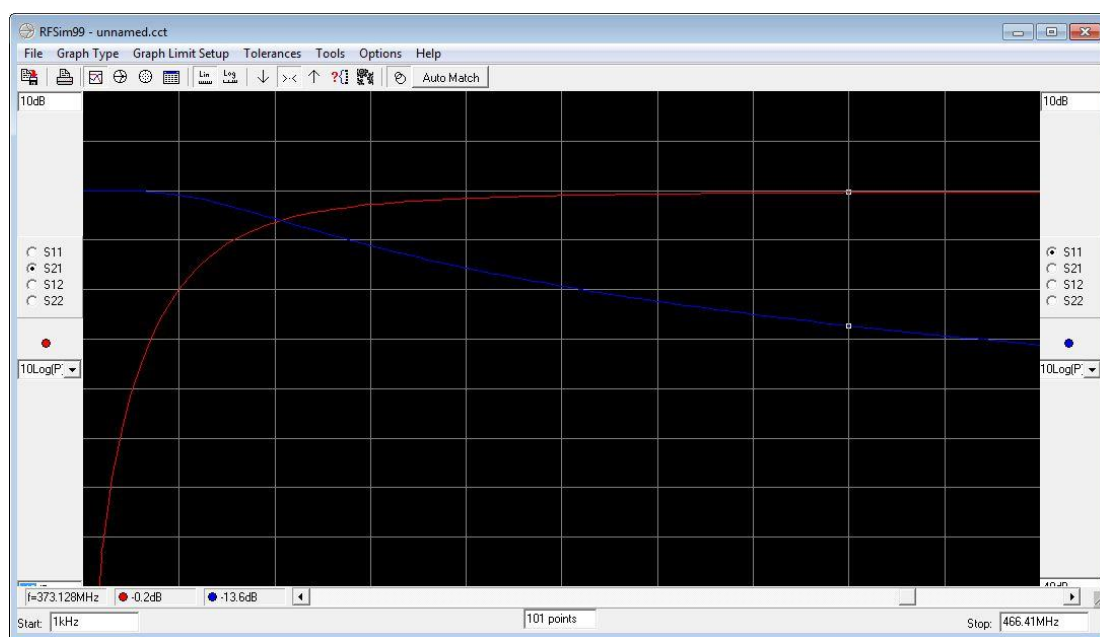


Рисунок 3.5 – АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття розглядуваного фільтра верхніх частот (опір навантаження 50 Ом)

3.2 Дослідження частотного фільтра

Залишилось останнє питання – щодо коректності отримуваних у програмі RFSim99 результатів.

Для цього промодельємо у RFSim99 та потужнішій програмі (обираємо MWO) одну і ту ж схему частотного фільтра. Нехай це буде фільтр верхніх частот (рисунки 3.6, 3.7), смуга частот для моделювання – 2...5 ГГц.

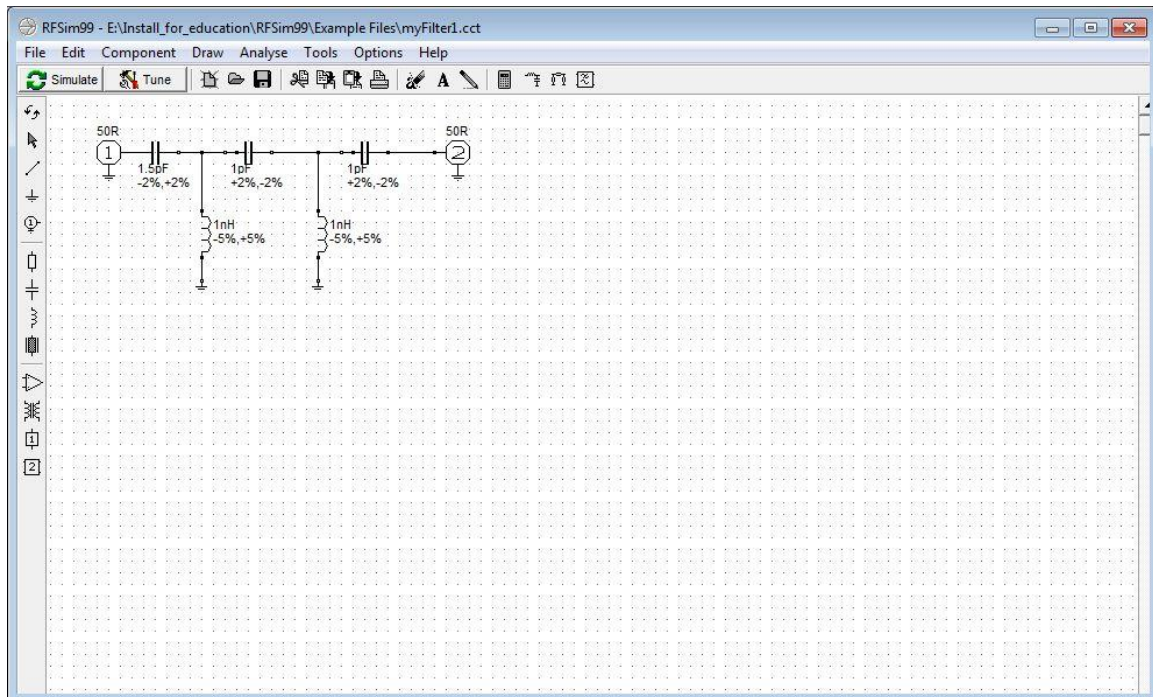


Рисунок 3.6 – Фільтр верхніх частот

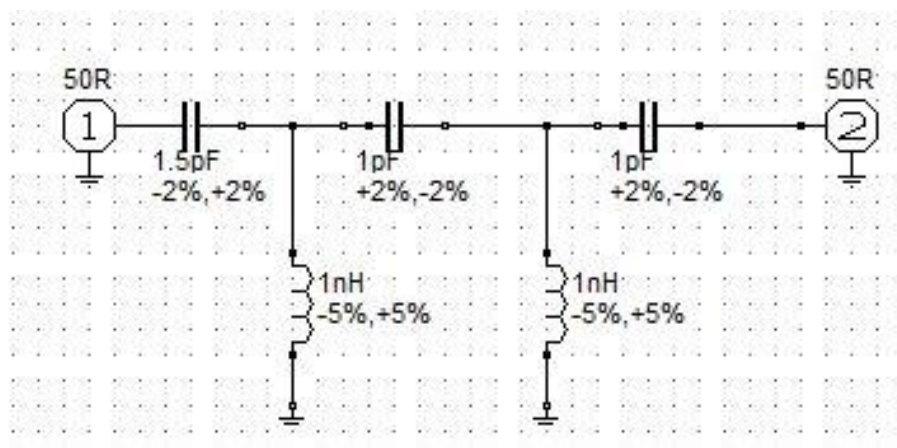


Рисунок 3.7 – Фільтр верхніх частот (масштаб збільшено)

Результати його аналізу показано на рисунку 3.8.

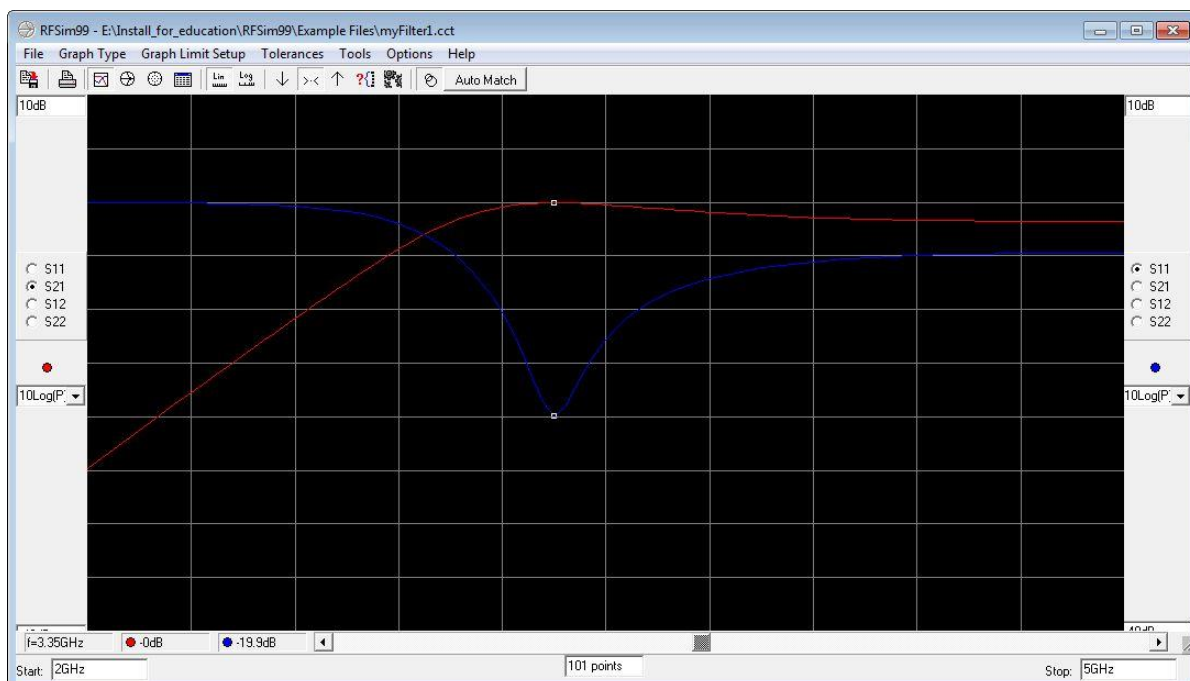


Рисунок 3.8 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.9.

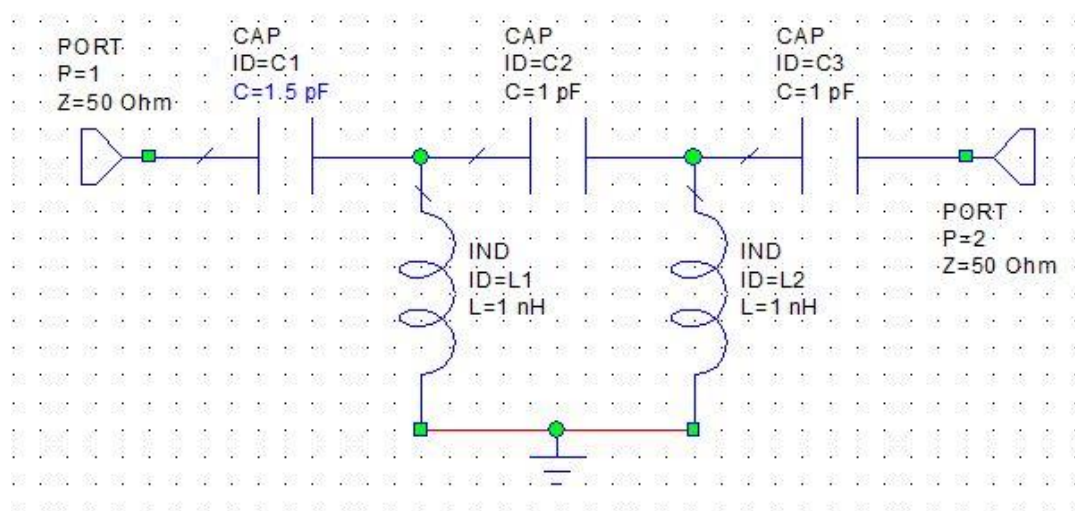


Рисунок 3.9 – Вигляд схеми фільтра верхніх частот у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.10 – 3.12.

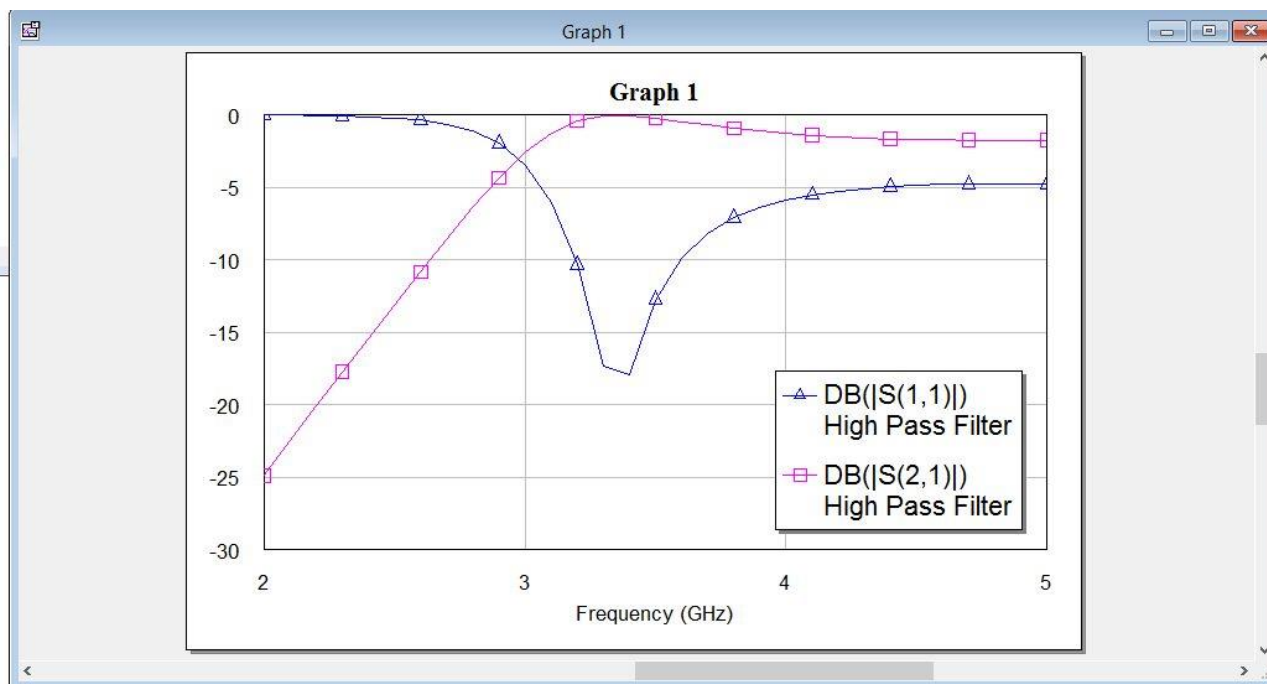


Рисунок 3.10 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

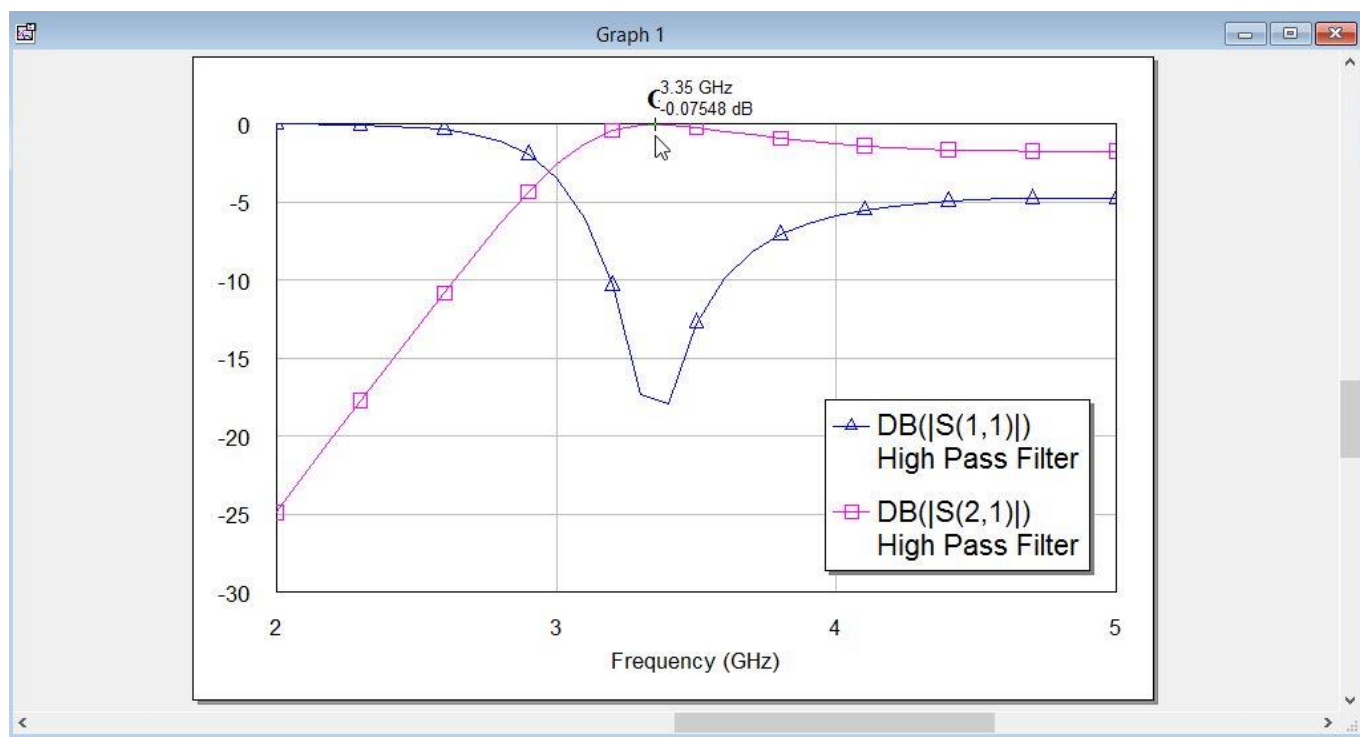


Рисунок 3.11 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

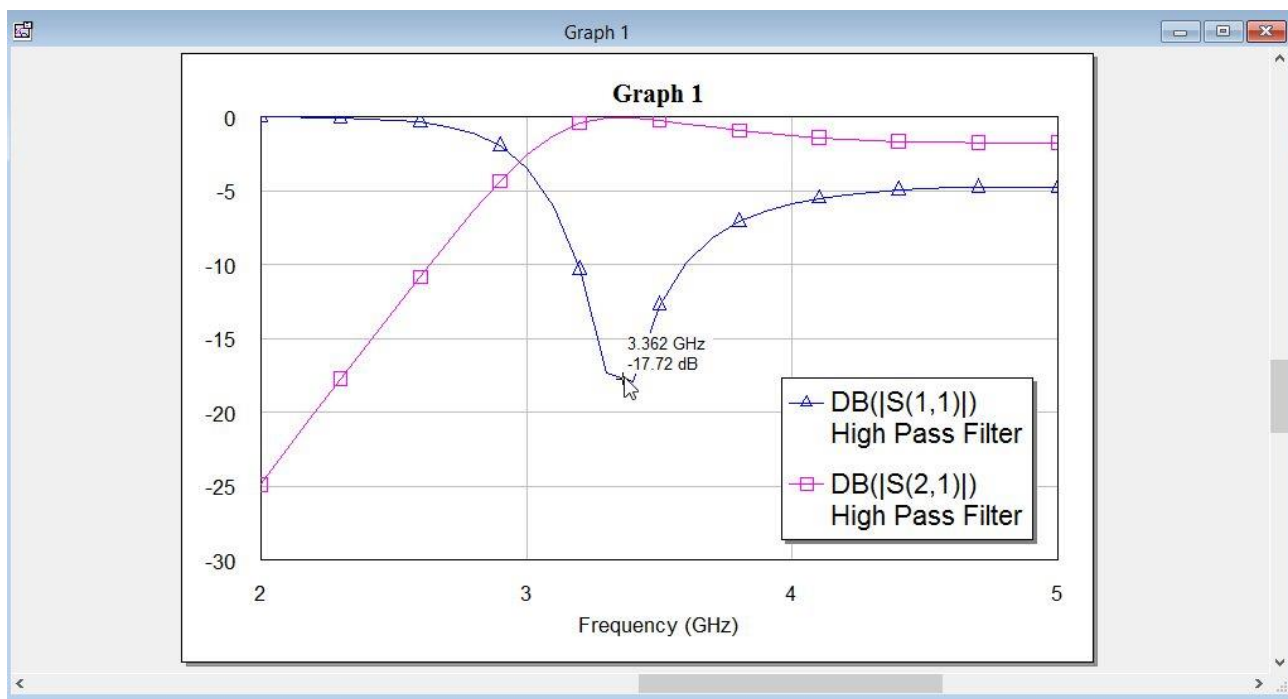


Рисунок 3.12 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

Зіставлення цих результатів вказує на їхню гарну збіжність.

На рисунку 3.13 показано схему фільтра нижніх частот, а на рисунку 3.14 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

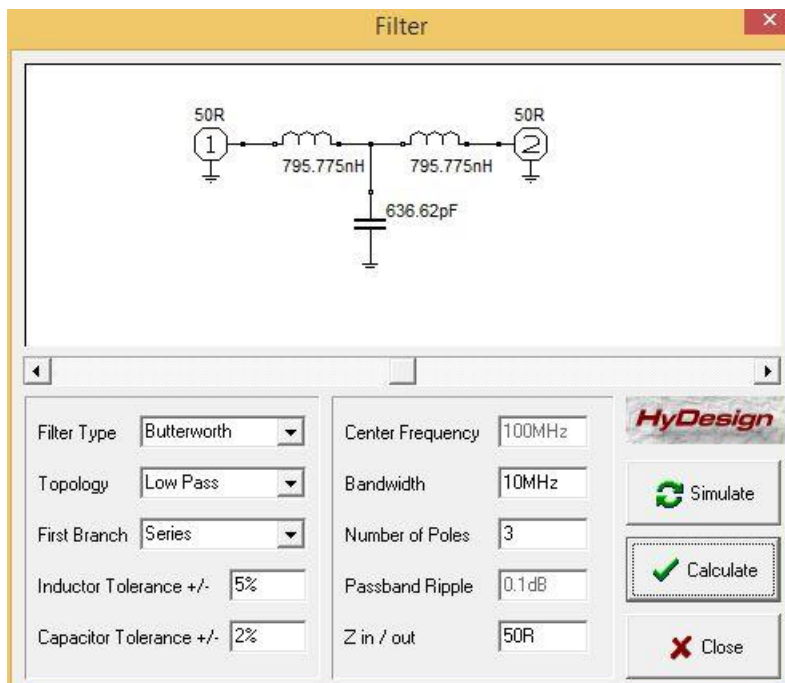


Рисунок 3.13 – Схема фільтра нижніх частот

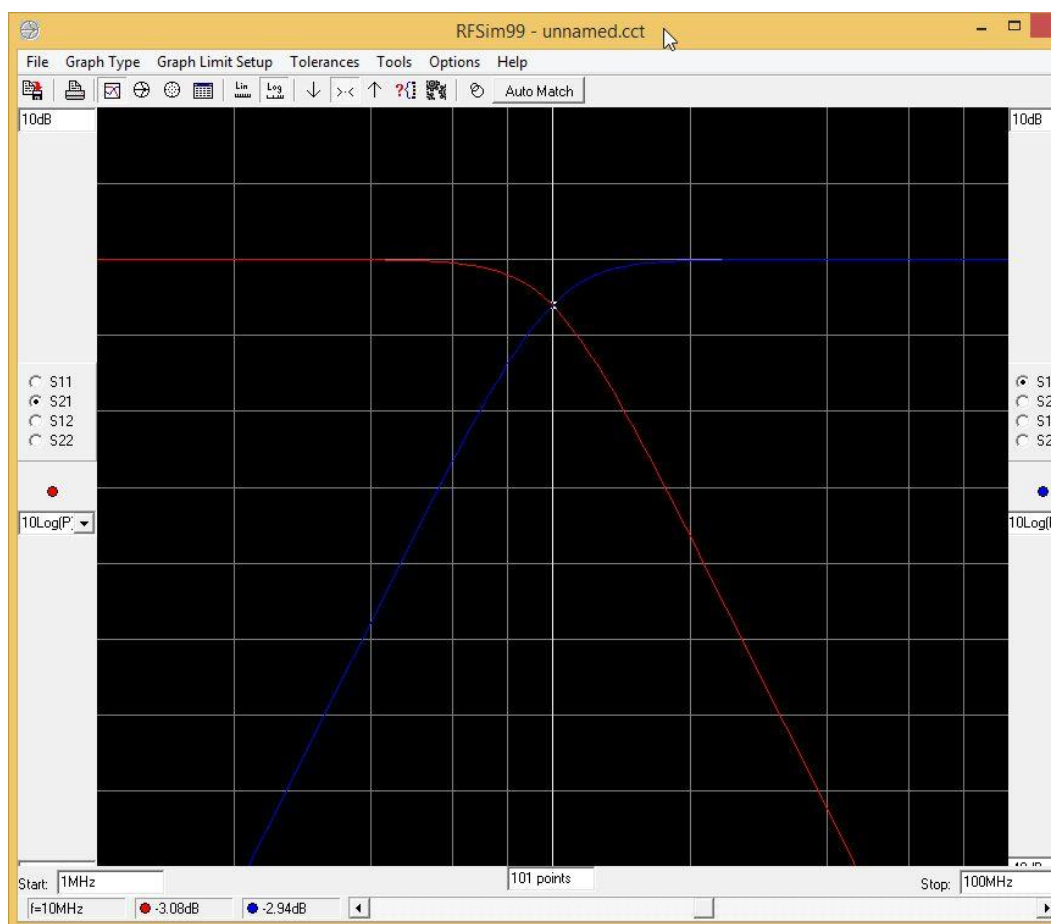


Рисунок 3.14 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.15.

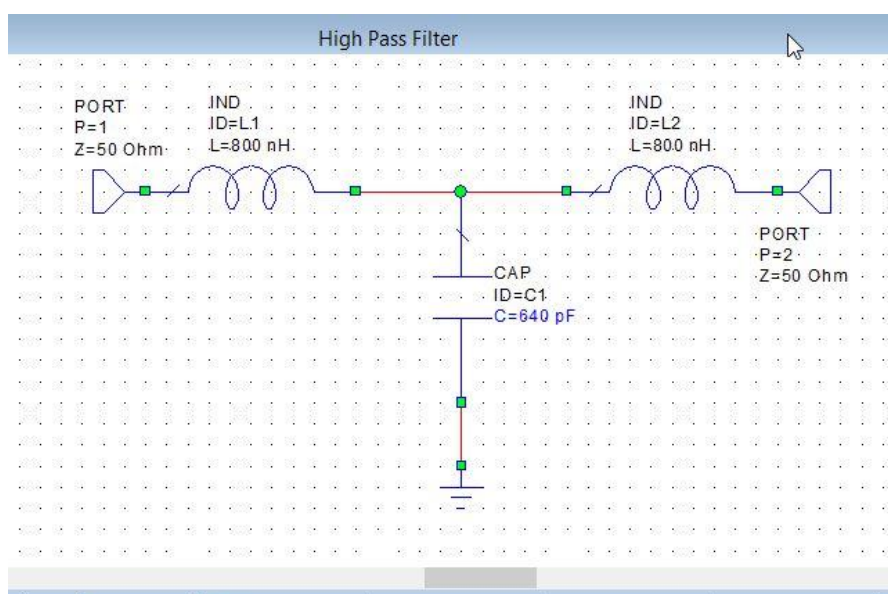


Рисунок 3.15 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.16

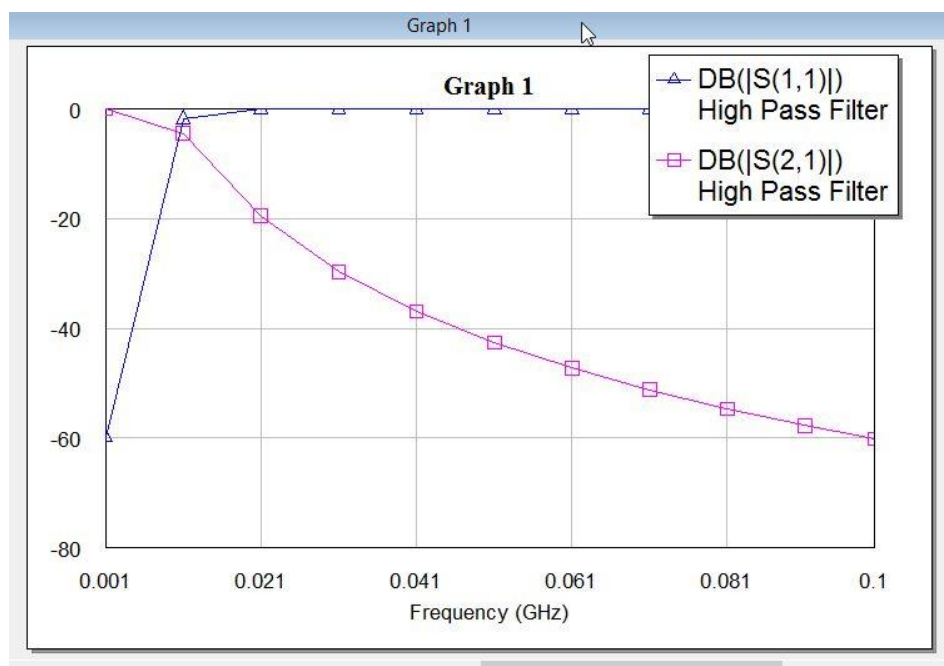


Рисунок 3.16 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.17 показано схему фільтра верхніх частот, а на рисунку 3.18 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

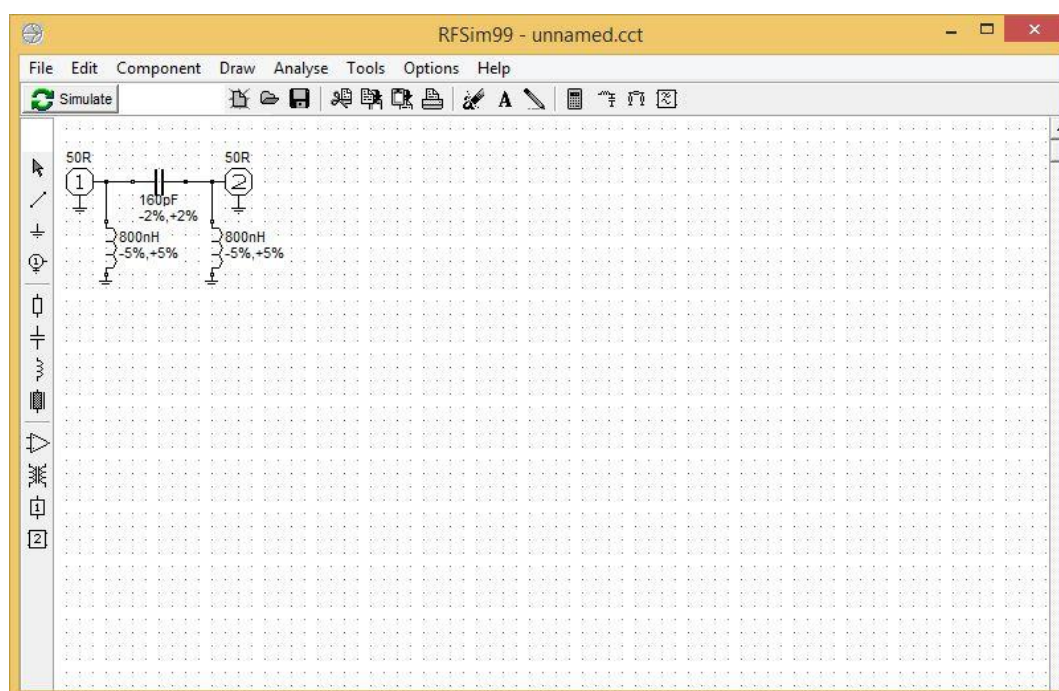


Рисунок 3.17 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

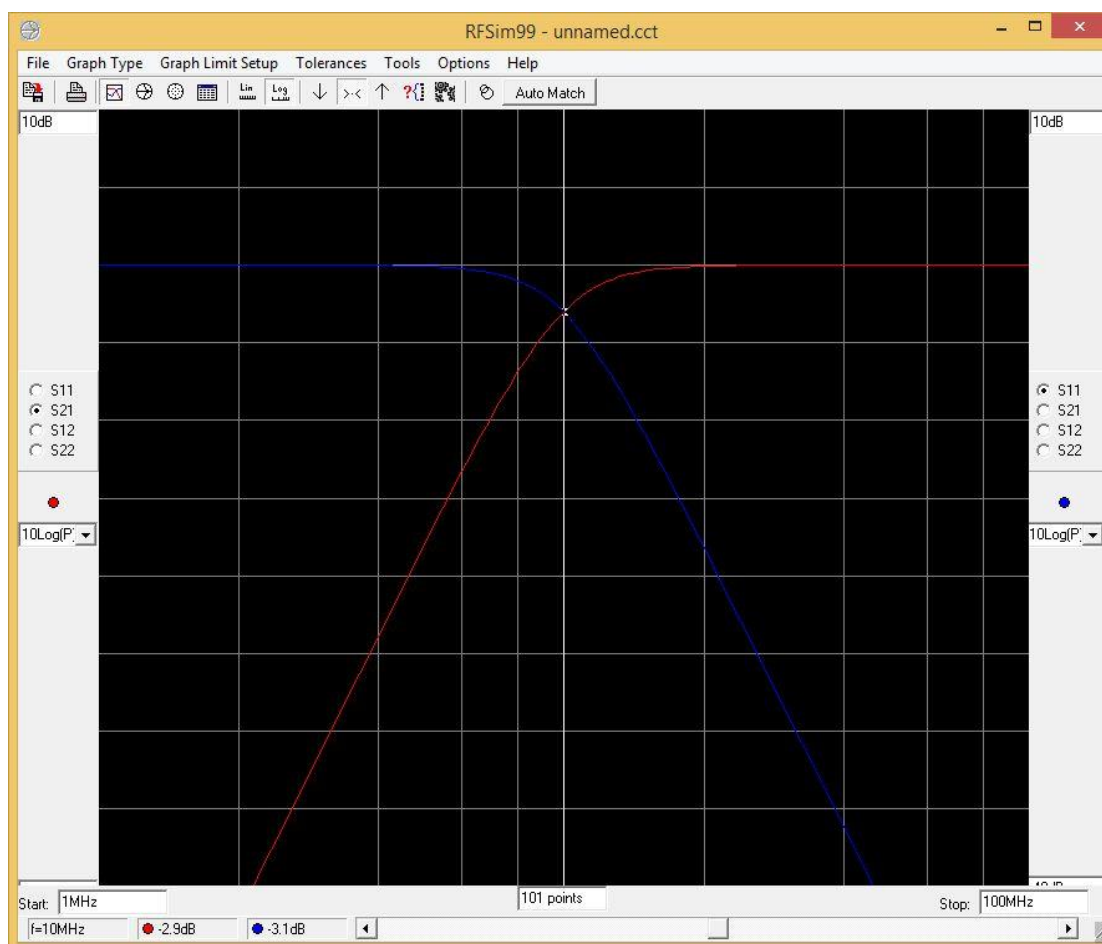


Рисунок 3.18 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.19.

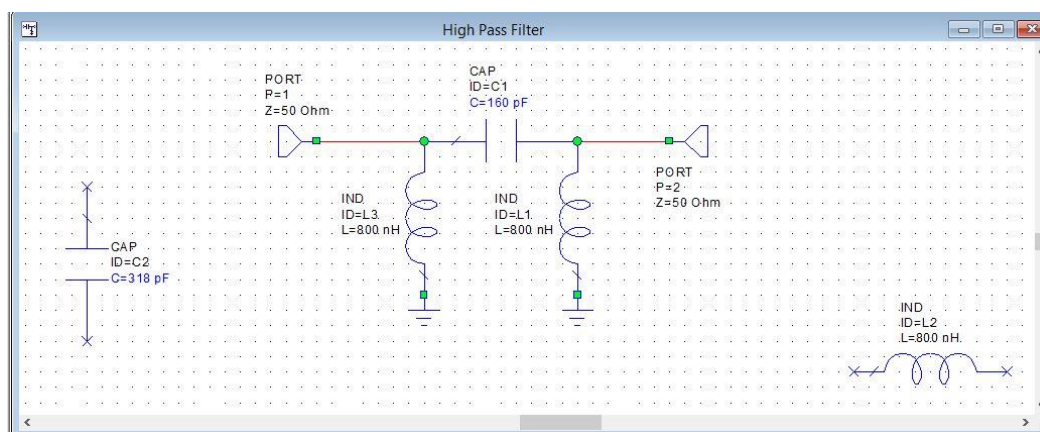


Рисунок 3.19 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.20

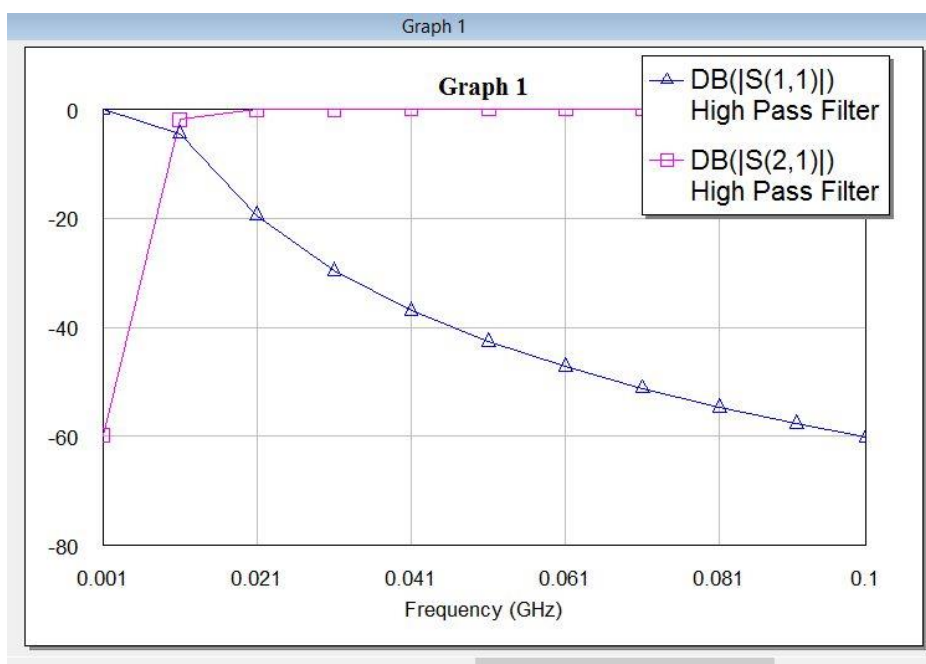


Рисунок 3.20 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.21 показано схему фільтра верхніх частот, а на рисунку 3.22 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

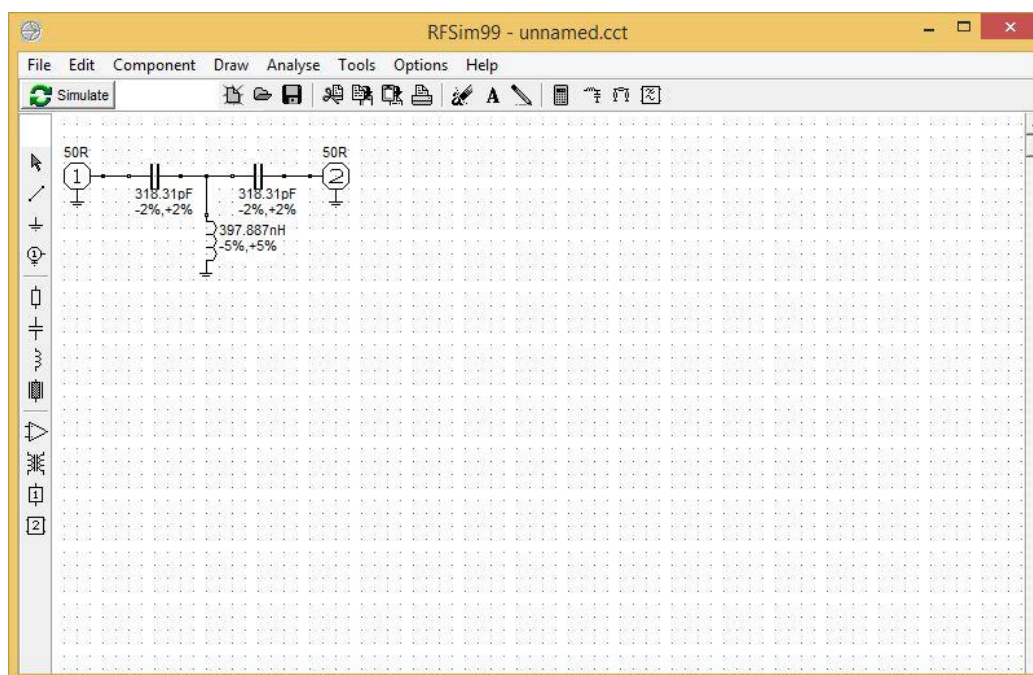


Рисунок 3.21 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

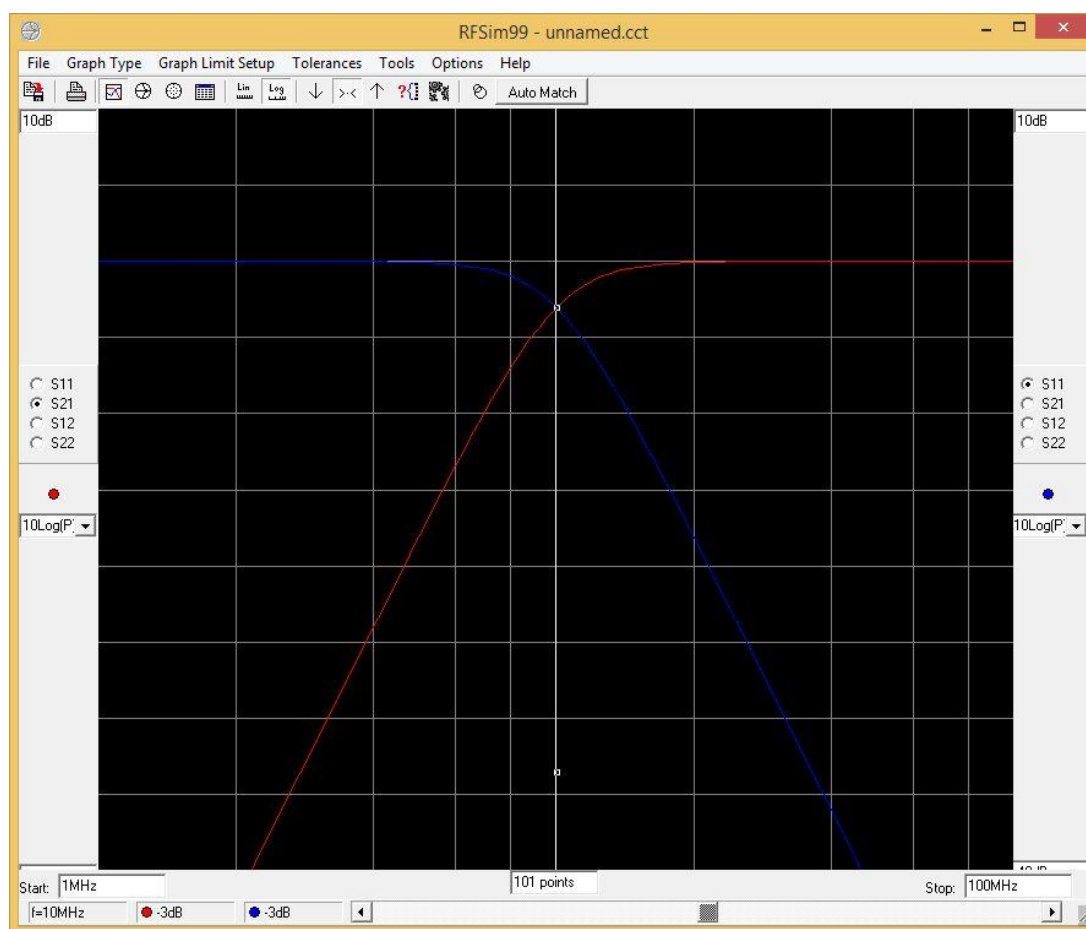


Рисунок 3.22 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.23.

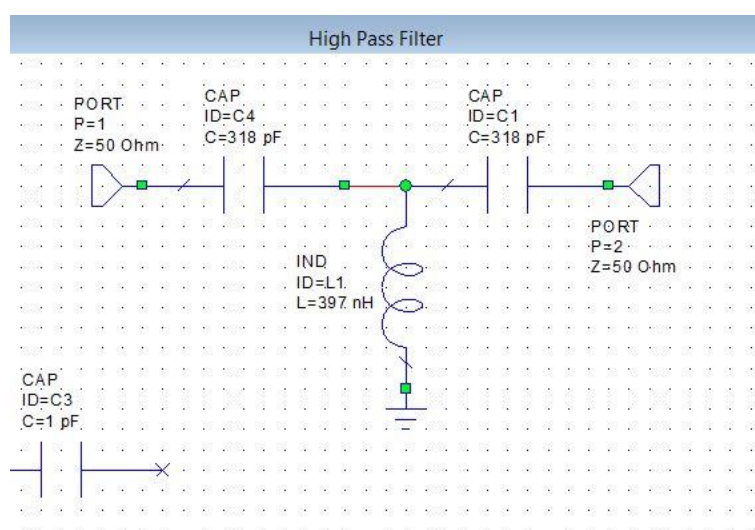


Рисунок 3.23 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.24

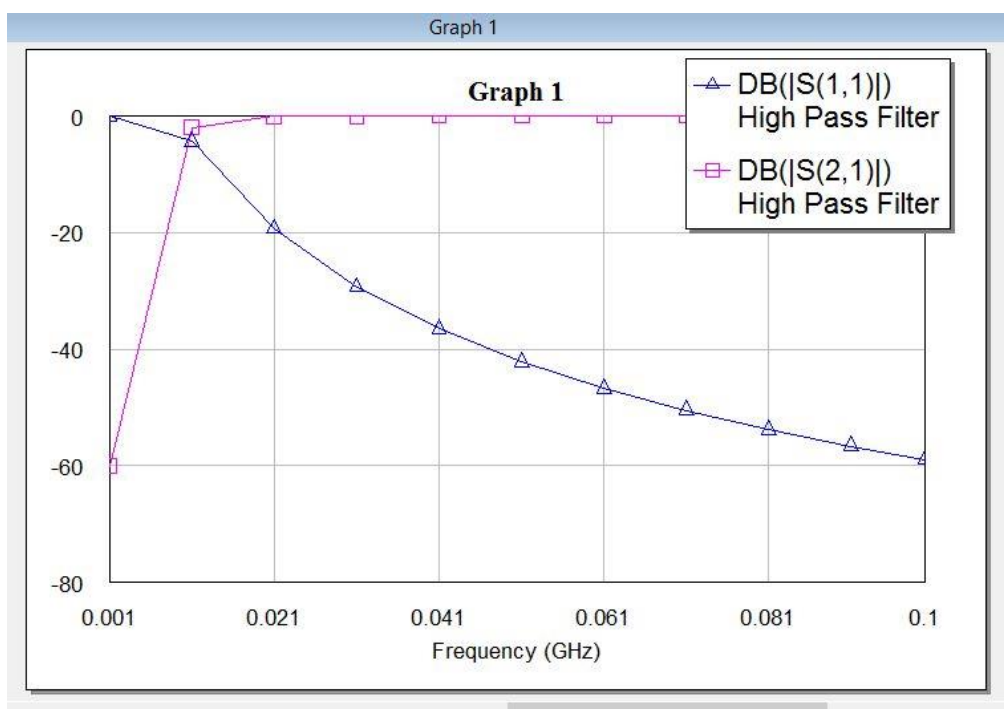


Рисунок 3.24 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.25 показано схему смугового фільтра, а на рисунку 3.26 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

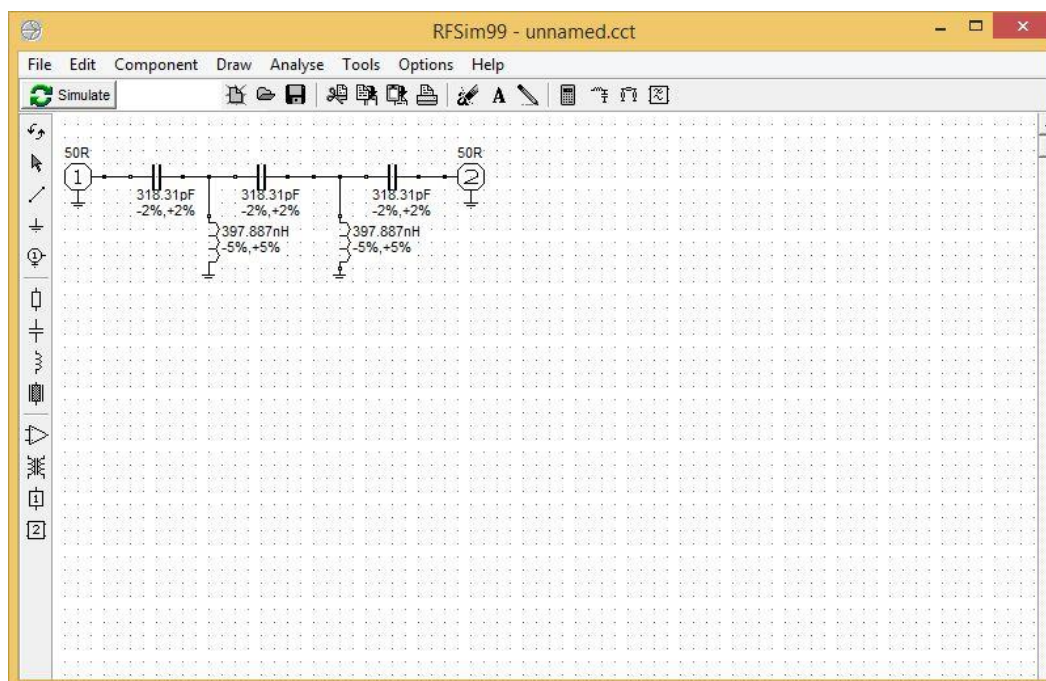


Рисунок 3.25 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

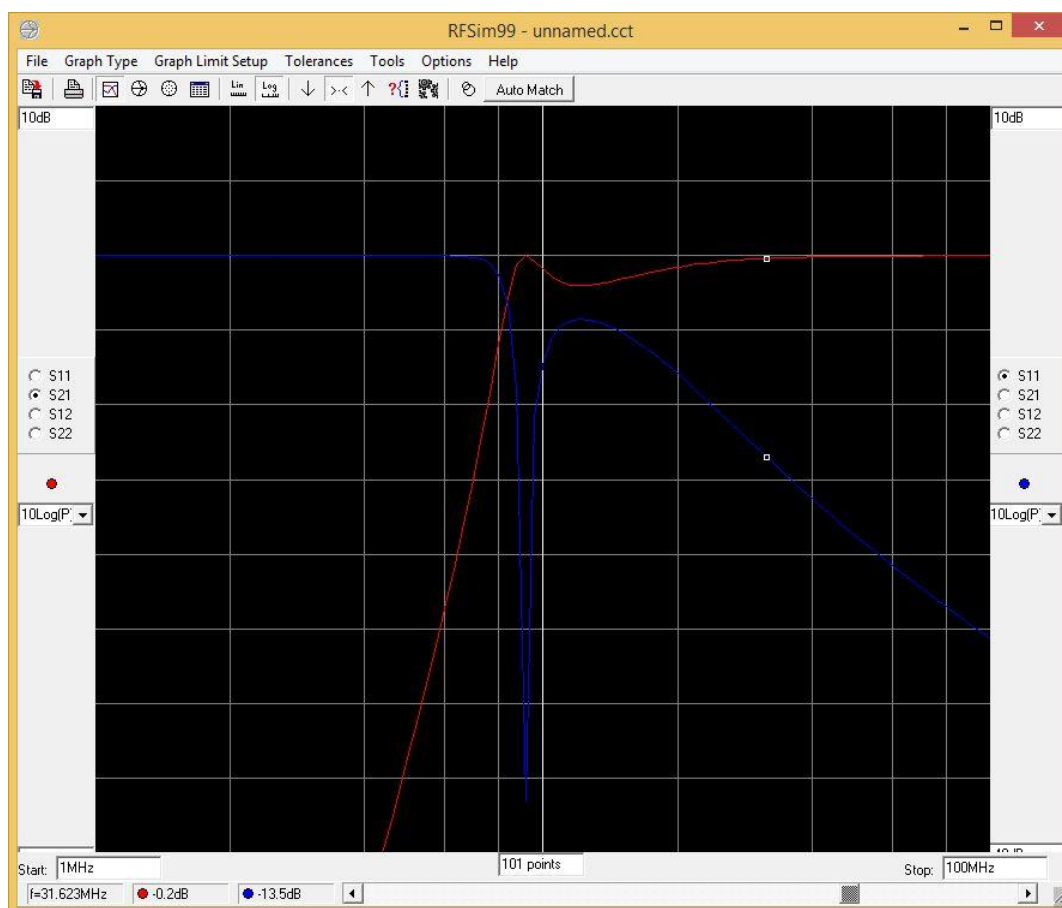


Рисунок 3.26 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.27.

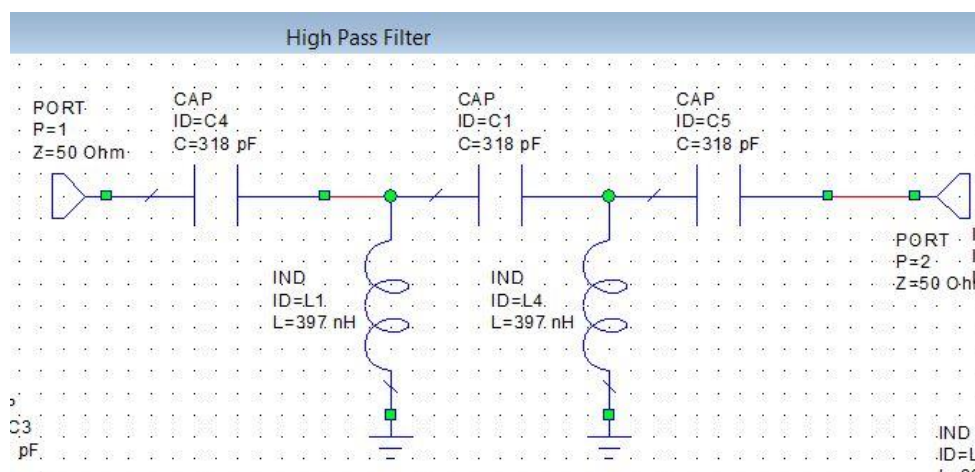


Рисунок 3.27 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.28.

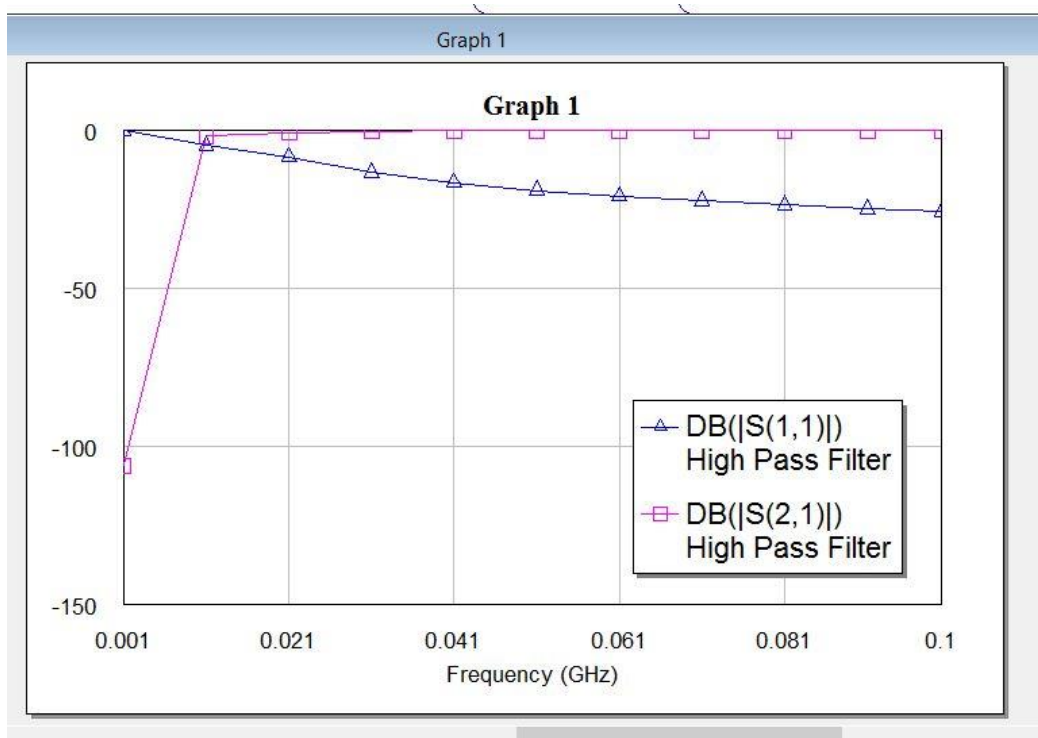


Рисунок 3.28 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.29 показано схему смугового фільтра, а на рисунку 3.30 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

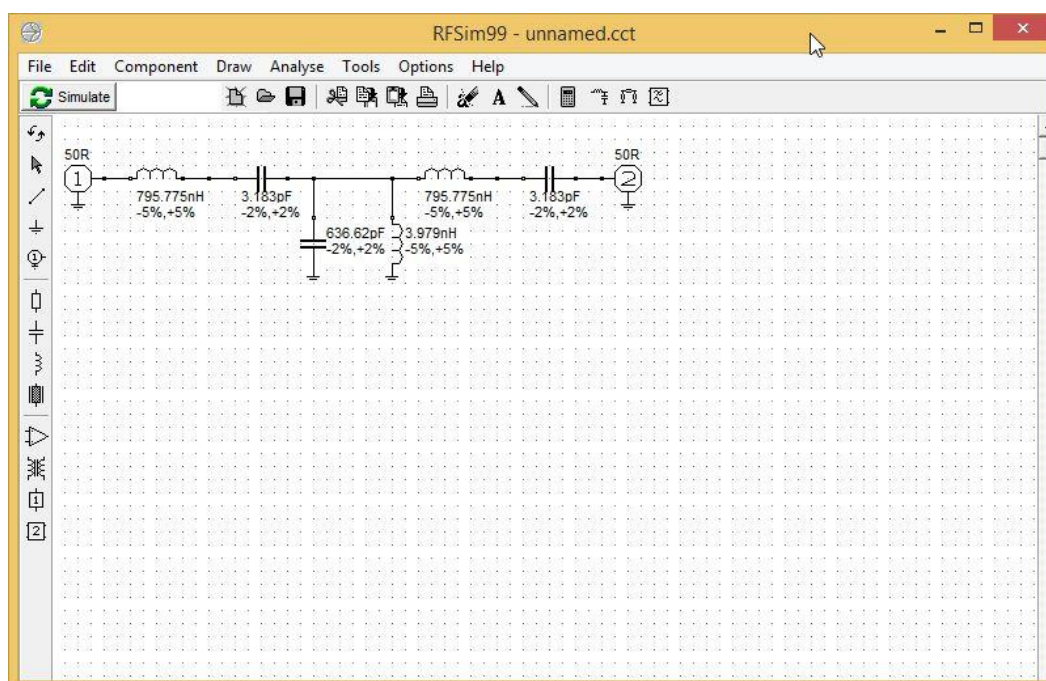


Рисунок 3.29 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

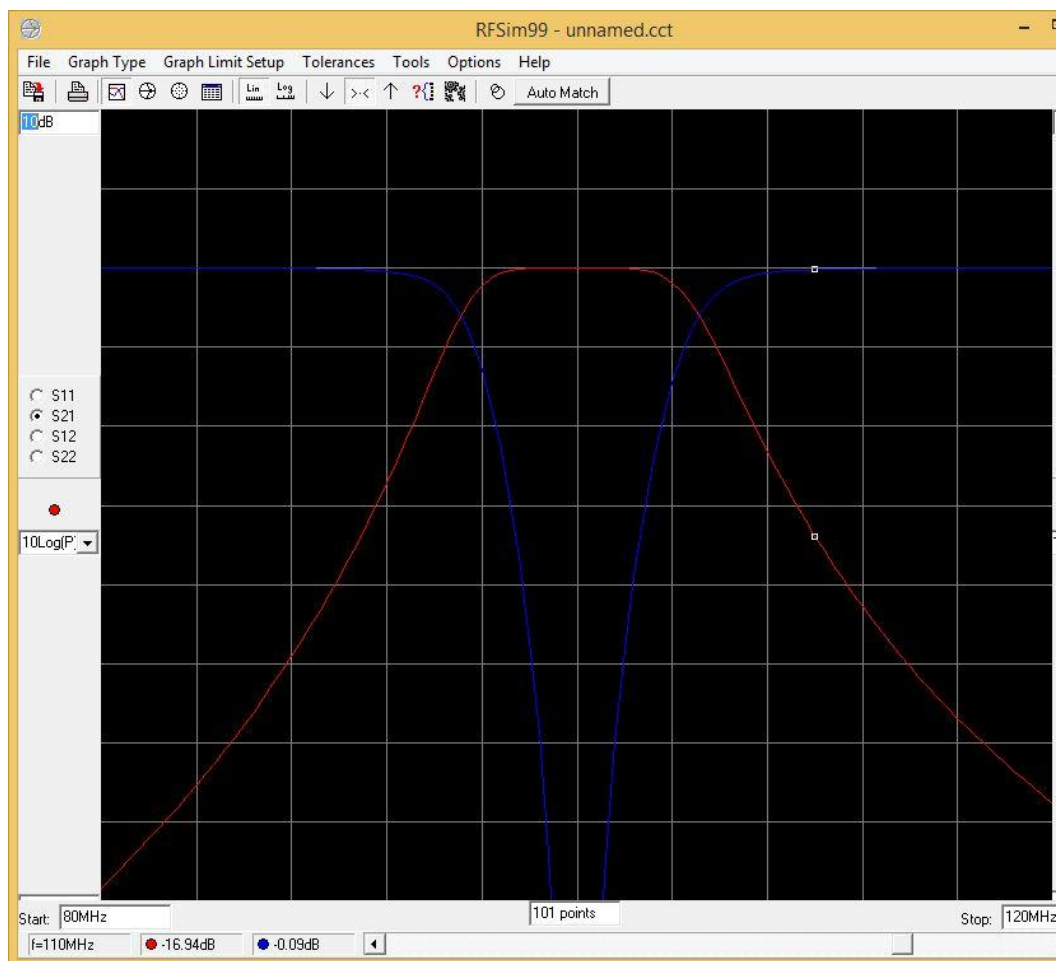


Рисунок 3.30 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.31.

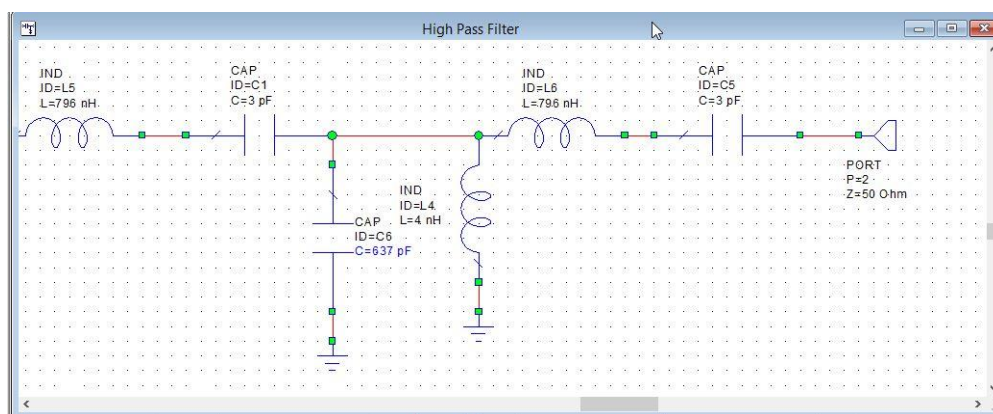


Рисунок 3.31 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.32.

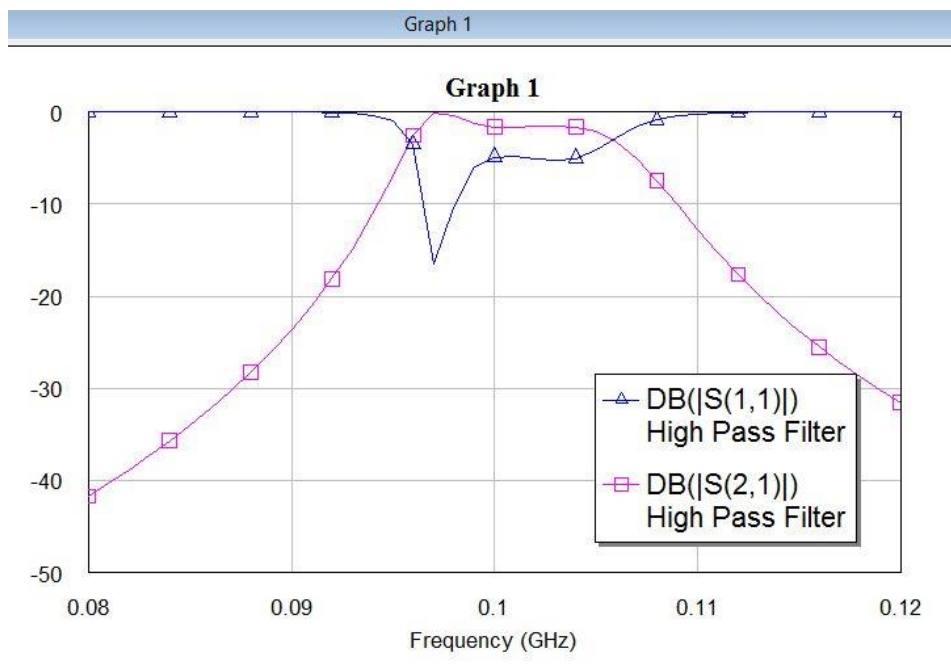


Рисунок 3.32 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.33 показано схему смугового фільтра, а на рисунку 3.34 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

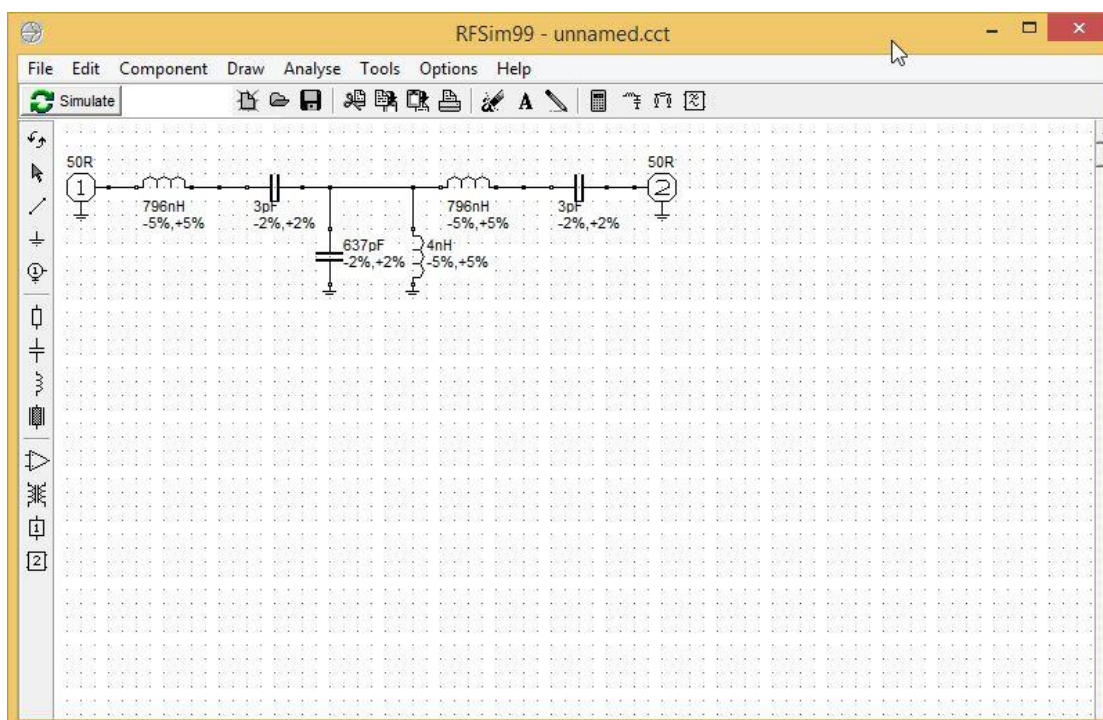


Рисунок 3.33 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

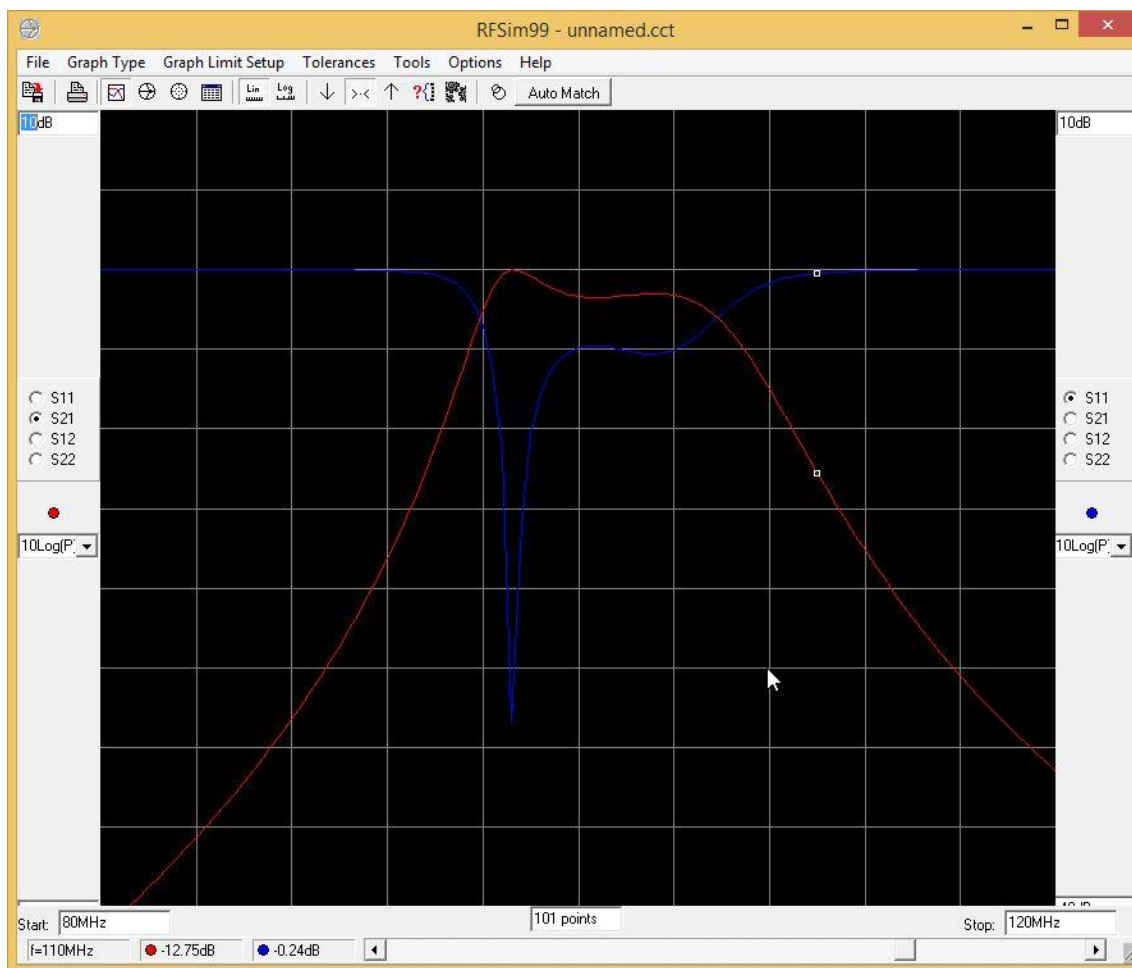


Рисунок 3.34 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.35.

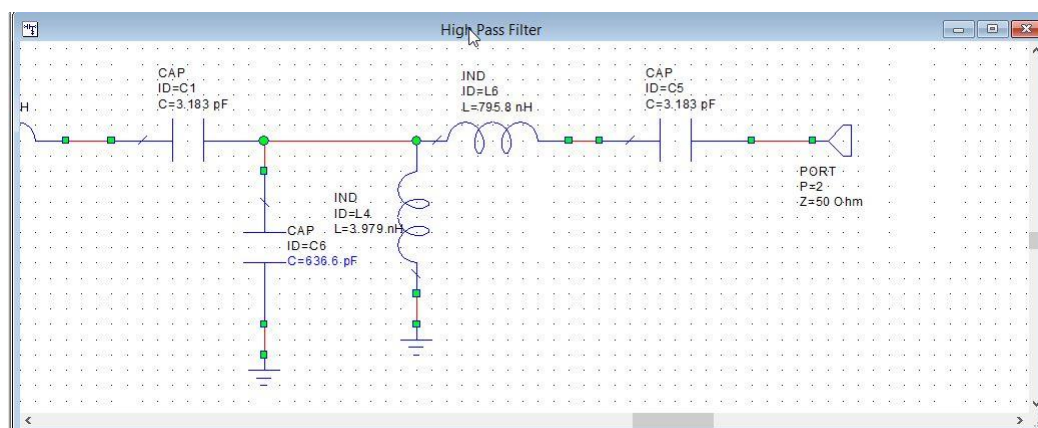


Рисунок 3.35 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.36.

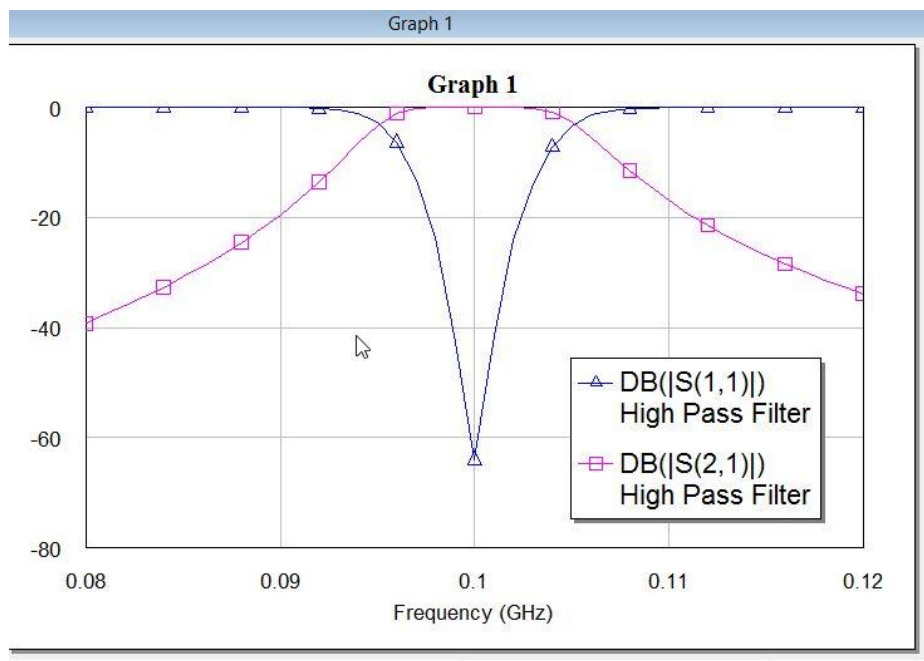


Рисунок 3.36 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.37 показано схему смугового фільтра, а на рисунку 3.38 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

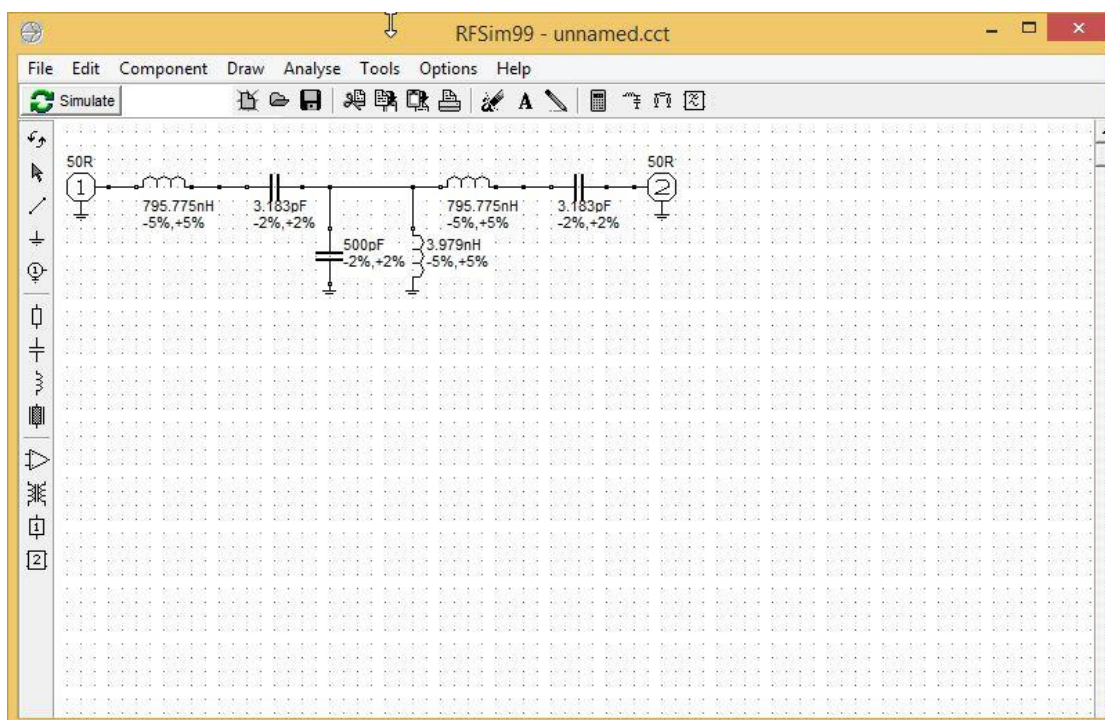


Рисунок 3.37 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

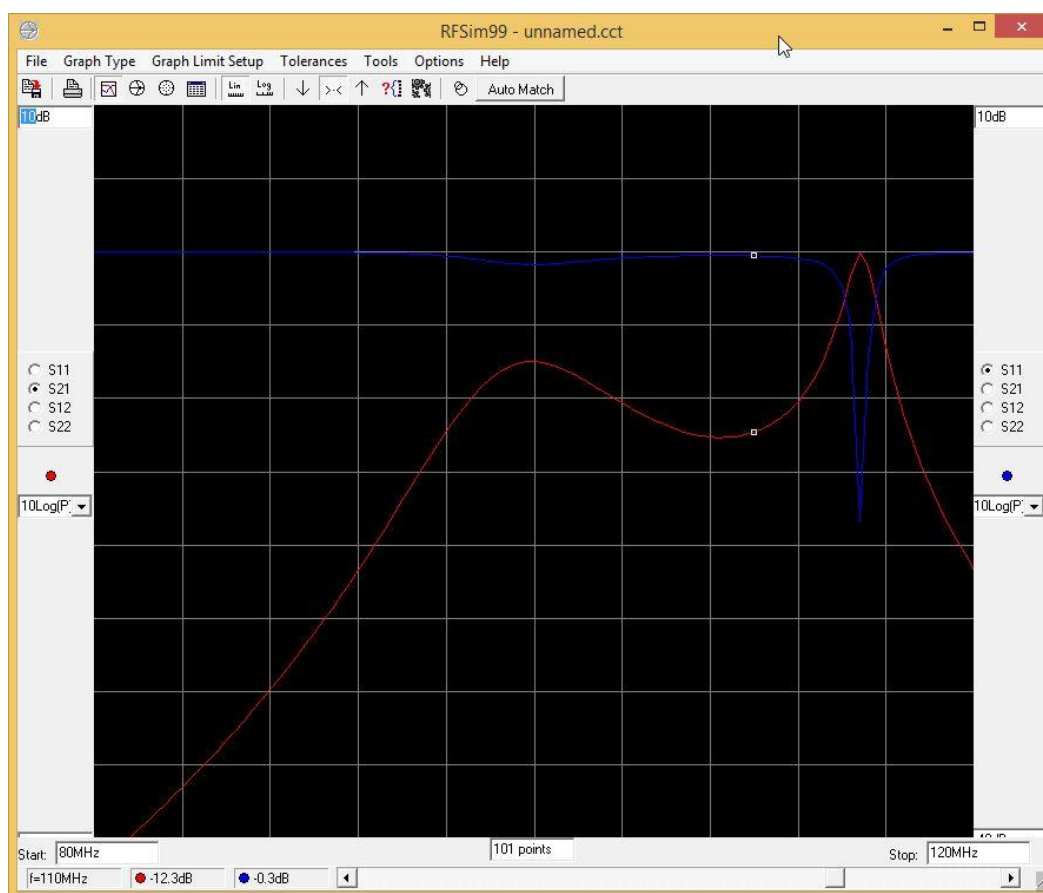


Рисунок 3.38 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

На рисунку 3.39 показано схему смугового фільтра, а на рисунку 3.40 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

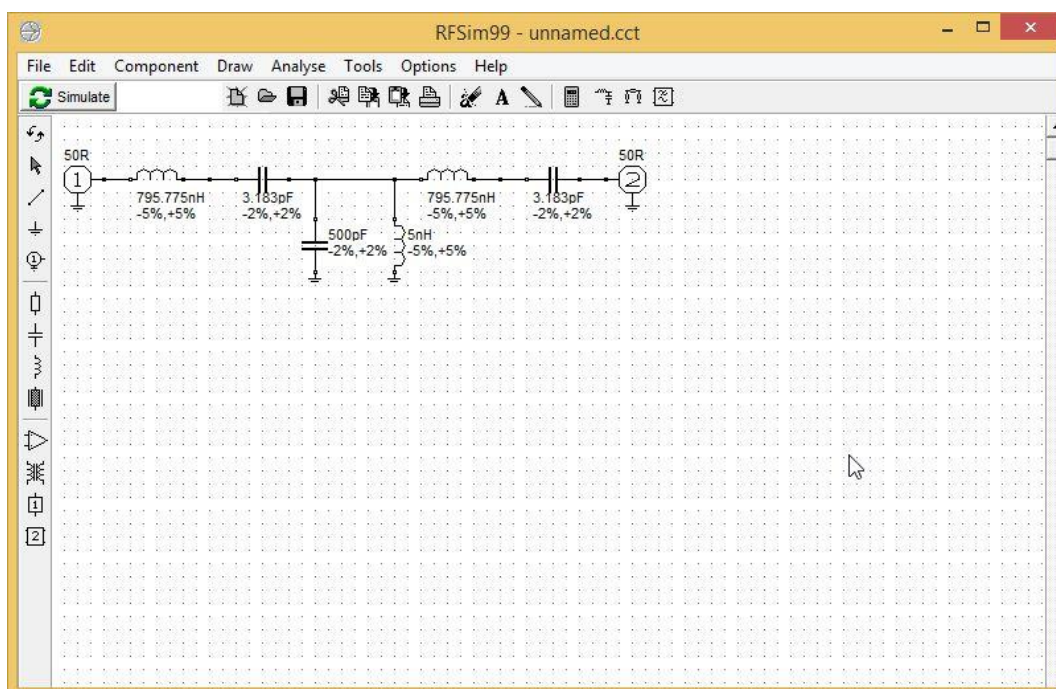


Рисунок 3.39 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

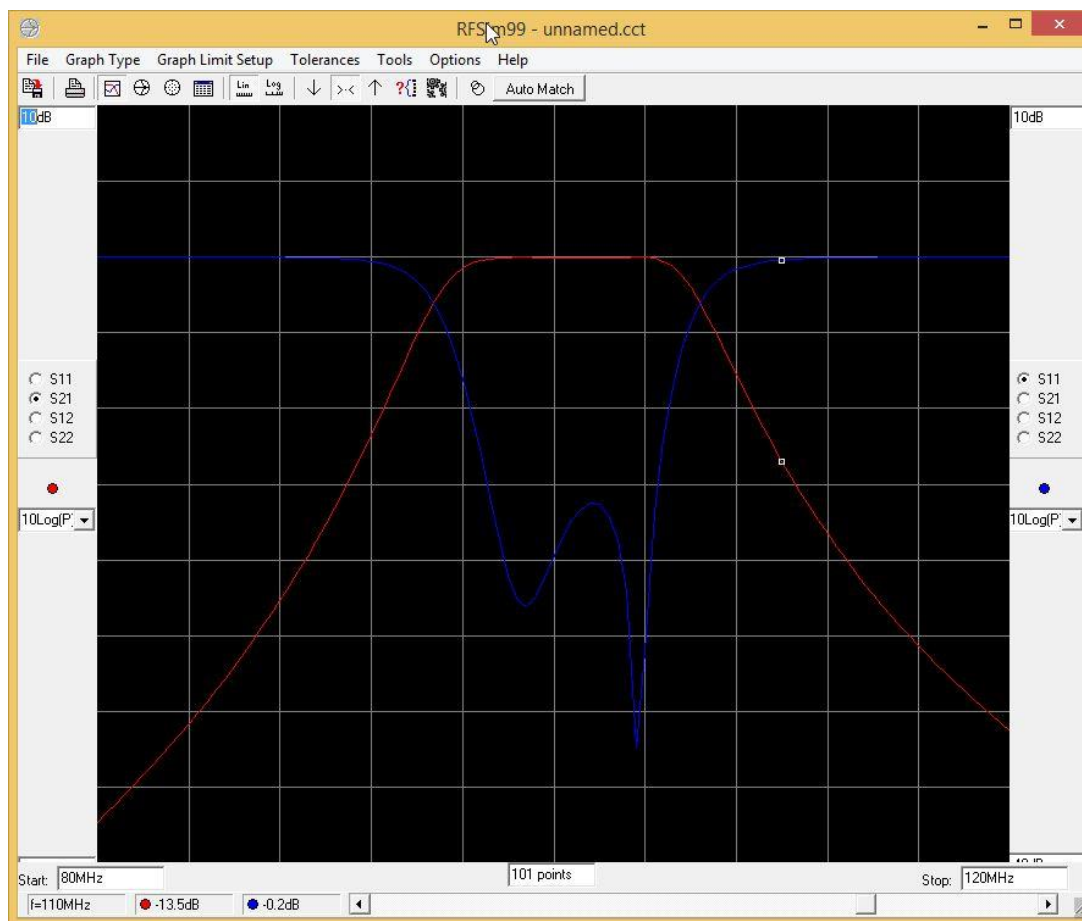


Рисунок 3.40 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.41.

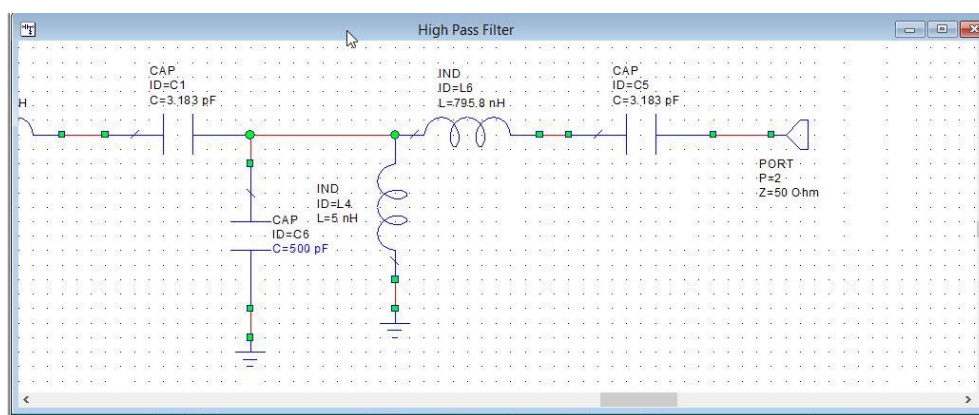


Рисунок 3.41 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.42.

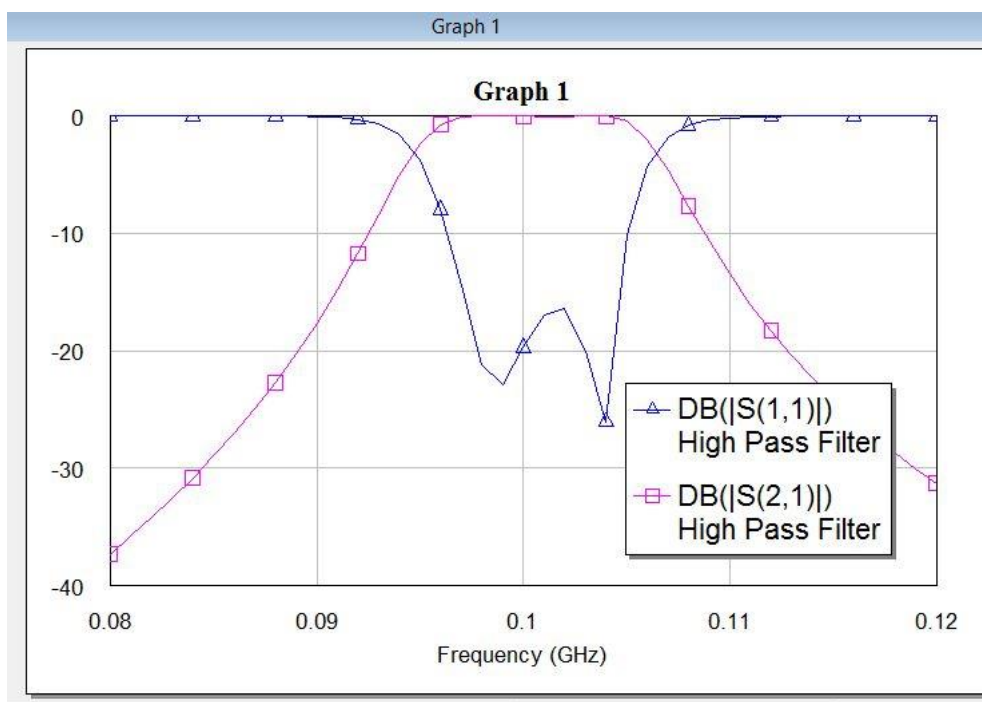


Рисунок 3.42 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO

На рисунку 3.43 показано схему смугового фільтра, а на рисунку 3.44 – його АЧХ та модуль коефіцієнта відбиття.

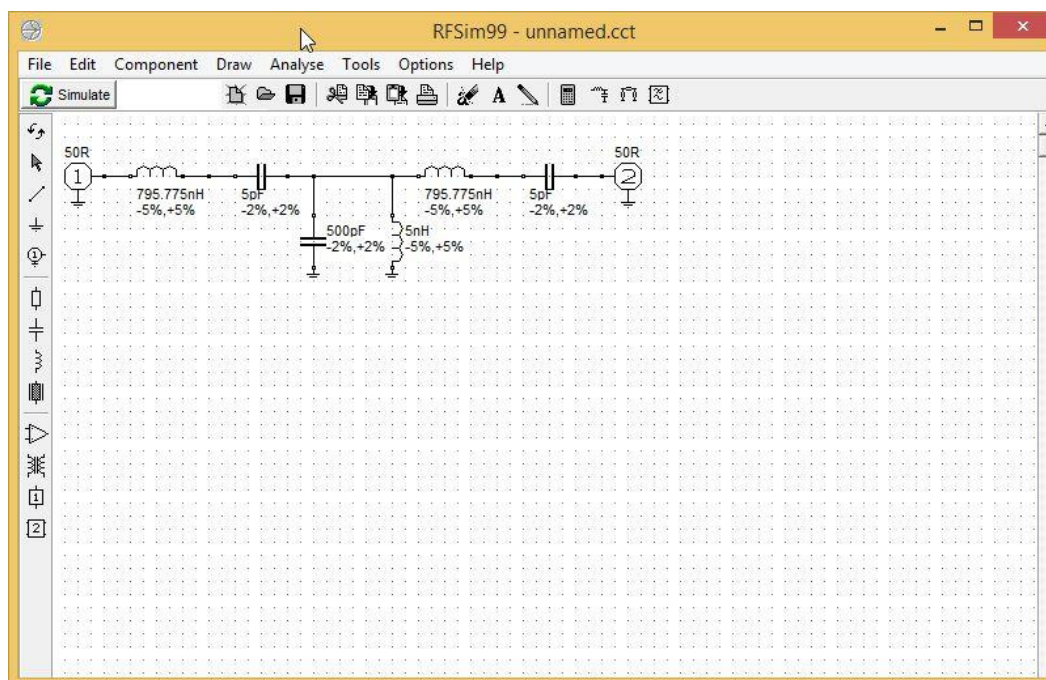


Рисунок 3.43 – Вигляд схеми фільтра у програмі RFSim99

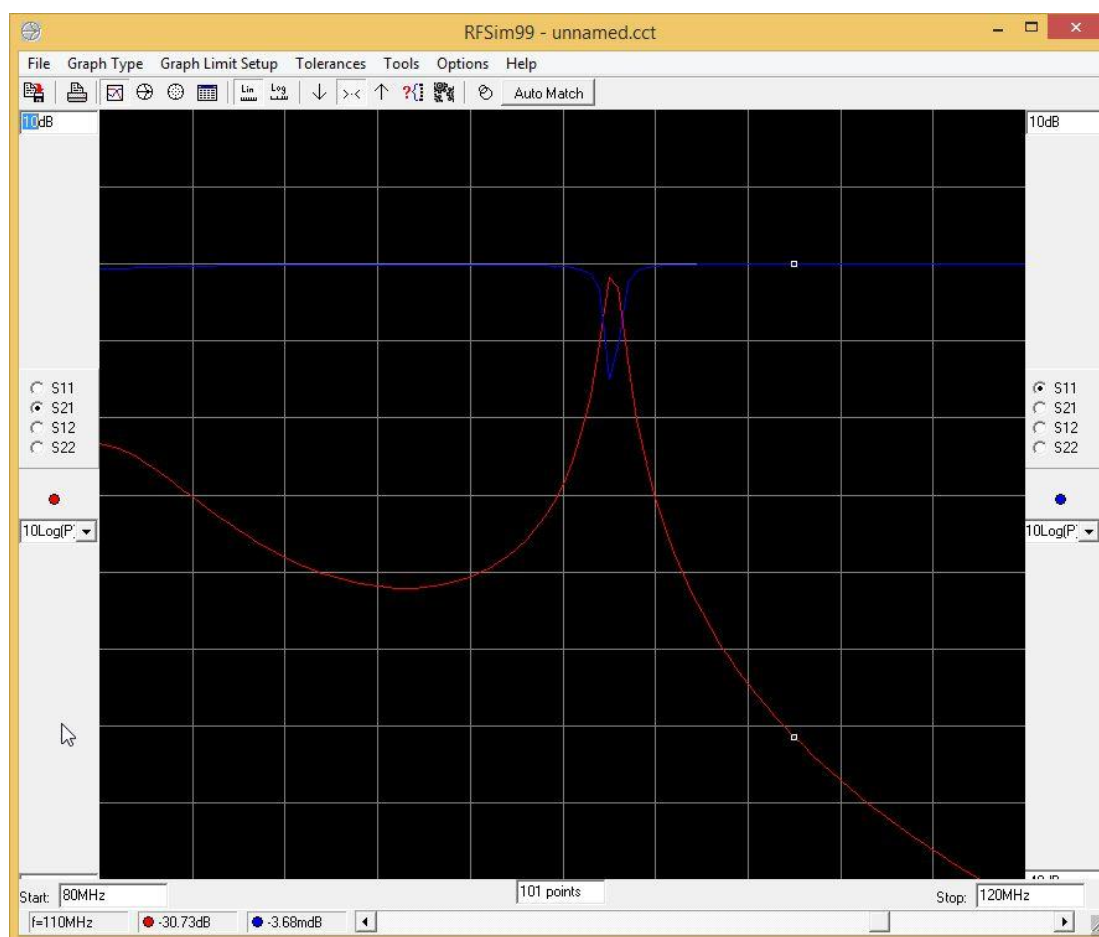


Рисунок 3.44 – Результати аналізу фільтра за допомогою RFSim99

Вигляд схеми цього ж фільтра у програмі MWO показано на рисунку 3.45.

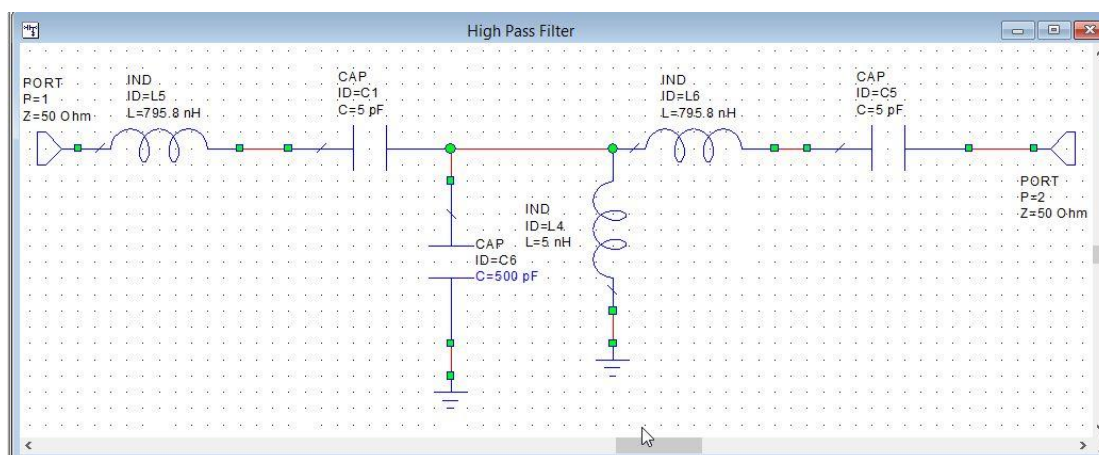


Рисунок 3.45 – Вигляд схеми фільтра у програмі MWO

Результати його аналізу у програмі MWO показано на рисунку 3.10

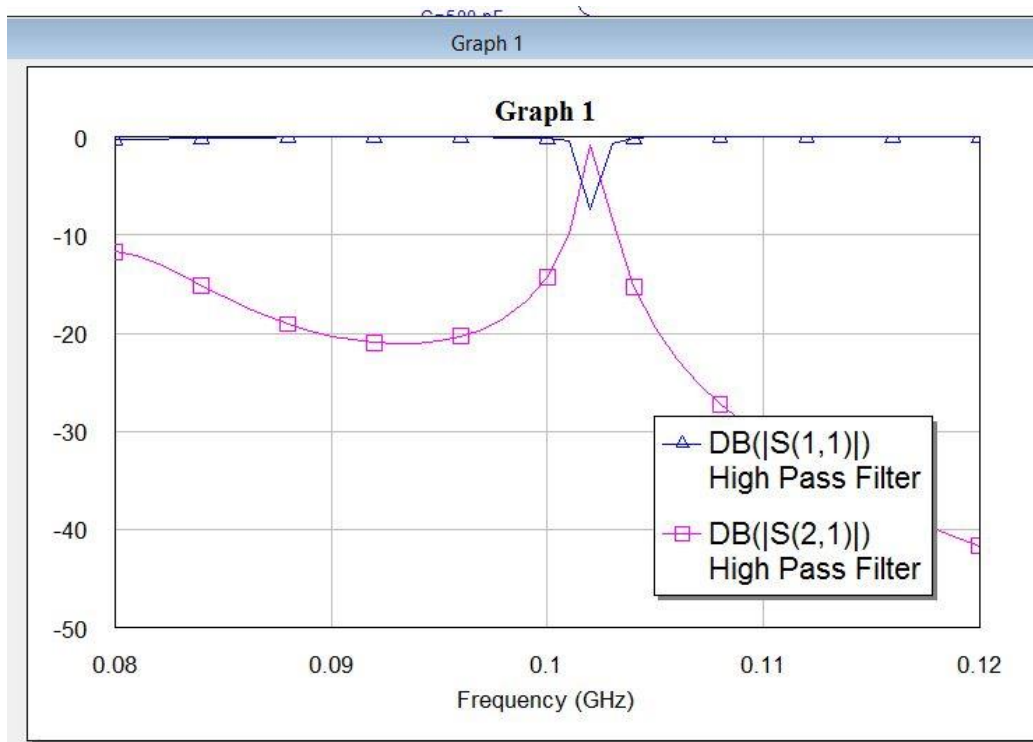


Рисунок 3.46 – Результати аналізу фільтра за допомогою MWO
Зіставлення наведених результатів вказує на їхню гарну збіжність.

Отже, робимо висновок про те, що для задачі проектування частотного фільтра на зосереджених елементах можна використовувати програму RFSim99.

ВИСНОВКИ

У розділі досліджено коректність отримуваних у програмі RFSim99 результатів щодо проектування частотних фільтрів на зосереджених елементах.

Для цього промодельовано у RFSim99 та MWO серію фільтрів нижніх і верхніх частот, а також смугових фільтрів у різних смугах частот.

Зіставлення цих результатів показало їхню гарну збіжність. Таким чином, для задачі проектування частотного фільтра на зосереджених елементах можна використовувати програму RFSim99.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто класичний алгоритм проектування частотних фільтрів, його реалізацію на низці сучасних програмних продуктів. Також проведено короткий порівняльний аналіз цих програм.

Розглянуто ключові елементи інтерфейсу програми RFSim99, а також проектування у ній частотних фільтрів з використанням їхніх вбудованих схемних рішень.

Досліджено коректність отримуваних у програмі RFSim99 результатів щодо проектування частотних фільтрів на зосереджених елементах.

Для цього промодельовано у RFSim99 та MWO серію фільтрів нижніх і верхніх частот, а також смугових фільтрів у різних смугах частот.

Зіставлення цих результатів показало їхню гарну збіжність. Таким чином, для задачі проектування частотного фільтра на зосереджених елементах можна використовувати програму RFSim99.

Мету роботи досягнуто.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Filter design tool. Analog Filter Wizard [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tools.analog.com/en/filterwizard/>
2. Filter Design Tool [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-response>
3. Dassault Systèmes [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.3ds.com/>
4. Ansys-HFSS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.
5. Altair FEKO 2021. User Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://2021.help.altair.com/2021/feko/pdfs/Altair_Feko_User_Guide.pdf
6. AWR Microwave Office [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html
7. QucsStudio [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://qucsstudio.de/>.
8. RFSim99 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://us5msq.com.ua/rfsim99-programma-dlya-modelirovaniya-i-analiza-radiocheskix-cepej/>