

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки і комп'ютерних систем
Кафедра прикладної електродинаміки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Микола ГОРОБЕЦЬ

«___» _____ 20__ року

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: РОЗРОБКА ФІЛЬТРУ ДЛЯ ДІАПАЗОНУ УЛЬТРАКОРОТКИХ
ХВИЛЬ

Виконав: студент VI курсу, групи РР-67

Спеціальності

105 – прикладна фізика та наноматеріали



Іван БІЛИЙ

Керівник: доцент кафедри прикладної
електродинаміки



Вадим ПЛАХТІЙ

Харків – 2024 рік

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить 43 рисунки, 46 сторінки, 23 бібліографічних посилань.

Розглянуті варіанти радіочастотних фільтрів для діапазону ультракоротких хвиль.

Були змодельовані, спроектовані та виготовлені три зразки фільтрів, два були побудовані на радіокомпонентах, третій був спроектований та виготовлений у вигляді мікросмужкової плати.

Детально описаний процес виміру величини індуктивностей в УКХ діапазоні за допомогою векторного аналізатора.

Продемонстрований процес калібровки векторного аналізатора LiteVNA для вимірювання комплексних параметрів S_{11} та S_{12} .

РАДІОЧАСТОТНИЙ ФІЛЬТР, МІКРОСМУЖКОВИЙ ФІЛЬТР,
ВЕКТОРНИЙ АНАЛІЗАТОР, ФІЛЬТР УЛЬТРАКОРОТКИХ ХВИЛЬ

ABSTRACT

The diploma project contains 43 figures, 46 pages, 23 bibliographic references.

Variants of radio frequency filters for the UHF band are considered.

Three filter samples were modeled, designed and manufactured, two were built on radio components, the third was designed and manufactured in the form of a microstrip pcb.

The process of measuring the magnitude of inductances in the VHF range using a vector analyzer is described in detail.

The process of calibrating the LiteVNA vector analyzer for measuring the complex parameters S11 and S12 is demonstrated.

RADIO FREQUENCY FILTER, MICROSTRIP FILTER, VECTOR ANALYZER, ULTRASHORT WAVE FILTER

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
1. Вступ	5
Технології виготовлення	7
2. Методи розрахунку фільтрів УКХ хвиль	18
3. LC-фільтри діапазону Ультракоротких хвиль	21
3.1. Визначення величини індуктивностей на необхідній частоті	21
3.2. Методологія вимірювання фільтрів за допомогою векторного аналізатора	26
3.3. Розробка та виготовлення LC-фільтру другого порядку	29
3.4. Розробка та виготовлення LC-фільтру четвертого порядку	33
4. interdigital фільтр укх діапазону хвиль.....	38
4.1. Постановка задачі	38
4.2. Моделювання в електромагнітному симуляторі	39
4.3. Виготовлення та результати експериментів	39
5. Висновки	43
ЛІТЕРАТУРА.....	44

1. ВСТУП

Фільтри діапазону ультракоротких хвиль (УКХ) є критично важливими компонентами у радіотехнічних і телекомунікаційних системах. Вони забезпечують селекцію сигналів у певному частотному діапазоні, що дозволяє уникнути перешкод і покращити якість передачі інформації.

В основі своїй фільтри поділяються на смугові, низькочастотні, високочастотні та режекторні. Смугові фільтри забезпечують пропуск сигналів у визначеному частотному діапазоні.

Методи синтезу фільтрів

Синтез фільтрів — це процес розробки електричних схем, які забезпечують задані частотні характеристики. Існує кілька основних методів синтезу фільтрів, кожен з яких має свої особливості та застосування [1], [2].

1. Класичний синтез LC-фільтрів

Цей метод передбачає використання індуктивностей (L) та ємностей (C) для створення фільтрів різних типів: низькочастотних, високочастотних, смугових та загороджувальних. Процес починається з визначення бажаної частотної характеристики, після чого обирається відповідна апроксимаційна функція, така як Чебишевська або Баттерворта. Далі, на основі цієї функції розраховуються номінали компонентів схеми, що реалізують потрібну характеристику.

2. Синтез фільтрів за допомогою матриці зв'язків

Цей підхід застосовується для вузькосмугових фільтрів, які використовують зв'язані резонатори. Основна ідея полягає у визначенні матриці зв'язків між резонаторами та їхніх резонансних частот. Ця матриця описує, як енергія передається між резонаторами, що дозволяє контролювати частотну

характеристику фільтра. Метод широко використовується в проектуванні фільтрів для радіочастотних та мікрохвильових застосувань.

3. Синтез фільтрів з розподіленими елементами

Цей метод застосовується для широкосмугових фільтрів, де розміри компонентів порівнянні з довжиною хвилі сигналу. В таких випадках використовуються розподілені елементи, такі як відрізки ліній передачі. Синтез здійснюється за допомогою перетворення Річардса, яке дозволяє замінити зосереджені елементи на еквівалентні розподілені структури.

4. Чисельні методи оптимізації

Ці методи використовуються для точного налаштування параметрів фільтра з метою досягнення оптимальних характеристик. Застосовуються алгоритми оптимізації, такі як градієнтний спуск, генетичні алгоритми або метод рою частинок. Вони дозволяють знаходити оптимальні значення параметрів фільтра, мінімізуючи похибки та покращуючи загальну продуктивність.

Параметри фільтрів

Основні характеристики, такі як добротність, крутизна спадання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), ширина смуги пропускання та коефіцієнт загасання.

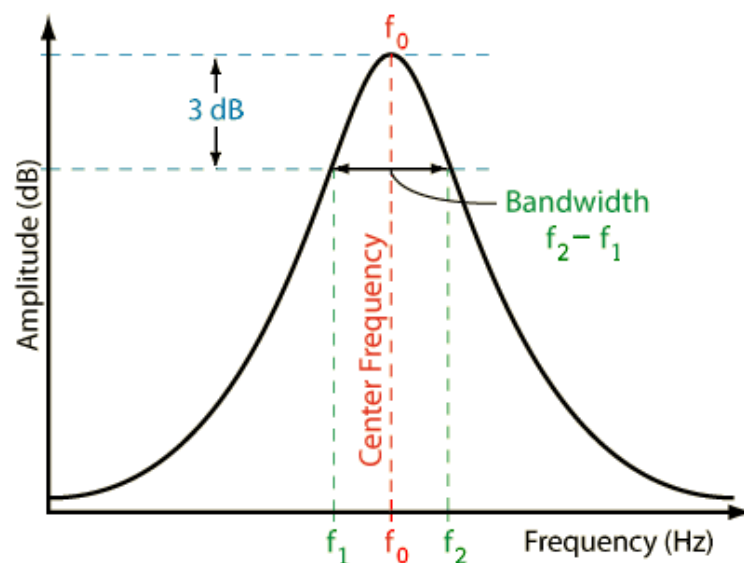


Рисунок 1 – Основні параметри фільтрів [3]

Технології виготовлення

Мікросмушкові фільтри

Мікросмушкові фільтри широко використовуються в радіочастотній техніці завдяки компактності, легкості інтеграції та хорошим електричним характеристикам. Вони базуються на використанні мікросмужкових ліній передачі, які створюють певний розподіл електромагнітних полів на платі. Мікросмушкові фільтри працюють на основі розподілених параметрів, що означає, що електричні властивості розподілені по довжині ліній передачі. Їх частотна вибірковість досягається завдяки специфічному розташуванню та геометрії мікросмужкових елементів. Смуга пропускання визначається резонансними частотами, що залежать від довжини, ширини, діелектричної проникності підкладки та товщини провідників. Мікросмушковий фільтр виготовляється на діелектричній підкладці, яка має металевий шар, що формує провідники [4].

Наведемо приклади мікросмужкових фільтрів.

Відкриті або закорочені **Stub фільтри**, які додають до смужки з сигналом додаткові відрізки довгих ліній, які є відкритими або закороченими на землю на кінці. Це можуть бути просто відрізки коаксіального дроту. Тут представлений її мікросмужковий варіант.

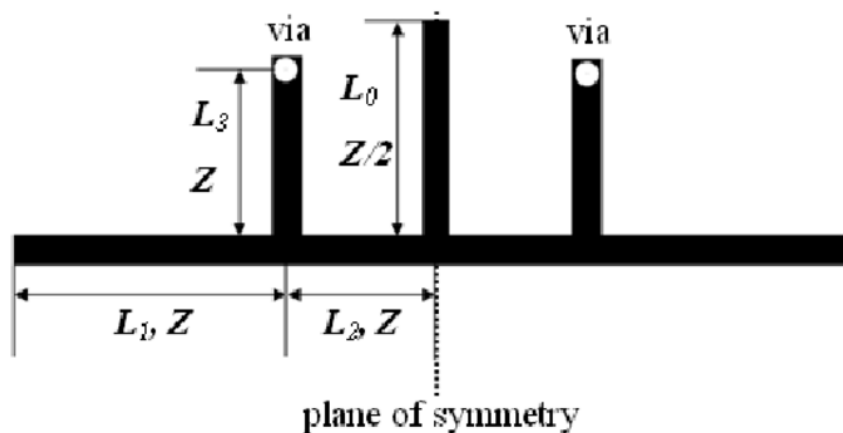


Рисунок 2 – Приклад реалізації мікросмушкового Stub фільтру [5]

Тут зображена їх еквівалентні схеми:

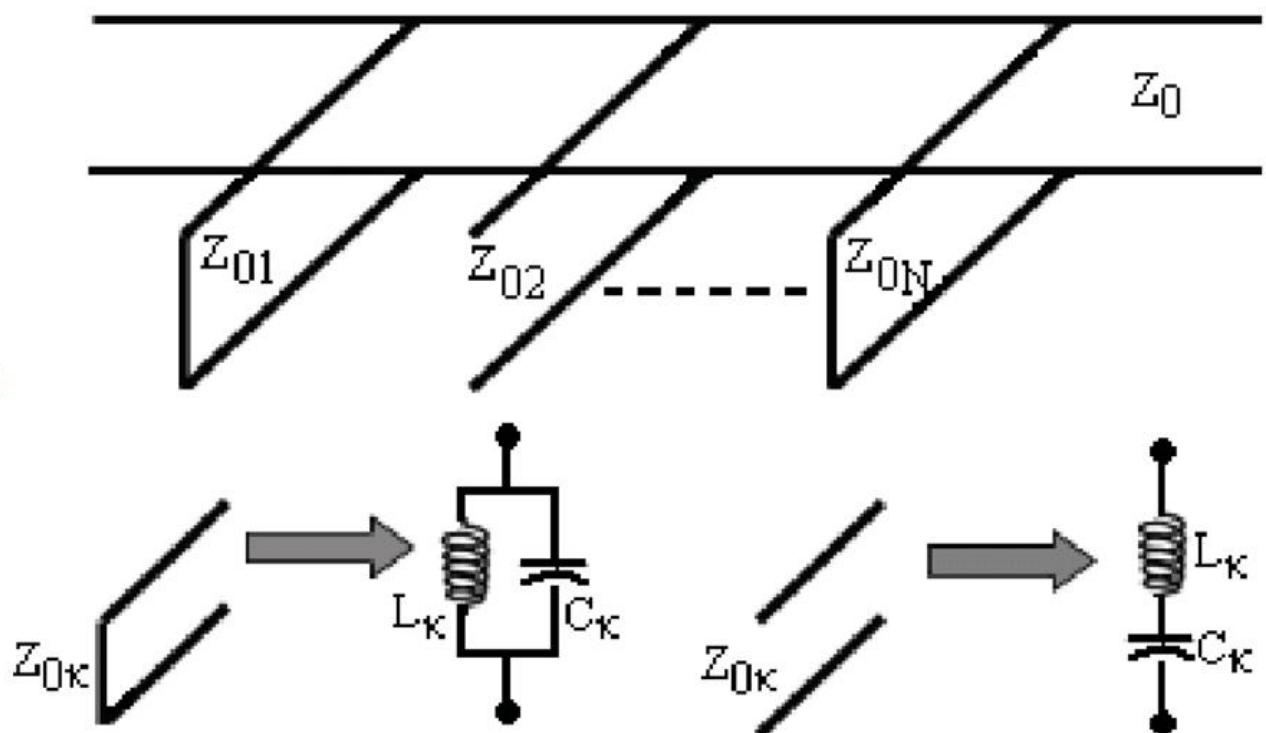


Рисунок 3 – Їх еквівалентна схема з точки зору довгих ліній [6]

Stepped-impedance фільтри, або фільтри зі змінним імпедансом, є популярним типом мікросмужкових фільтрів, які використовують чергування секцій мікросмужкових ліній із високим та низьким характерним імпедансом. Цей підхід дозволяє створювати ефективні фільтраційні характеристики для низькочастотних, високочастотних або смужкових фільтрів. Принцип роботи таких фільтрів базується на зміні швидкості поширення хвиль у різних секціях ліній, що створює необхідний частотний відгук. Завдяки своїй простій конструкції, компактності та можливості налаштування параметрів, Stepped-impedance фільтри широко застосовуються у високочастотних і надвисокочастотних системах, таких як радіозв'язок, радіолокація та мікрохвильові пристрої. Приклад такого продемонстровано нижче (рис), де в середовищі Matlab можна розрахувати його частотні характеристики.

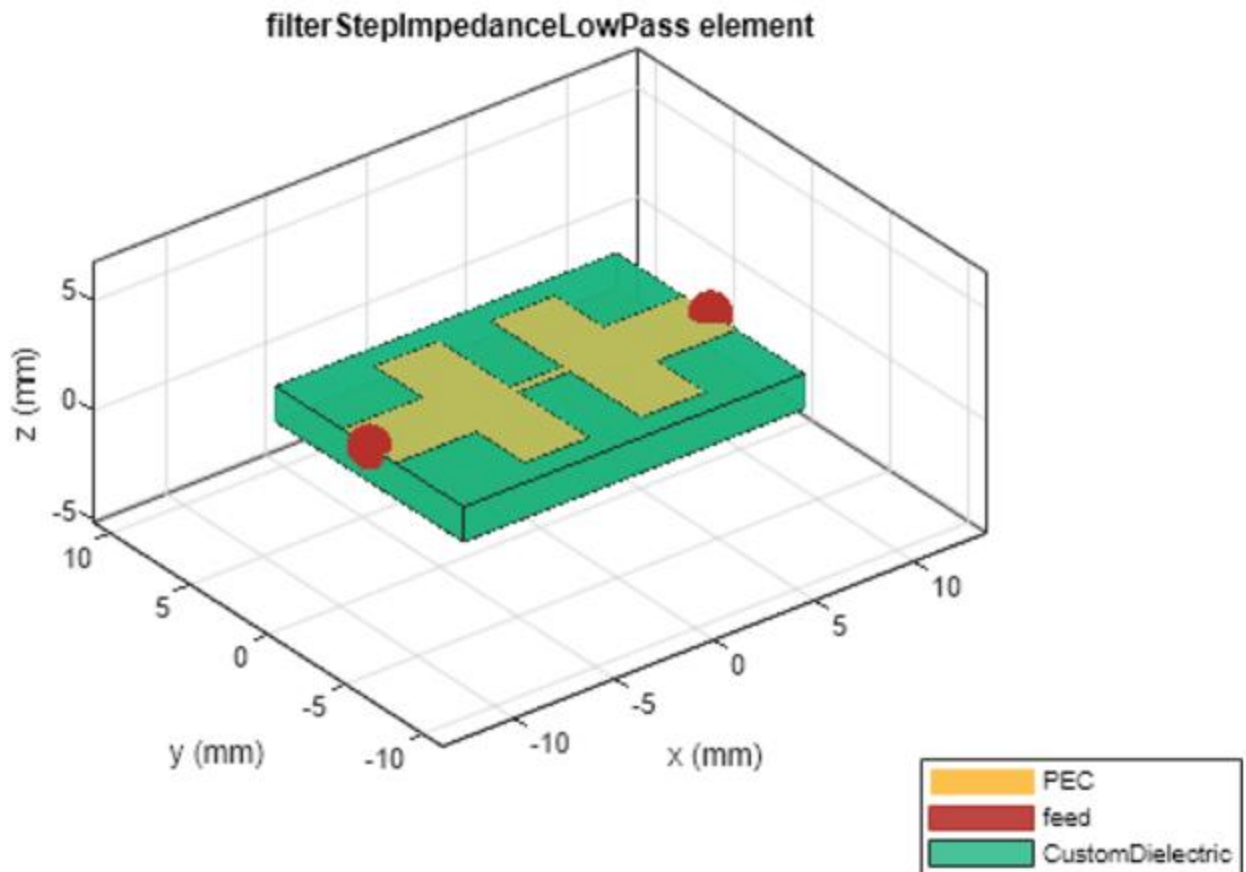


Рисунок 4 – Приклад фільтру зі змінним імпедансом змодельованим в середовищі програмування Matlab [7]

Interdigital фільтри — це різновид смугових фільтрів, які використовують конструкцію з чергуванням паралельних резонаторів, розташованих на однаковій відстані один від одного. Кожен резонатор підключений до заземлення з одного кінця, а з іншого — відкритий, що забезпечує їхню взаємодію через електромагнітне поле. Така структура дозволяє досягти високої вибіркової та компактності, що робить ці фільтри ідеальними для роботи в системах із суворими вимогами до розмірів та характеристик.

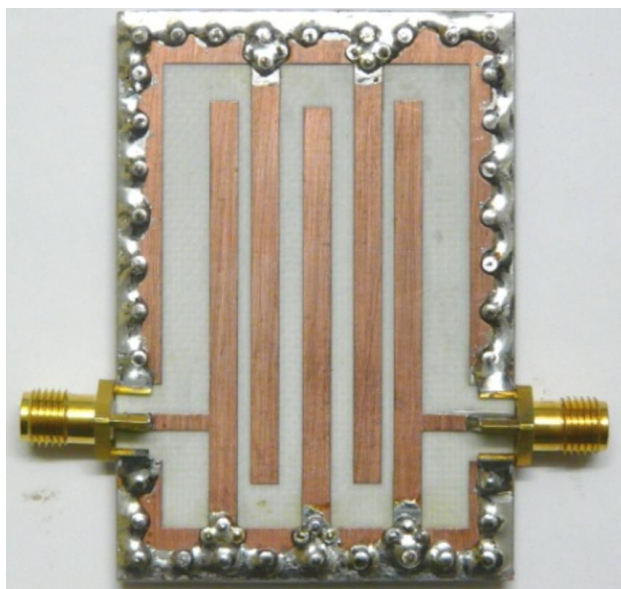


Рисунок 5 Приклад Interdigital фільтра [8]

Comblіne фільтри — це смугові фільтри, які побудовані на основі паралельних резонаторів із короткозамкнутими кінцями. Такі фільтри зазвичай мають компактну конструкцію, оскільки довжина резонаторів значно менша за чверть довжини хвилі. Їхні частотні характеристики регулюються за рахунок зміни розмірів резонаторів, відстані між ними та додаванням ємнісних елементів.

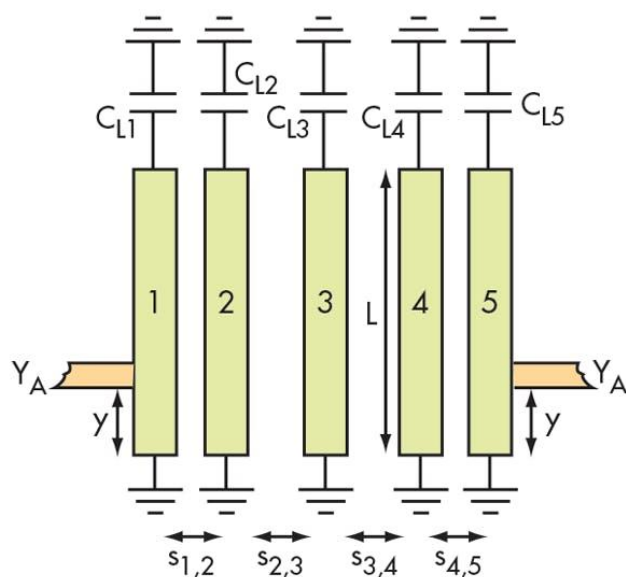


Рисунок 6 – Приклад Comblіne фільтра[9]

Edge-cut фільтри — це тип мікросмужкових фільтрів, у яких резонатори створюються за допомогою ліній, що мають зріз на своїх краях. Ця конструкція дозволяє досягти високої ефективності при компактних розмірах, оскільки надає можливість точного налаштування фільтраційних характеристик

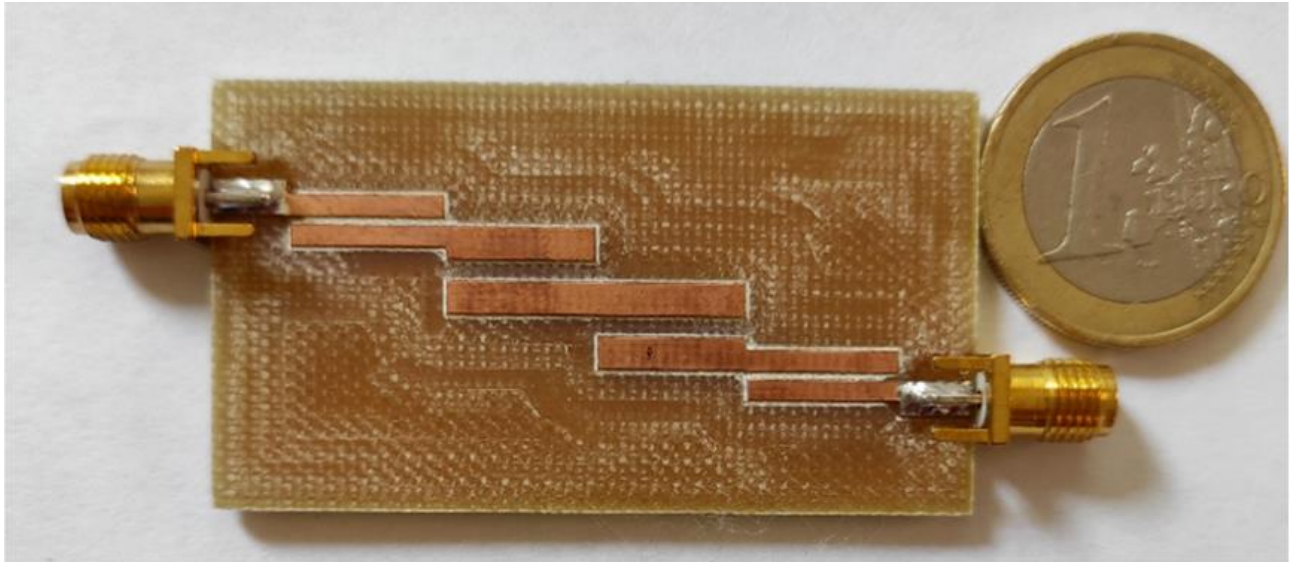


Рисунок 7 – Приклад Edge-cut фільтра [10]

Hairpin фільтри — це тип фільтрів, які мають конструкцію, що нагадує форму шпильки для волосся, звідси й назва. Вони складаються з єдиної лінії резонатора, який має вигин, що дозволяє зменшити загальну довжину елемента при збереженні необхідних фільтраційних характеристик. Така конфігурація забезпечує високу ефективність фільтрації при компактних розмірах.

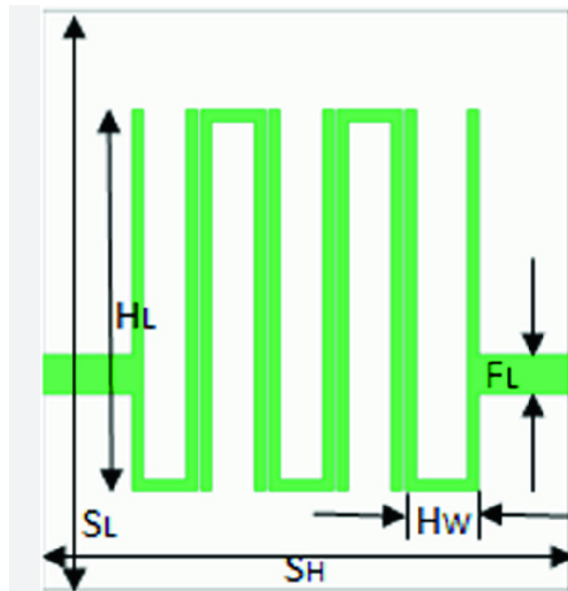


Рисунок 8 – Приклад Hairpin фільтра [11]

Фільтри на основі об'ємних резонаторів

Фільтри на основі об'ємних резонаторів є одним із ключових рішень у радіочастотній техніці, особливо коли йдеться про забезпечення високої вибіркової та стабільності характеристик. Вони працюють завдяки формуванню стоячих електромагнітних хвиль у закритих або напіввідкритих структурах, що дозволяє досягти значної добротності, а отже, ефективно фільтрувати сигнали в заданих частотних діапазонах.

Конструкція таких фільтрів зазвичай передбачає наявність резонаторів, виготовлених з металу або діелектричних матеріалів. Металеві резонатори забезпечують найменші втрати енергії завдяки високій провідності, тоді як діелектричні дозволяють зменшити розміри конструкції, зберігаючи при цьому високу механічну стабільність. Іноді ці дві технології поєднують, створюючи комбіновані резонатори, що оптимізують співвідношення між габаритами, стабільністю та втратами.

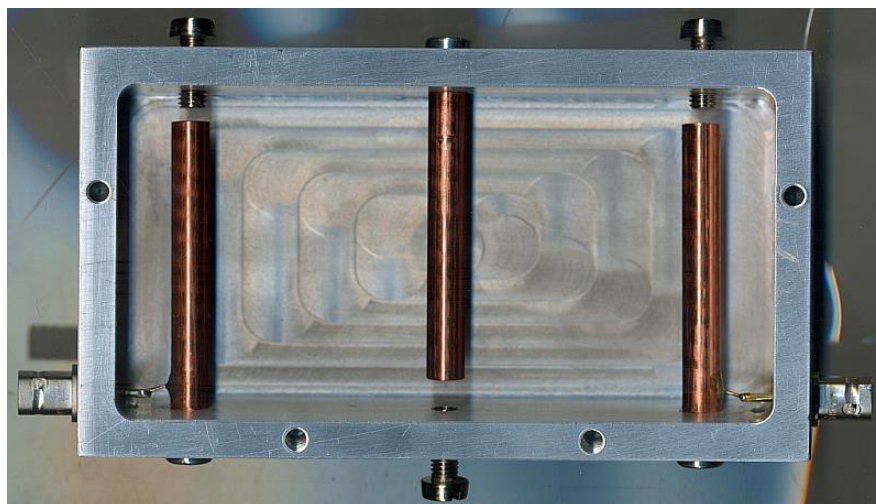


Рисунок 9 – Приклад на основі об'ємного резонатора [12]

Однією з основних переваг фільтрів з об'ємним резонансом є їхня здатність працювати в широкому частотному діапазоні — від сотень мегагерц до десятків гігагерц. Це робить їх незамінними для застосувань у радіолокації, супутниковому зв'язку, авіаційній техніці та мобільних мережах. Крім того, їхня висока добротність дозволяє досягати чудової селективності, що особливо важливо у середовищах із високим рівнем завад.

Однак не позбавлені такі фільтри й недоліків. Зокрема, їхні габарити можуть бути досить значними, що ускладнює інтеграцію в компактні пристрої. Крім того, виробництво об'ємних резонаторів вимагає використання високоякісних матеріалів і складних технологій, що підвищує їхню вартість. Незважаючи на це, об'ємні резонаторні фільтри залишаються одним із найефективніших варіантів для задач, де потрібна максимальна стабільність параметрів та робота на високих потужностях.

Проектування таких фільтрів ґрунтується на поєднанні аналітичних підходів, чисельного моделювання та експериментальної оптимізації. Для першого наближення можна скористатись калькулятором [12] Сучасні програмні засоби, такі як HFSS або CST Studio, дозволяють моделювати складні геометрії та оцінювати їхню роботу за різних умов, забезпечуючи високу точність

відповідності характеристик реальним вимогам. Таким чином, фільтри на основі об'ємних резонаторів залишаються незамінними компонентами сучасних високочастотних систем, що поєднують ефективність, стабільність та гнучкість.

Інтегровані рішення

Останнім часом все більшої популярності набувають фільтри, виготовлені на основі MEMS (мікро електромеханічних систем) [13]. **MEMS-фільтри** базуються на інтеграції механічних резонаторів і електронних компонентів на одному чипі.

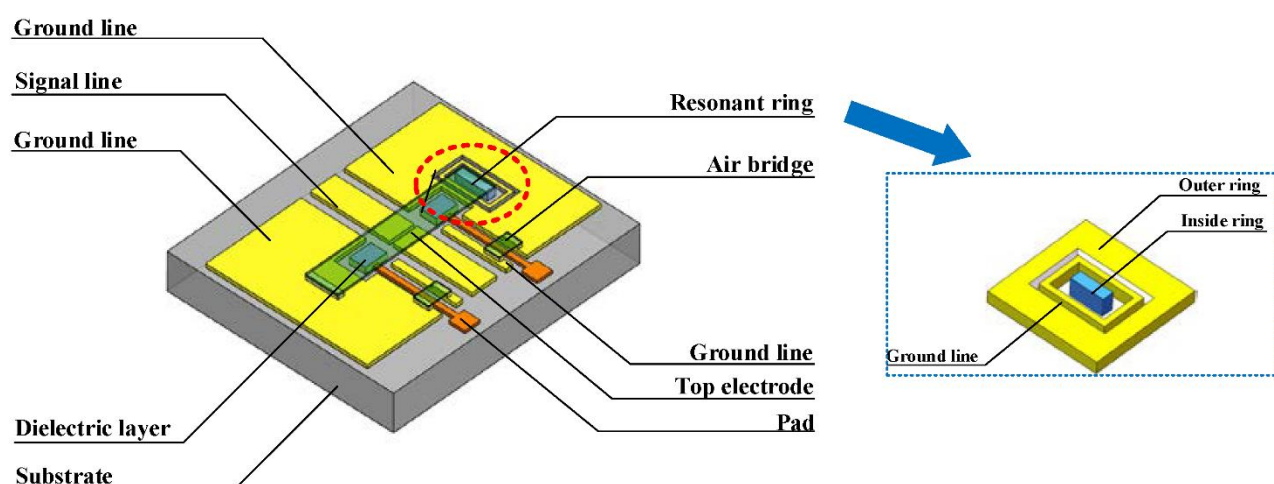


Рисунок 10 – Будова MEMS фільтру [14]

Фільтри цього типу складаються з трьох основних компонентів, кожен із яких відіграє важливу роль у забезпеченні їх функціональності. Перш за все, ключовим елементом є резонатори, які представляють собою механічні структури, здатні вібрувати на заданих частотах. Саме ці коливання визначають основні частотні характеристики фільтра. Другим важливим елементом є приводні механізми, що збуджують резонансні коливання за допомогою п'єзоелектричного або електростатичного принципу. Третій компонент — зчитувальні пристрої, які реєструють вібрації та перетворюють їх у електричний сигнал для подальшого використання.

Конструкція таких фільтрів базується на використанні кремнієвої підкладки та сучасних технологій мікрообробки, аналогічних до тих, що застосовуються у виробництві мікросхем. Завдяки цьому забезпечується надзвичайно висока точність виготовлення, що дозволяє налаштовувати резонансні частоти в широкому діапазоні — від кількох сотень мегагерц до гігагерц.

MEMS-фільтри мають цілу низку переваг у порівнянні з традиційними електромагнітними або п'єзоелектричними фільтрами. Їхні **мініатюрні розміри** дозволяють інтегрувати їх у найменші пристрої, роблячи їх ідеальними для мобільної техніки. Водночас, завдяки високій добротності, яка перевищує 10 000 у робочому частотному діапазоні, ці фільтри забезпечують мінімальні втрати сигналу. Ще однією важливою перевагою є низьке енергоспоживання, оскільки для збудження коливань застосовуються високоефективні п'єзоелектричні та електростатичні методи. Також MEMS-фільтри демонструють широкий діапазон налаштувань, що досягається завдяки можливості змінювати механічні властивості резонаторів або регулювати їх роботу за допомогою змінних напруг. Крім того, завдяки вакуумній герметизації структура цих фільтрів захищена від пилу, вологи та температурних коливань, що забезпечує стійкість до впливів середовища.

Проте, незважаючи на численні переваги, MEMS-фільтри мають і певні обмеження. Зокрема, процес їхнього виготовлення є надзвичайно складним і потребує високоточного обладнання та ретельного контролю параметрів. Крім того, механічні резонатори таких фільтрів є досить чутливими до механічних ударів, що може призводити до пошкоджень у разі сильних вібрацій або ударних навантажень. Окрім цього, висока вартість розробки та впровадження MEMS-фільтрів обмежує їх використання в недорогих пристроях, що також варто враховувати.

Таким чином, MEMS-фільтри поєднують у собі інноваційні технічні рішення та високі експлуатаційні характеристики, що робить їх ідеальним

вибором для складних і високотехнологічних систем, попри наявність певних технічних і економічних обмежень.

Цифрові фільтри — це ключові компоненти систем цифрової обробки сигналів (ЦОС), які здійснюють математичну маніпуляцію із вхідними цифровими даними для отримання бажаних частотних характеристик. Їх використання дозволяє ефективно і точно обробляти сигнали, зокрема виділяти корисні частоти, зменшувати завади та здійснювати трансформацію сигналу відповідно до потреб системи [15].

Цифрові фільтри працюють шляхом застосування до вхідного сигналу математичних операцій, таких як додавання, множення і затримка. Ці операції реалізуються у вигляді алгоритмів, які виконуються на процесорах цифрової обробки сигналів (DSP) або інших апаратних рішеннях. Основний алгоритмічний інструмент цифрових фільтрів — це різницеві рівняння, які описують залежність вихідного сигналу від поточного та попередніх значень вхідного сигналу.

Прикладом цифрових фільтрів є:

- Фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (FIR), у яких вихідний сигнал залежить лише від поточних і попередніх значень вхідного сигналу. Їм притаманна лінійна фазова характеристика, стабільність.

Фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (IIR) у яких Вихідний сигнал залежить як від вхідних, так і від попередніх вихідних значень. В результаті досягається вища ефективність за обчислювальними ресурсами, можливість створення складних частотних характеристик.

Застосування фільтрів ультракоротких хвиль охоплює кілька важливих сфер. В області радіозв'язку такі фільтри широко використовуються для вибору необхідних каналів у системах мобільного зв'язку та радіомовлення, забезпечуючи якісну передачу і прийом сигналів. У радіолокаційних системах фільтри відіграють ключову роль у виявленні та відокремленні корисного

сигналу від шумів і завад, що є важливим для забезпечення точності та надійності роботи радарів. Окрім цього, медична техніка також активно використовує ультракороткі хвилі, зокрема в терапевтичних і діагностичних пристроях, де ці технології застосовуються для лікування і моніторингу стану пацієнтів. Таким чином, фільтри ультракоротких хвиль є незамінними у багатьох галузях, від комунікацій до медицини.

2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ФІЛЬТРІВ УКХ ХВИЛЬ

У своїй роботі компанія Marki Microwave [16] пропонує аналітичні інструменти для проектування фільтрів, які є доступними для широкого використання. Один із таких інструментів — для розрахунку LC-фільтрів — побудований на основі фундаментальних рівнянь, що використовуються в теорії фільтрів. Цей інструмент дозволяє визначити теоретичні параметри для різних типів фільтрів, таких як фільтри Чебишева, Баттерворта чи Еліптичні фільтри, з урахуванням порядку фільтра та заданої частоти зрізу. Приклад отриманих результатів наведено в графічній формі (рисунок 1) [17].

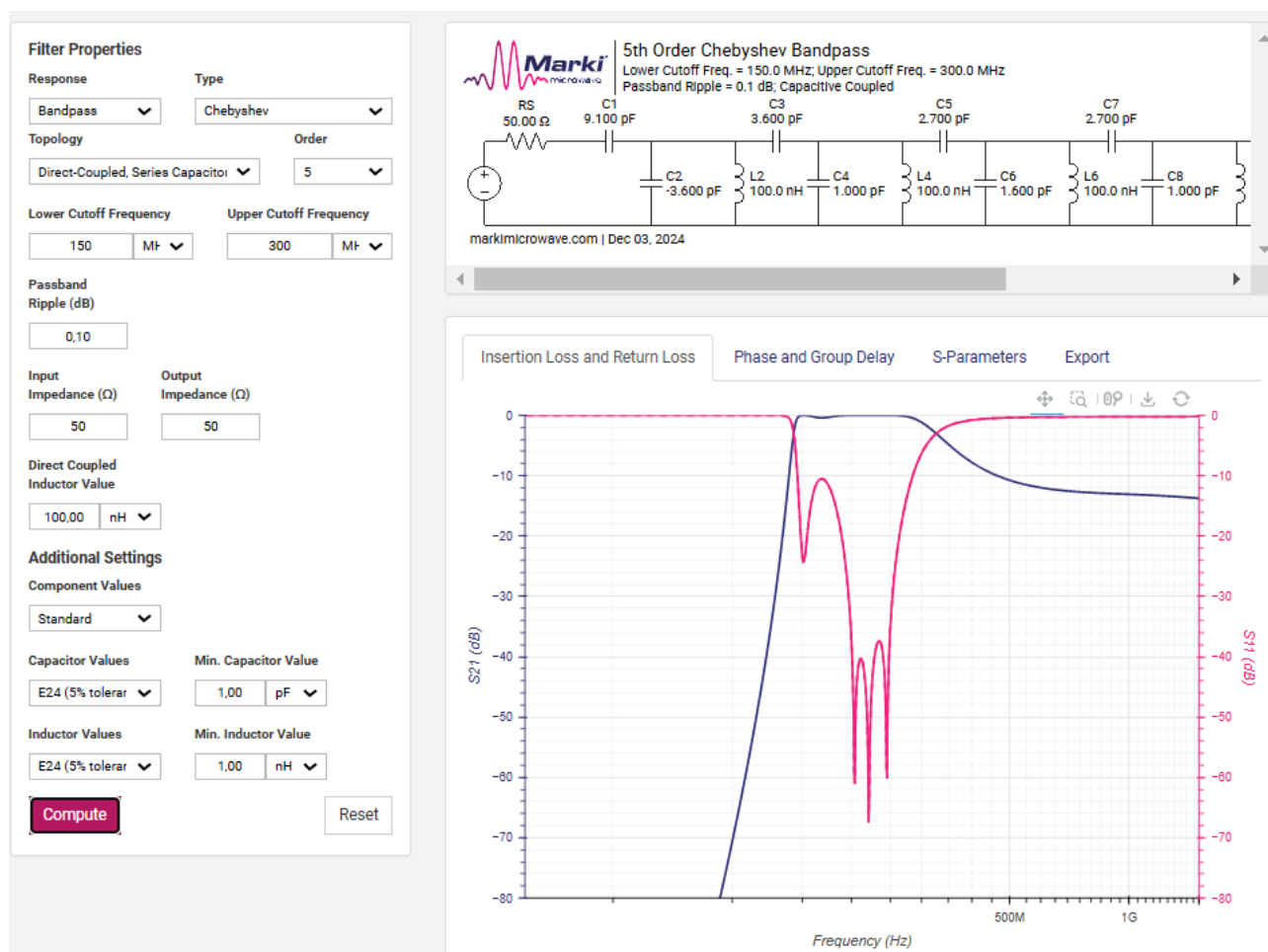


Рисунок 11 – Інтерфейс онлайн калькулятора фільтрів Marki Microwave [16]

Окрім цього, компанія розробила інструмент для проектування мікросмужкових фільтрів [18], який забезпечує вищий рівень деталізації. Він дозволяє розрахувати реальне компонування мікросмужкової структури, проте працює лише з обмеженим набором топологій, таких як фільтри Чебишева та Баттерворта. Для оцінки параметрів розсіювання у цих структурах використовуються математичні моделі. Такі засоби допомагають інженерам швидко орієнтуватися у можливостях створення фільтрів під конкретні технічні вимоги [19].

Втім, ці інструменти мають свої обмеження. Вони генерують лише теоретичні результати, які не завжди збігаються з характеристиками реальних пристроїв після виготовлення. Основні причини таких розбіжностей — не враховані паразитні ефекти компонентів, втрати в лініях передачі, а також взаємодія між окремими елементами структури. У зв'язку з цим, для досягнення високої точності розрахунків необхідна додаткова оптимізація за допомогою більш потужних симуляторів електричних схем. У деяких випадках може знадобитися ретельне налаштування параметрів у таких спеціалізованих програмних засобах, щоб забезпечити оптимальні робочі характеристики фільтра.

Щоб більш точно підібрати компоненти для LC-фільтру можна скористатись таким електричним симулятором, як LTSpice [20]. Це один із багатьох SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) розроблений компанією Analog devices [21], яка є світовим лідером у розробці та виробництві аналогових мікросхем, змішувачів сигналів та інтегральних схем DSP (Digital signal processor). Для нашої задачі особливо зручно було те, що калькулятор фільтрів від Marki Microwave відразу після розрахунку схеми LC-фільтру автоматично генерує модель схеми для симулятора LTSpice, чим ми будемо користуватись в подальшому.

Проте для перевірки мікросмужкової лінії вже необхідно використати сіткові методи розрахунку, наприклад метод кінцевих елементів (FEM) в

частотному просторі [22]. Тобто алгоритм розробки мікросмужкового фільтру буде наступний, в першому наближенні рахуємо в калькуляторі фільтрів від Marki Microwave, далі відтворюємо цю структуру в ANSYS HFSS, за необхідністю коригуємо модель чи проводимо оптимізацію, далі виготовлюємо прототип і аналізуємо результати експериментів.

3. LC-ФІЛЬТРИ ДІАПАЗОНУ УЛЬТРАКОРОТКИХ ХВИЛЬ

В цьому розділі буде продемонстровано розрахунок, проектування та результати вимірів виготовлених LC-фільтрів діапазону ультракоротких хвиль різних порядків.

3.1. Визначення величини індуктивностей на необхідній частоті

Перш ніж приступити до проектування LC-фільтрів цього діапазону, необхідно підготувати відповідні елементи. Очевидно, що нам необхідні ємності, індуктивності та резистори. З одного боку, зараз нескладно дістати ємності різного форм фактора, з задовільною точністю, то з іншого підбір індуктивності для цього діапазону частот викликає питання, а саме щоб вона могла забезпечити стабільне значення індуктивності в залежності від частоти в вказаному діапазоні і була дешевою. З цією ціллю можна просто намотувати ємності, користуючись формулами або онлайн калькуляторами, які зможуть приблизно вказати, які мають бути параметри в котушки, а саме товщина дроту, кількість витків, довжина дроту, діаметр намотування, відстань між сусідніми витками. Для великих значень індуктивності цей підхід є задовільним. Проте для побудови УКХ LC-фільтру порядок величини котушки лежить в межах від десятків до сотень нГн. Тому дійсно можна скористатись підходом вказаним вище, проте необхідно перевірити це, а саме виміряти значення виготовленої котушки індуктивності. Проте вимір індуктивності таких значень базовими приладами є

неможливим. Наприклад пристрій, FNIRSI DSO-TC3, який має в собі таку функцію [23], в нього мінімальна величина індуктивності, яку він може виміряти починається від 10 мкГн. Більш професійні прилади, LC-метри, які можуть це забезпечити коштують тисячі доларів. Один із варіантів, як виміряти величину такої індуктивності, скористатись векторними аналізатором, наприклад NanoVNA або LiteVNA, в нашому випадку саме LiteVNA. Цей прилад, завдяки тому, що він може міряти не тільки амплітуду відбитого сигналу, а і фазу, дає нам можливість визначити комплексний опір будь-чого, що ми доєднаємо до нього. Входи в ньому мають опір 50 Ом. Так як вимірюване значення індуктивності мале, то необхідно забезпечити мінімальні з'єднання і відкалібрувати пристрій безпосередньо на вихід пристрою. На рис. 12-14 можна побачити процес калібровки, де на пристрої побудова діаграма Сміта, де прослідкувавши за маркером можна однозначно відслідковувати значення імпедансу, яке навантажує цей порт.



Рисунок 12 – Калібровка LiteVNA на короткозамкнутий порт 1.

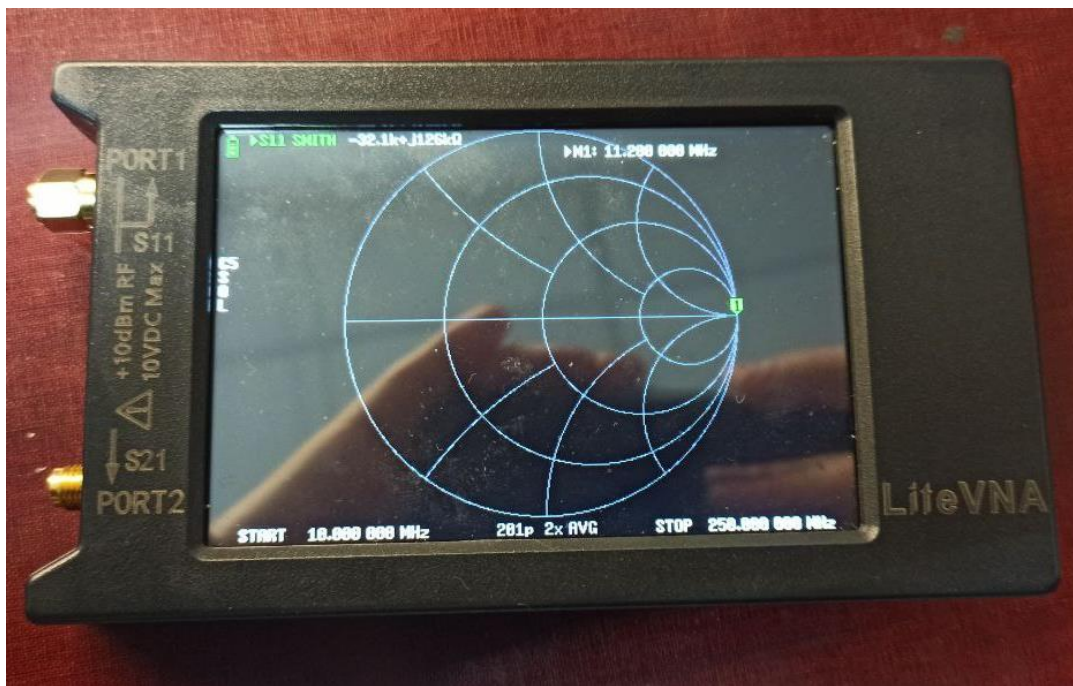


Рисунок 13 – Калібровка LiteVNA на відкритий порт 1.



Рисунок 14 – Калібровка LiteVNA на навантаження 50 Ом на порті 1.

На рис. 15 Представлене фото монтажу індуктивності для виміру векторним аналізатором.

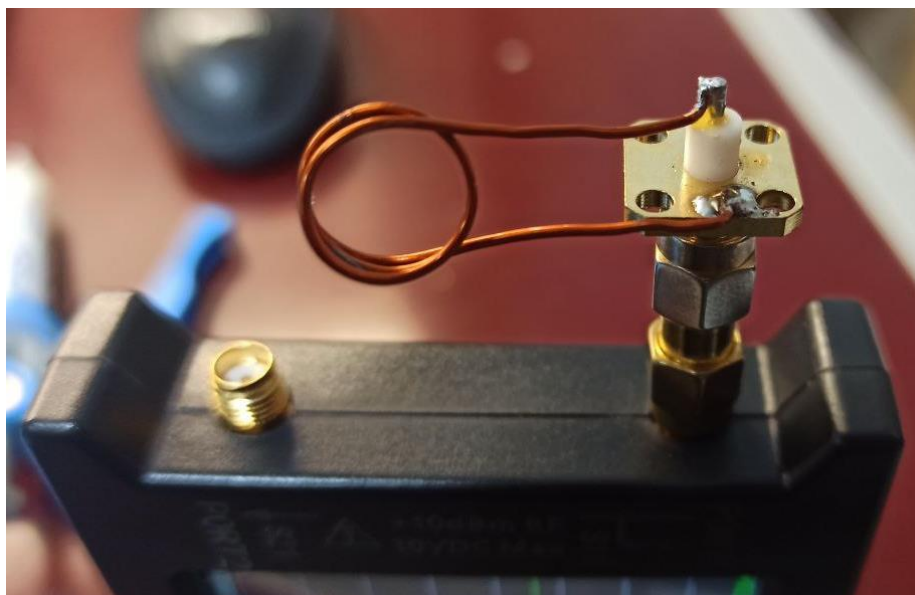


Рисунок 15 – Фото монтажу індуктивності

На рис. 16 показана фото з залежністю величини індуктивності в в цільовому діапазоні частот, яке векторний аналізатор може сам порахувати.

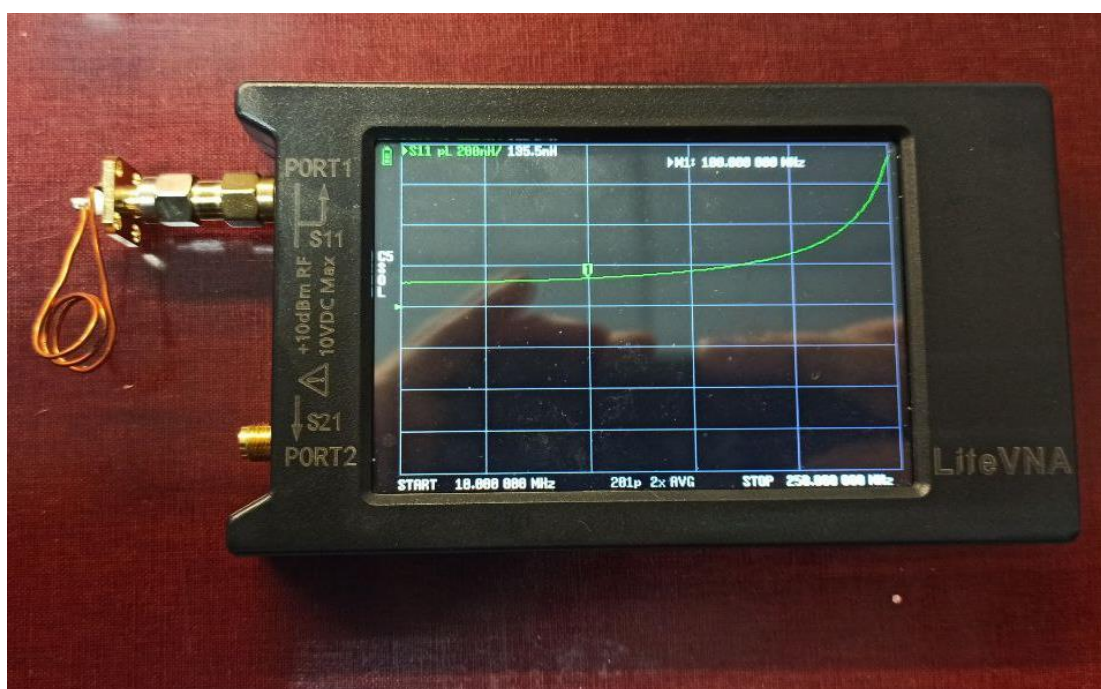
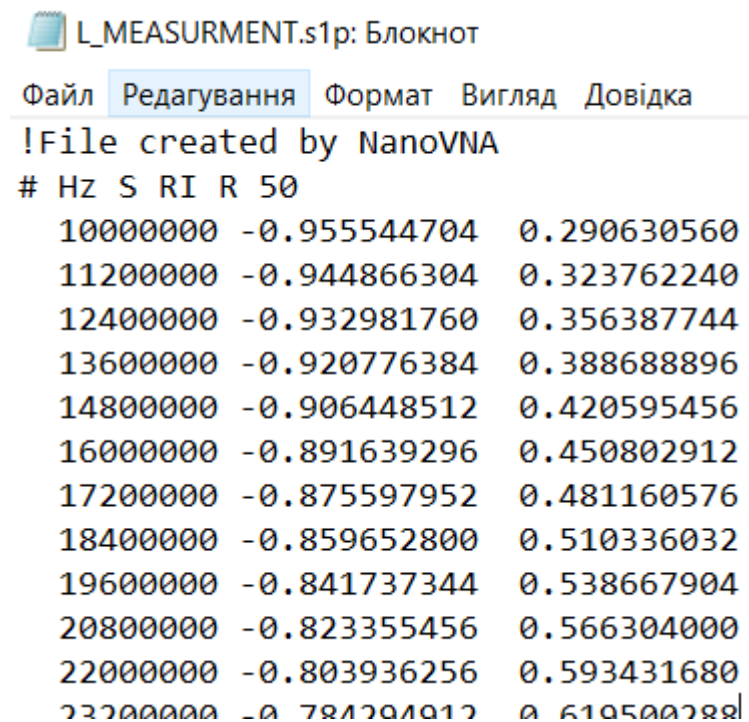


Рисунок 16 – Фото результатів вимірювання індуктивності в залежності від частоти

Пристрій дає можливість експортувати виміри в файл з форматом *.s1p, який записує результати вимірювань з першого порту (рис. 17). Перший стовпець це частота в герцах, друга колонка це реальна частина параметру S_{11} , а третя колонка це уявна частина параметру S_{11} .



The screenshot shows a text editor window titled "L_MEASUREMENT.s1p: Блокнот". The menu bar includes "Файл", "Редагування", "Формат", "Вигляд", and "Довідка". The text content is as follows:

```
!File created by NanoVNA
# Hz S RI R 50
10000000 -0.955544704 0.290630560
11200000 -0.944866304 0.323762240
12400000 -0.932981760 0.356387744
13600000 -0.920776384 0.388688896
14800000 -0.906448512 0.420595456
16000000 -0.891639296 0.450802912
17200000 -0.875597952 0.481160576
18400000 -0.859652800 0.510336032
19600000 -0.841737344 0.538667904
20800000 -0.823355456 0.566304000
22000000 -0.803936256 0.593431680
23200000 -0.784101012 0.610500288
```

Рисунок 17 – Приклад експортованого файлу формату *.s1p

Щоб порахувати значення індуктивності, необхідно спочатку порахувати комплексне значення вхідного опору:

$$Z_{in} = 50 \cdot \frac{(1 + \text{Real}(S_{11}) + j \cdot \text{Imag}(S_{11}))}{(1 - \text{Real}(S_{11}) - j \cdot \text{Imag}(S_{11}))} \quad (1)$$

Реальна частина опору буде рівна

$$\text{Real}(Z_{in}) = 50 \cdot \frac{(1 + \text{Real}(S_{11})) \cdot (1 - \text{Real}(S_{11})) + \text{Imag}(S_{11})^2}{(1 - \text{Real}(S_{11}))^2 + \text{Imag}(S_{11})^2} \quad (2)$$

а уявна

$$\text{Imag}(Z_{in}) = 50 \cdot \frac{(1 + \text{Real}(S_{11})) \cdot (1 - \text{Real}(S_{11})) - (1 + \text{Real}(S_{11}))^2}{(1 - \text{Real}(S_{11}))^2 + (1 + \text{Real}(S_{11}))^2} \quad (3)$$

Розрахувавши уявну частину імпедансу можна розрахувати значення індуктивності

$$L = \frac{\text{Imag}(Z_{in})}{2\pi f} \quad (4)$$

Результати розрахунків експериментальних даних наведені на рис. 18. Тут можна побачити, що індуктивність в такому вигляді зберігає постійне значення індуктивності аж до 150 МГц.

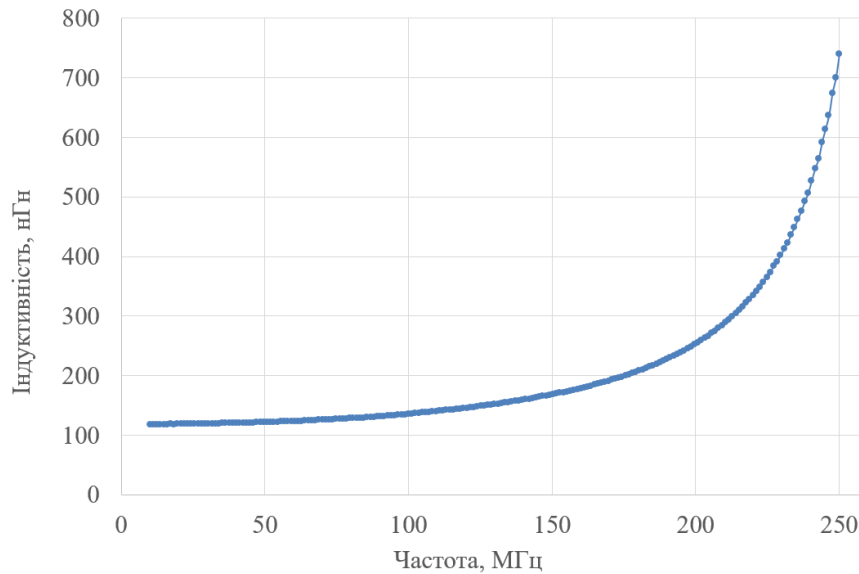


Рисунок 18 – Розраховане значення індуктивності на основі виміру комплексного параметру S_{11} в залежності від частоти

3.2. Методологія вимірювання фільтрів за допомогою векторного аналізатора

Для вимірювання фільтрів, необхідно провести калібровку векторного аналізатора. На рис. 19 зображене фото з повним набором комплектуючих, необхідних для виміру параметру S_{12} . Він включає в себе два коаксіальні кабелі та три варіанти навантаження виконані у вигляді SMA роз'ємів, це 50 Ом, коротке замикання та відкритий контакт (на фото послідовно згори до низу).

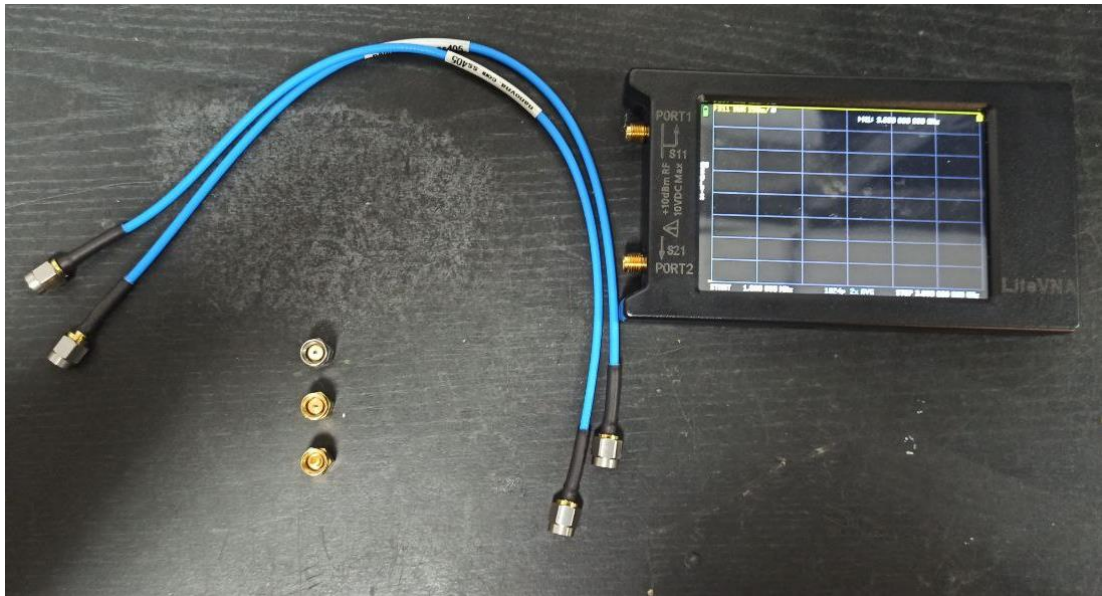


Рисунок 19 – Повний вимірювальний комплект векторного аналізатора LiteVNA

Процес калібровки «на прохід» векторного аналізатора зображений на рис. 20-23.

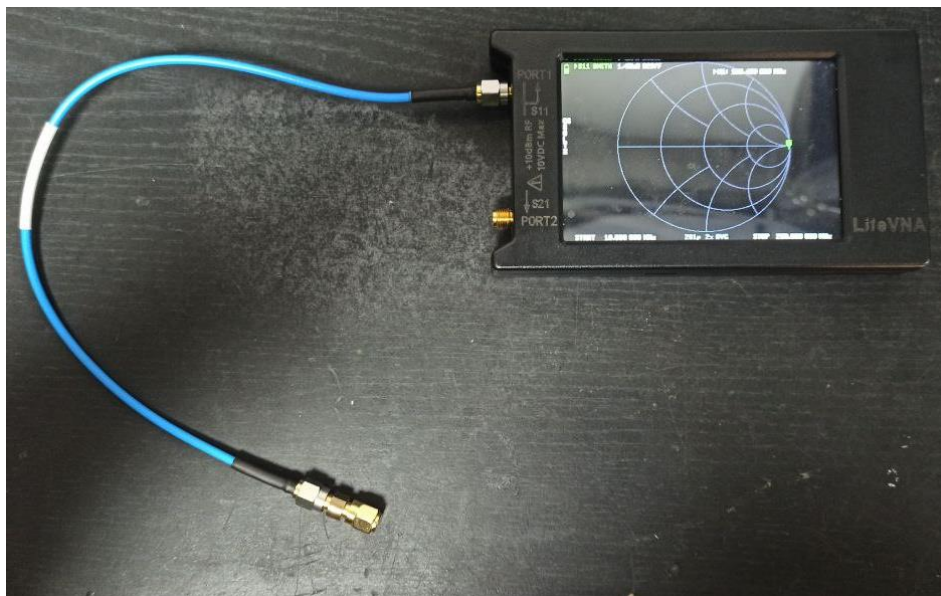


Рисунок 20 – Калібровка векторного аналізатора LiteVNA через коаксіальний кабель на відкритий кінець

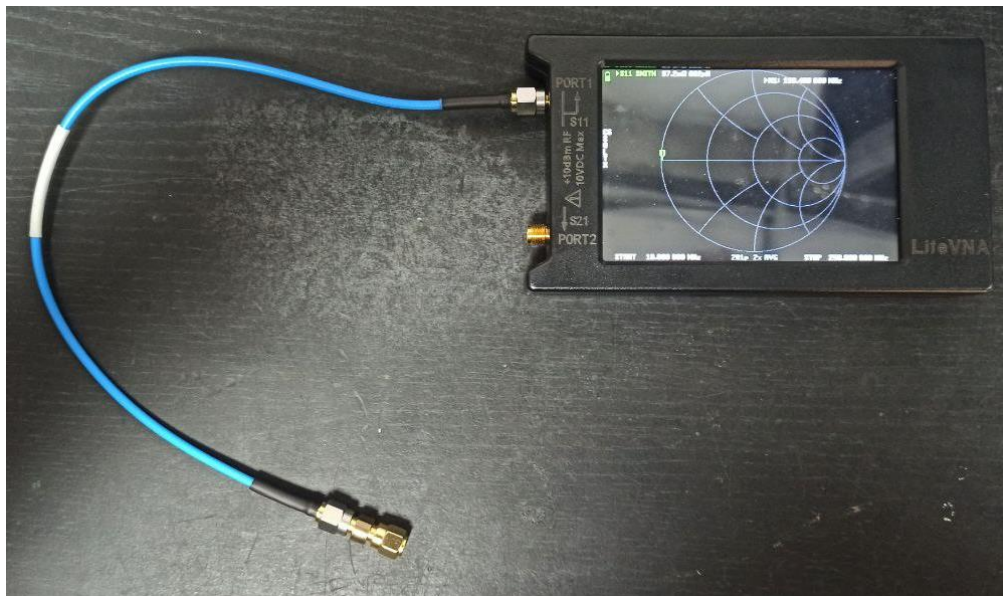


Рисунок 21 – Калібровка векторного аналізатора LiteVNA через коаксіальний кабель на короткозамкнутий кінець

Процес калібровки контролюється діаграмою Сміта, де відразу міткою можна побачити значення відкаліброваного імпедансу.



Рисунок 22 – Калібровка векторного аналізатора LiteVNA через коаксіальний кабель на навантаження 50 Ом

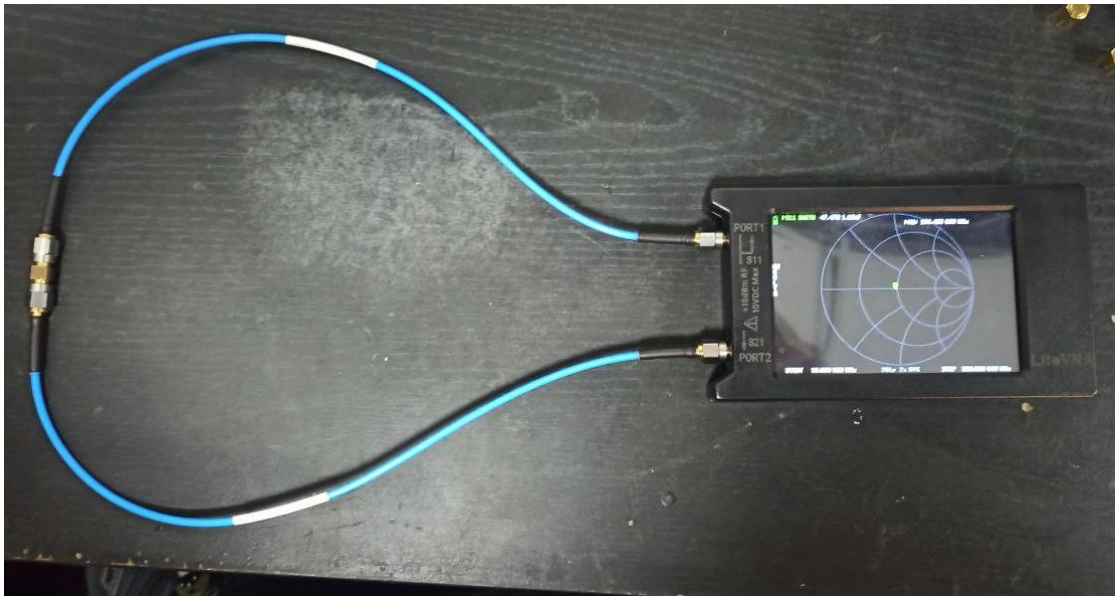


Рисунок 23 – Калібровка векторного аналізатора LiteVNA через коаксіальний кабель на прохід між портами 1 та 2.

3.3. Розробка та виготовлення LC-фільтру другого порядку

Першим варіантом LC-фільтру буде побудова фільтру, параметри якого вказані на рис. 24.

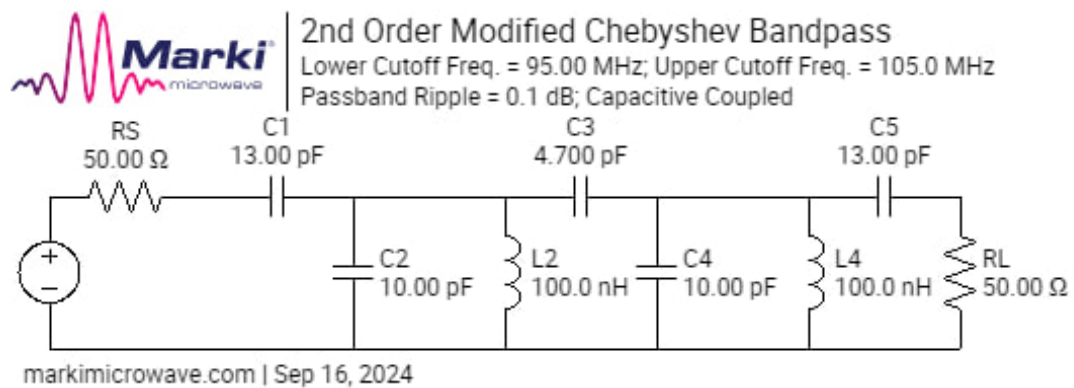


Рисунок 24 – Будова LC-фільтру 2-го порядку за допомогою калькулятора Marki Microwave

На рис. 25 представлено схема фільтру діапазону 95–105 МГц в симуляторі LTSpice.

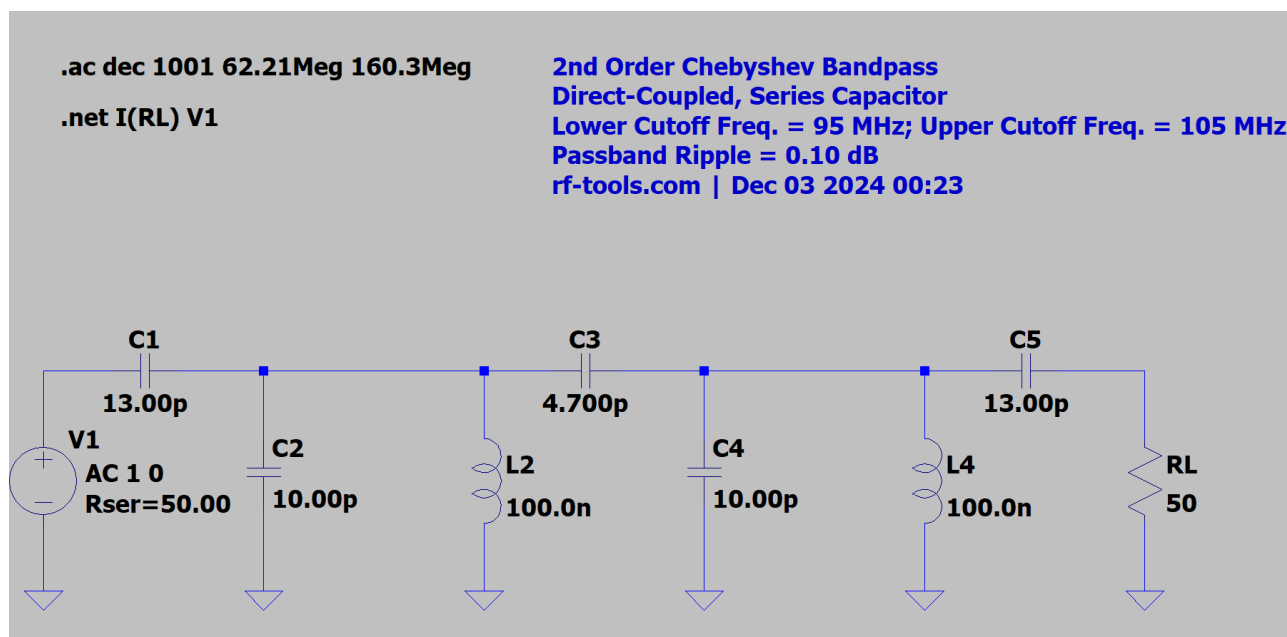


Рисунок 25 – LC-фільтр 2-го порядку в симуляторі LTSpice

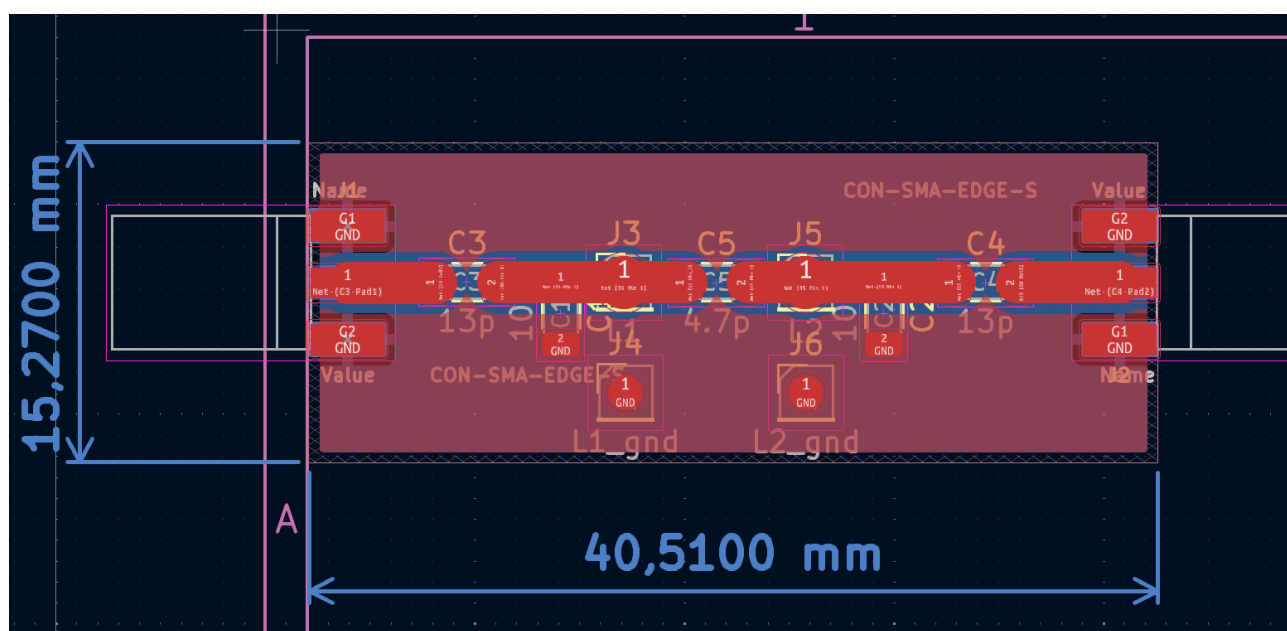


Рисунок 26 – Файл виробництва LC-фільтра 2-го порядку в програмі KiCAD

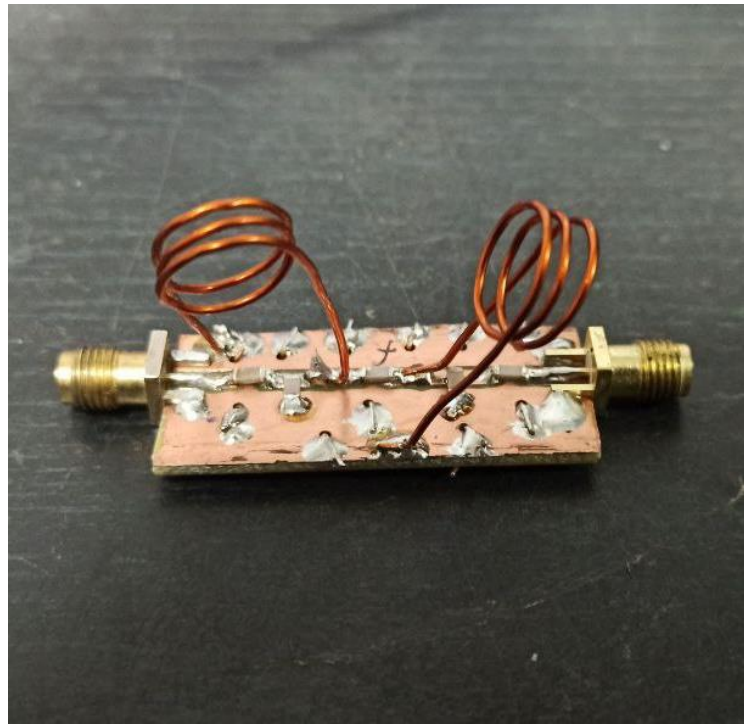


Рисунок 27 – Фото виготовленого LC-фільтра 2-го порядку

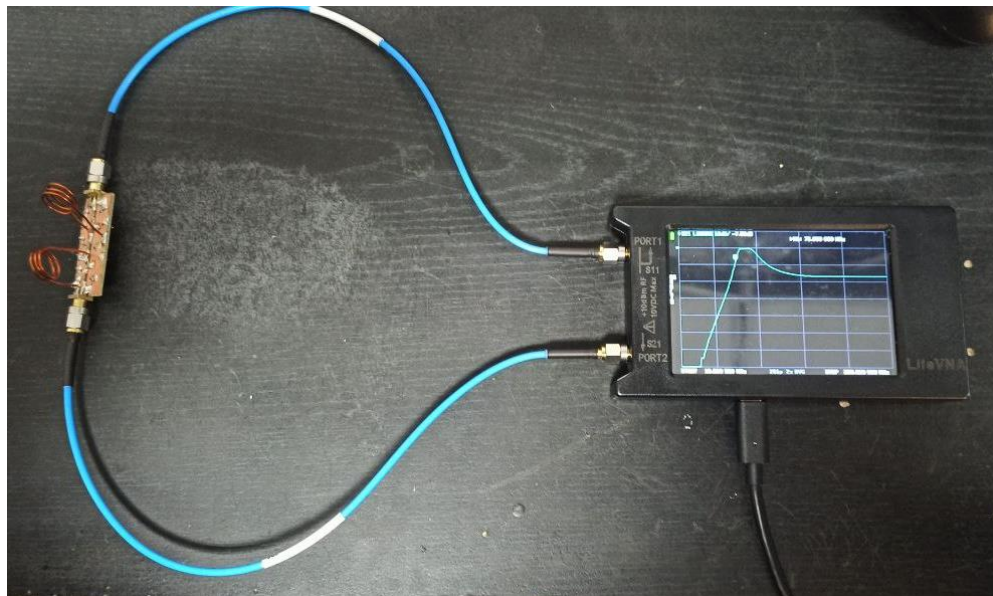


Рисунок 28 – Фото процесу вимірювання LC-фільтра 2-го порядку за допомогою векторного аналізатора

Для побудови та аналізу необхідно підготувати дані, отримані з LiteVNA для побудови параметру S12. Даний векторний аналізатор експортує дані у файл з розширенням *.s1p та *.s2p – перший повертає тільки результати виміру з

першого порта S_{11} , другий вже повертає коефіцієнти комплексного параметру S_{12} . Масив експортованих даних виглядає наступним чином (рис. 29)

4th_order_experiments.s2p: Блокнот

Файл Редагування Формат Вигляд Довідка

!File created by NanoVNA

#	Hz	S	RI	R	50				
10000000	0.990897280	-0.137193200	0.000013481	-0.000018705	0	0	0	0	
11200000	0.987835264	-0.154608560	-0.000029124	0.000028545	0	0	0	0	
12400000	0.984872832	-0.171014832	-0.000031322	0.000002164	0	0	0	0	
13600000	0.981042304	-0.187510192	-0.000017888	-0.000012481	0	0	0	0	
14800000	0.978220864	-0.205384848	-0.000006458	-0.000036565	0	0	0	0	
16000000	0.974264448	-0.223133264	-0.000028614	0.000001427	0	0	0	0	
17200000	0.970501632	-0.239602912	-0.000010036	0.000035258	0	0	0	0	
18400000	0.965999424	-0.257596320	-0.000018176	-0.000004262	0	0	0	0	
19600000	0.960326656	-0.275420608	-0.000003436	0.000011280	0	0	0	0	
20800000	0.954887872	-0.294015328	-0.000008449	0.000010189	0	0	0	0	
22000000	0.949423296	-0.311921312	-0.000034298	-0.000002210	0	0	0	0	
23200000	0.942601024	-0.329508672	-0.000003411	-0.000015827	0	0	0	0	
24400000	0.936385856	-0.346748096	-0.000028001	0.000011968	0	0	0	0	
25600000	0.930613376	-0.363534864	-0.000017007	0.000011033	0	0	0	0	

Рисунок 29 – Скріншот даних у форматі *.s2p, які повертає векторний аналізатор LiteVNA

Перший стовпець відповідає за значення частоти в Гц, другий – реальна частина коефіцієнта S_{11} , третій це уявне значення коефіцієнта S_{11} , четвертий це реальна частина S_{12} та п'ятий відповідає за уявну частину коефіцієнта S_{12} . Маючи ці значення, можна порахувати значення коефіцієнта передачі S_{12} :

$$|S_{12}| = \sqrt{\text{Re}(S_{12})^2 + \text{Im}(S_{12})^2} \quad (5)$$

та перерахувати це в децибели

$$S_{12}(\text{dB}) = 20 \cdot \lg(|S_{12}|) \quad (6)$$

Результати моделювання та експериментальних вимірів можна переглянути на рис. 30. Тут можна побачити, що якщо порівнювати залежність S_{12} від частоти, які порахував симулятор LTSpice по амплітуди каже про помітні втрати, проте експеримент показав, що втрати в фільтрі так, як порахував калькулятор Marki Microwave. Проте також видно, що експериментальна залежність зміщена по частоті в сторону менших частот, проте ширина діапазону по рівню -3 дБ зберігається.

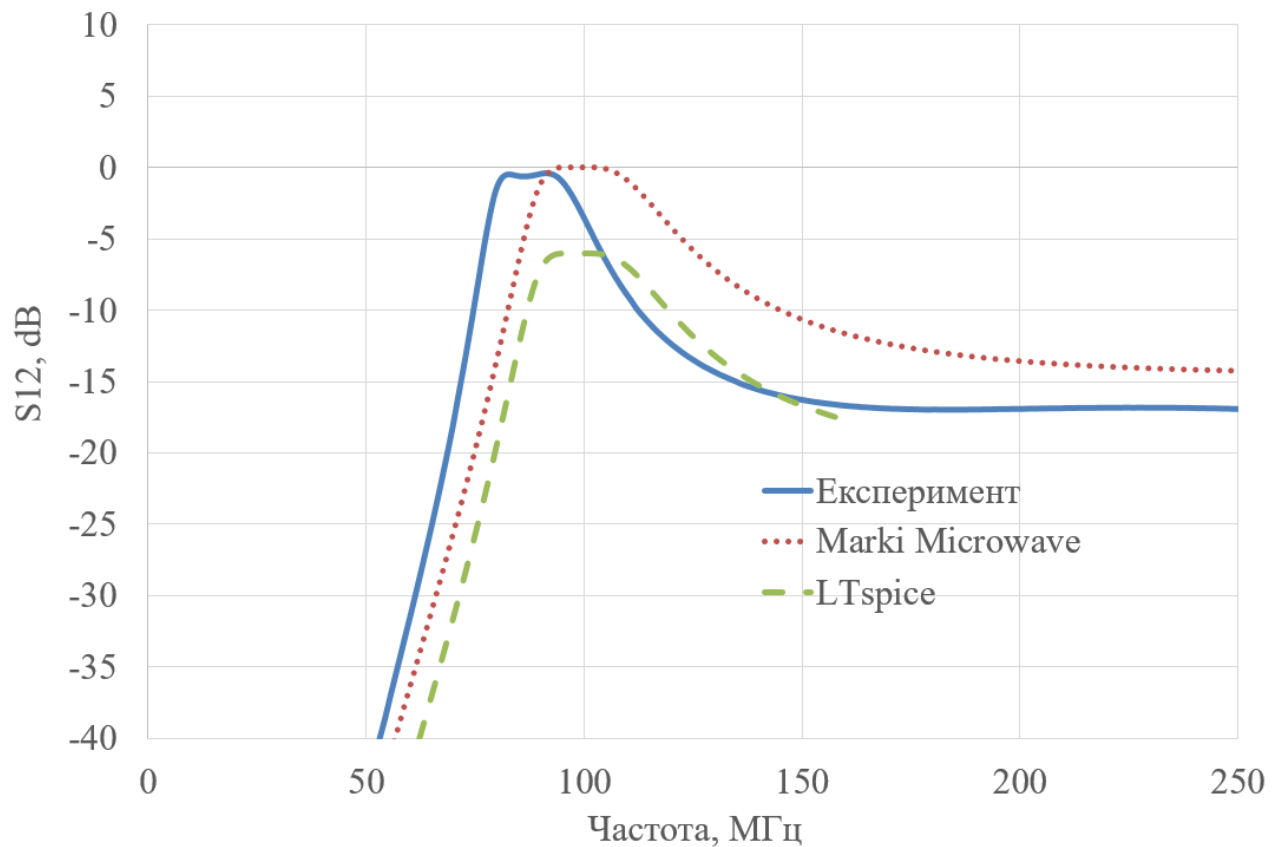


Рисунок 30 – Результати моделювання та експерименту для LC-фільтру 2-го порядку.

3.4. Розробка та виготовлення LC-фільтру четвертого порядку

Для забезпечення більшого робочого діапазону роботи LC-фільтру необхідно збільшувати його порядок. Тому також був побудований фільтр з параметрами, які представлені на рис. 31

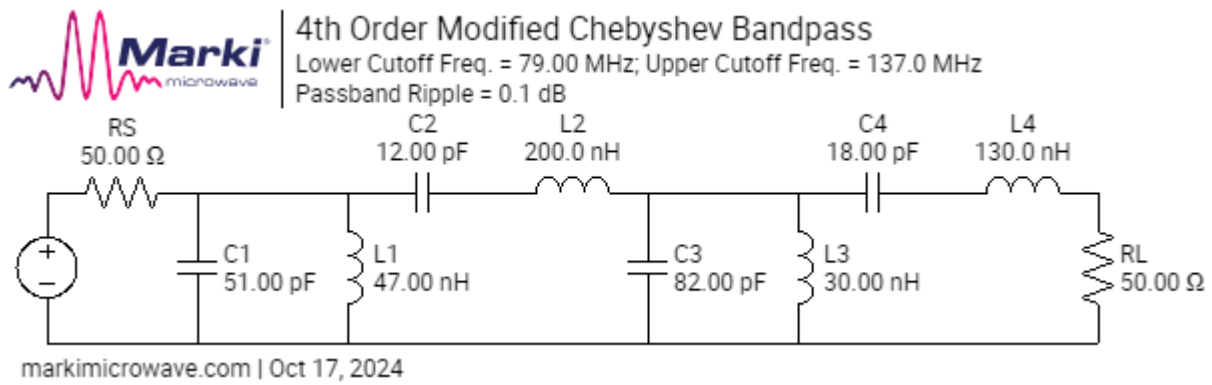


Рисунок 31 – Будова LC-фільтру 4-го порядку за допомогою калькулятора Marki Microwave

Також на рис. 32 зображена схема в програмі LTSpice для цього варіанту фільтра.

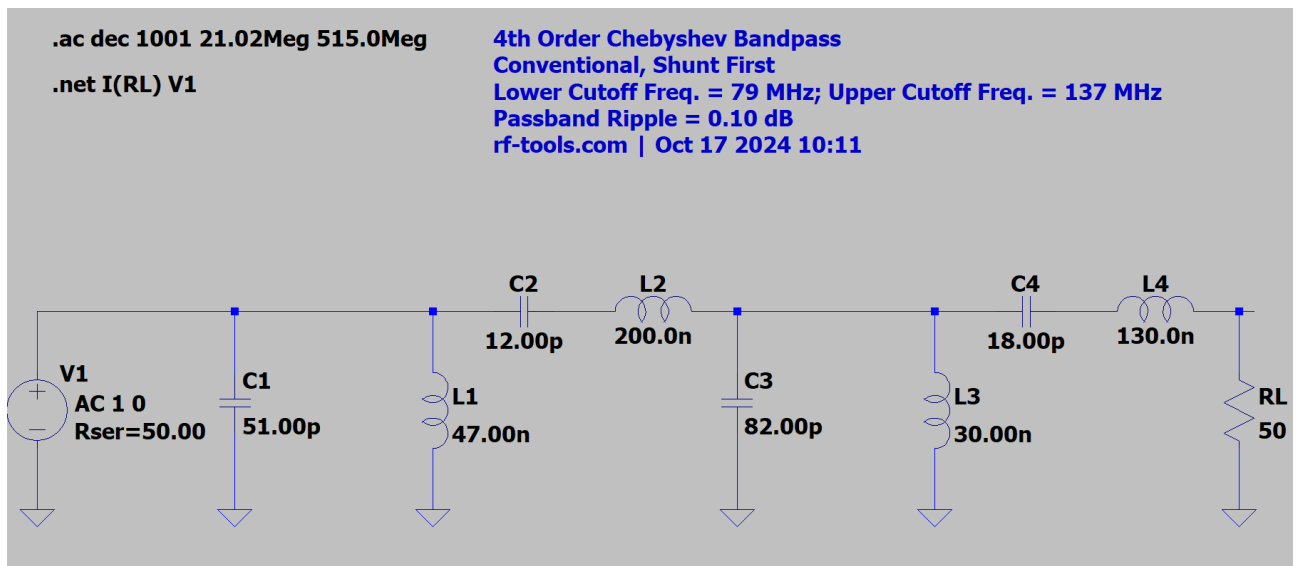


Рисунок 32 – LC-фільтр 4-го порядку в симуляторі LTSpice

На рис. 33 зображено файл виробництва, який був зроблений за допомогою програми KiCAD. Для цього зразку фільтра була виконана металізація перехідних отворів по всій площі плати. Щоб фіксувати плату на установці з оміднення зверху на платі було додано технічний контакт, який після обміднення відрізається. На частотах цього діапазону при проектуванні такого пристрою вже є необхідним розраховувати ширину та товщину доріжок по всій платі з

урахуванням параметрів текстоліту, на якому це виготовляється. В нашому випадку всі плати були виконані на текстоліті FR-4 з товщиною діелектричної підкладки 1,5 мм, та товщиною металевого шару 35 мкм. Всі імпеданси, а саме порти, ширини доріжок були порашовані для отримання 50 Ом.

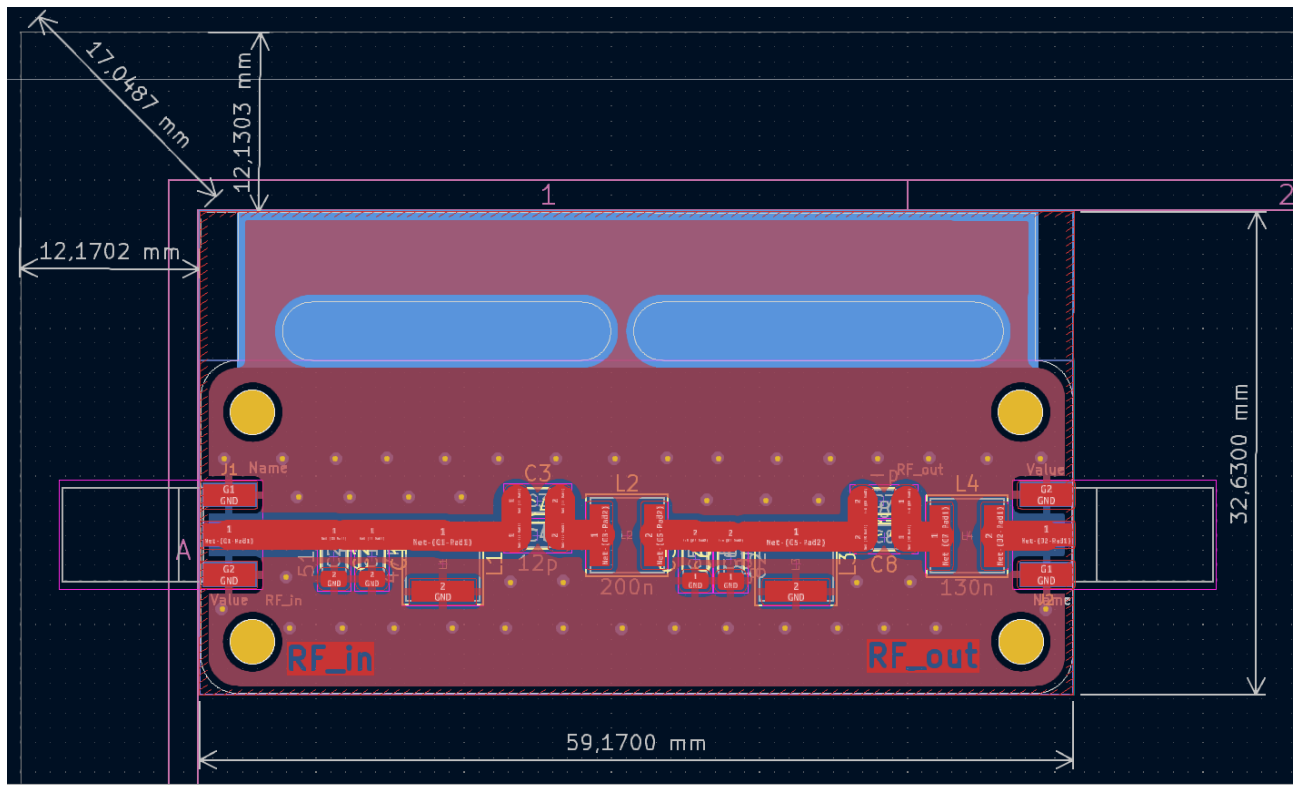


Рисунок 33 – Файл виробництва LC-фільтра 4-го порядку в програмі KiCAD.

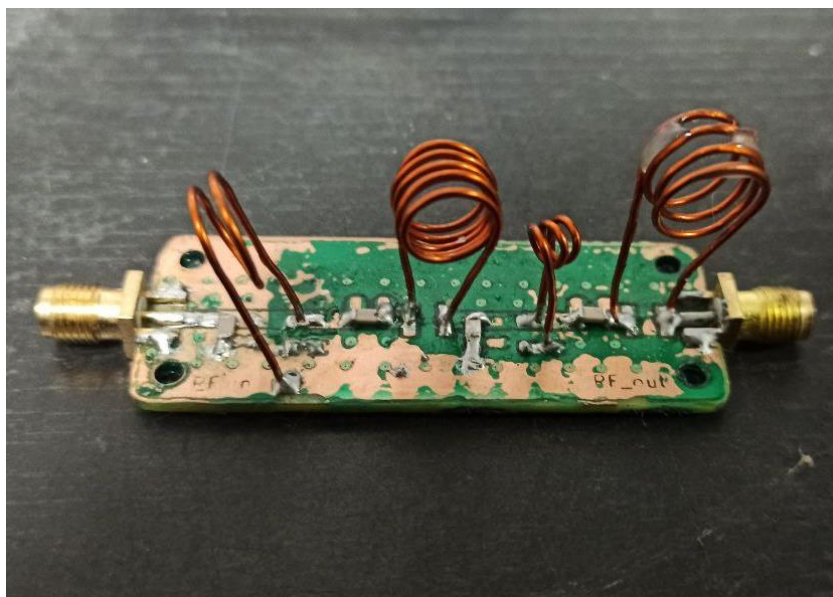


Рисунок 34 – Фото виготовленого LC-фільтра 2-го порядку

Процес вимірювання фільтра 4-го порядку за допомогою векторного аналізатора. На фото пристрою (рис. 34) також варто відмітити монтаж індуктивностей, кожна наступна індуктивність у відношенні до попередньої монтується розвернутою на 90 градусів, щоб мінімізувати вплив сусідніх індуктивностей.

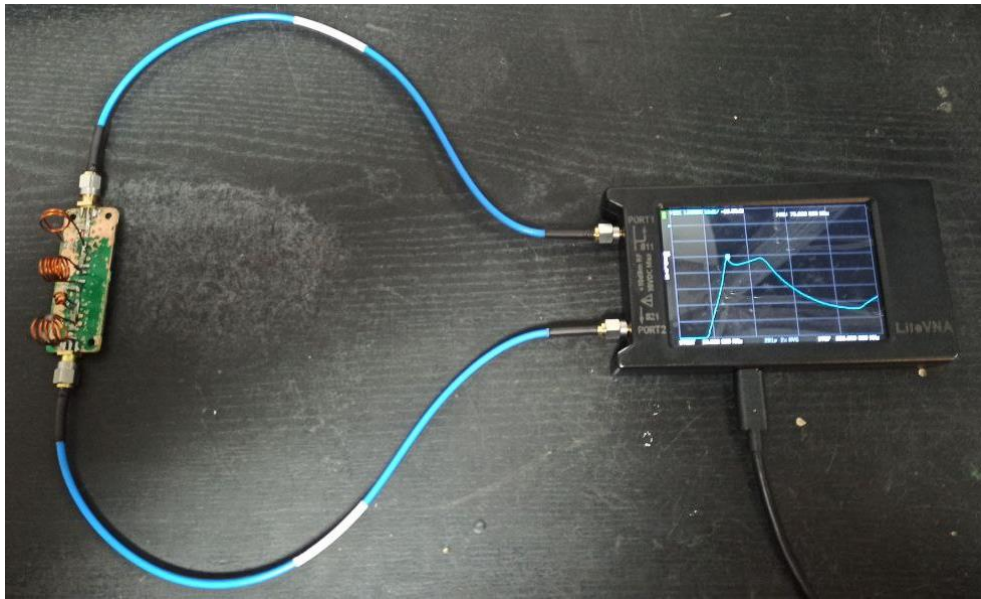


Рисунок 35 – Фото процесу вимірювання LC-фільтра 4-го порядку за допомогою векторного аналізатора

Результати моделювання так експериментальних вимірів LC-фільтра 4-го порядку представлені на рис. 36. Тут можна побачити, що нижня межа частотного діапазону не відрізняється від розрахованої, проте верхня межа робочого діапазону частот зменшилась. Окремо варто сказати, що втрати в виготовленому пристрої дуже сильні, що каже про складність виготовлення LC-фільтрів високих порядків. Цей варіант фільтру вимагає високі вимоги до точності величин окремих компонент. На результат також однозначно впливає сильна частотна залежність елементів, як продемонстровано на рис. 18. На нижчих діапазонах легше виготовити фільтр на широкий діапазон частот. Проте починаючи з 50 МГц виготовлення фільтру із застосуванням звичайних радіо

компонентів є складною задачею. Тут краще справляються фільтри, які використовують об'ємний резонанс або мікросмужкові фільтри.

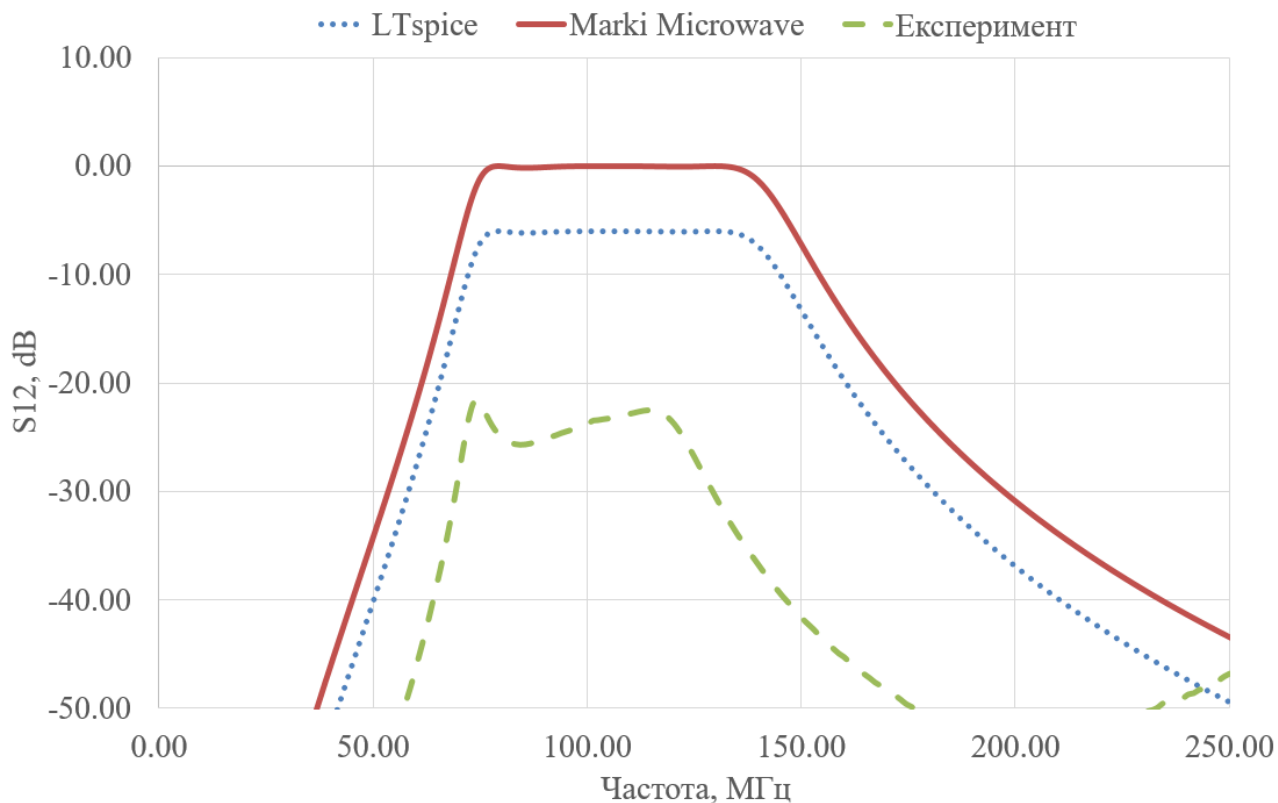


Рисунок 36 – Результати моделювання та експерименту для LC-фільтру 4-го порядку

4. INTERDIGITAL ФІЛЬТР УКХ ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ

У цьому розділі буде розглянутий один із різновидів фільтрів, які виконуються на друкованих платах. Мова піде про interdigital фільтр.

4.1. Постановка задачі

На рис. 37 зображені основні параметри мікросмужкового фільтру. Також тут показана його будова та його геометричні параметри.



Рисунок 37 – Будова Interdigital фільтру 5-го порядку за допомогою калькулятора Marki Microwave

4.2. Моделювання в електромагнітному симуляторі

На основі геометричних параметрів, наведених на рис. 37 була побудована модель цього фільтру в програмному пакеті ANSYS HFSS (рис. 38).

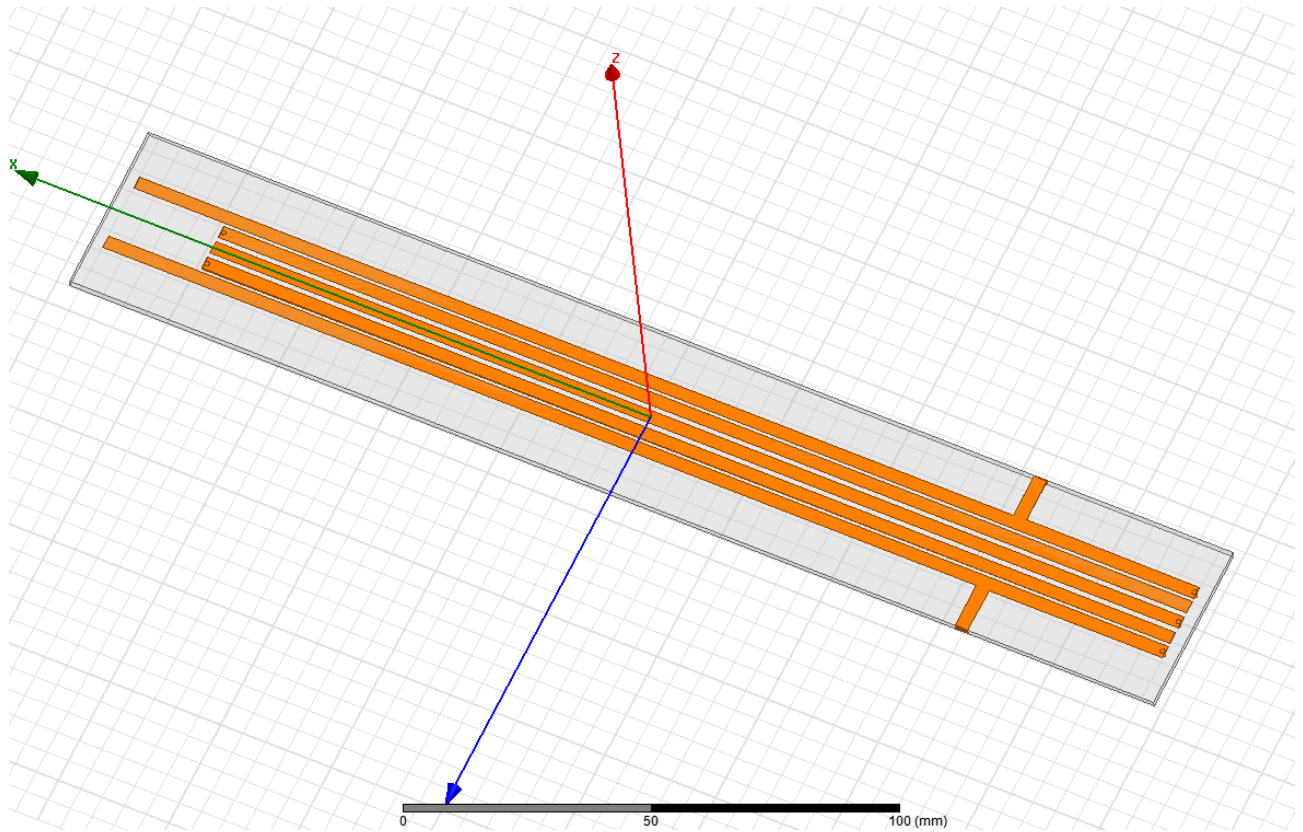


Рисунок 38 – Скріншот програми ANSYS HFSS з interdigital фільтром

4.3. Виготовлення та результати експериментів

На основі побудованої моделі фільтру, його було виготовлено на двошаровому текстоліті FR-4 з товщиною 1,5 мм та товщиною мідного шару 35 мкм. Для того, щоб виготовити його, із симулятора Ansoft HFSS був експортований файл формату *.dxf, який є відкритим форматом файлів для

обміну графічною інформацією між різними системами автоматичного проектування. Щоб підготувати файли виробництва був використаний KiCAD версії 8.0. Креслення фільтру в цій програмі виглядає наступним чином:

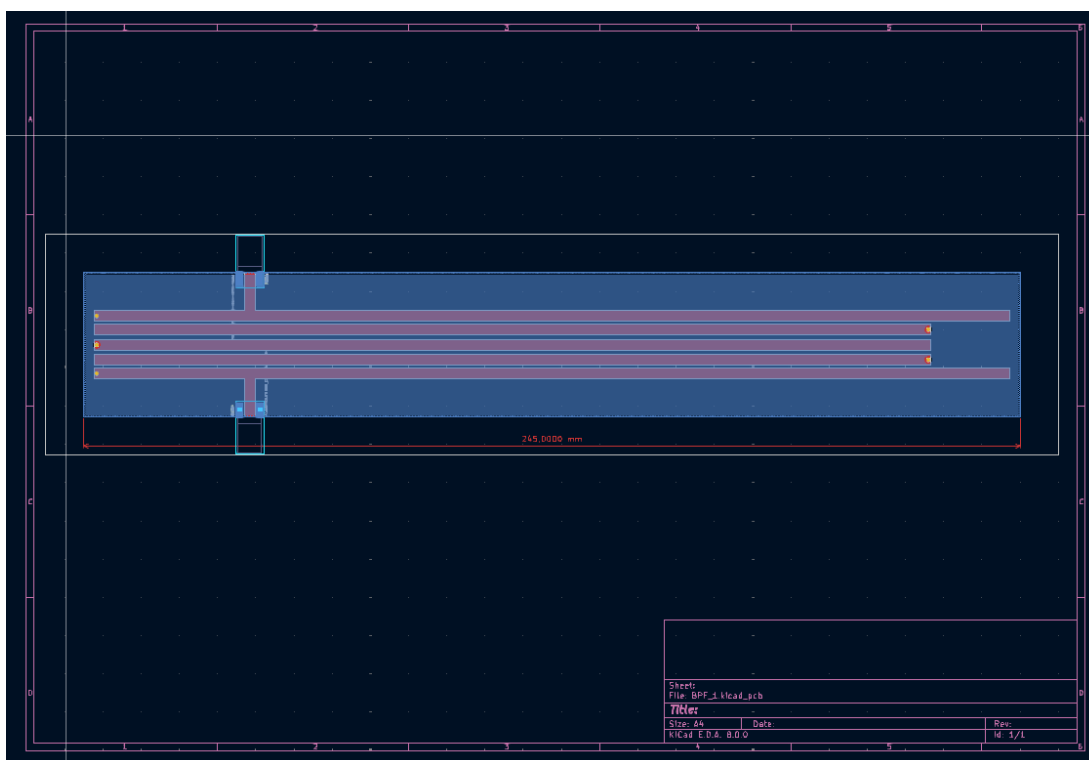


Рисунок 39 – Скріншот файлу виробництва мікросмужкового фільтру в програмі KiCAD.

Також KiCAD дає можливість попередньо візуалізувати 3D модель пристрою:

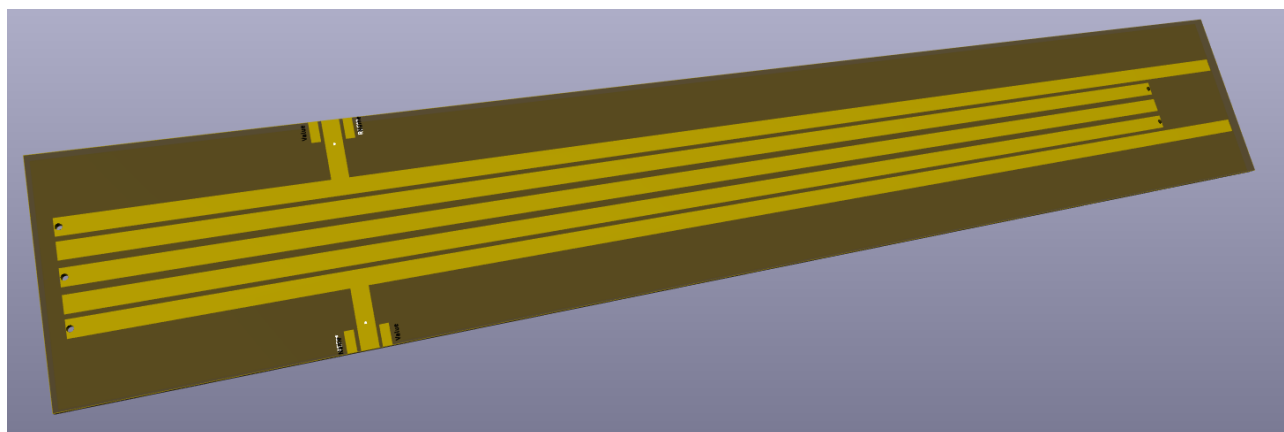


Рисунок 40 – 3D візуалізація проекту в програмі KiCAD

Вирізвавши шматок текстоліту з необхідними розмірами був витравлений фільтр. Результат можна побачити на рис. 41.

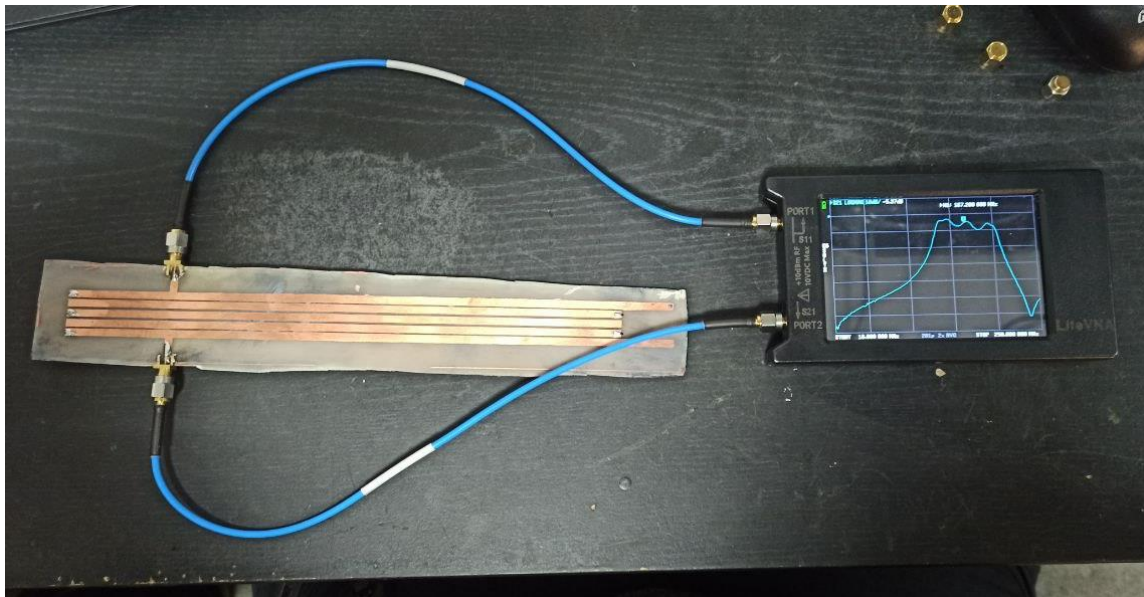


Рисунок 41 – Фото процесу вимірювання мікросмужкового фільтра 5-го порядку за допомогою векторного аналізатора



Рисунок 42 – Фото з нижнього ракурсу мікросмужкового фільтра 5-го порядку

Результати моделювання та експериментальних вимірів представлені на рис. 43. Порівнюючи результати розраховані в калькуляторі Marki Microwave з HFSS та експериментом, видно, що робочий діапазон частот з'їхав в сторони менших частот. Втрати в експериментальному зразку повторюють результати моделювання в прогармі HFSS. Ці суттєві відмінності зумовлені авжеж точністю виготовлення прототипу, проте скоріше за все ключовим стало використання

текстоліту FR-4, у якого за паспортом вказано, що він не може забезпечити рівномірний розподіл діелектричної проникності по всій площі діелектричної підкладки і значення діелектричної проникності варіюються в межах 4,4–5,5. Для побудови мікросмужкового фільтра краще використовувати спеціальний текстоліт, наприклад PTFE, радянський ФАФ-4Д, або більш сучасний текстоліт марки Rogers.

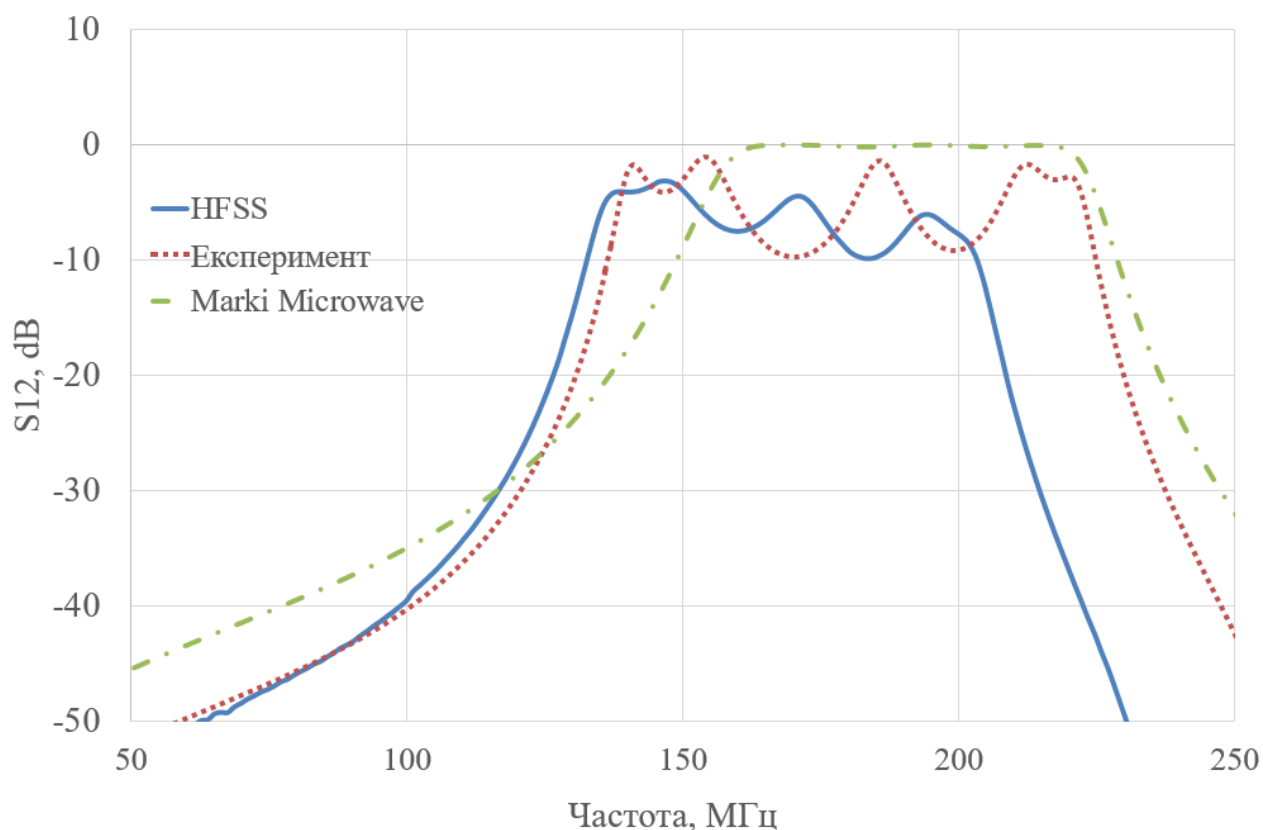


Рисунок 43 – Результати моделювання та експерименту для мікросмужкового фільтра 5-го порядку

5. ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі були розглянуті варіанти радіочастотних фільтрів для діапазону ультракоротких хвиль. Були змодельовані, спроектовані та виготовлені три зразки фільтрів, два були побудовані на радіо компонентах, третій був спроектований та виготовлений у вигляді мікросмужкової плати. Детально описаний процес виміру величини індуктивностей в УКХ діапазоні за допомогою векторного аналізатора. Продемонстрований процес калібровки векторного аналізатора LiteVNA для вимірювання комплексних параметрів S_{11} та S_{12} .

Результати порівняння розрахованих та експериментальних залежностей показують помітну відмінність в усіх випадках. Це каже нам про те, що для того, щоб виготовити радіочастотний фільтр у УКХ діапазоні процес розробки та виготовлення має бути ітеративний. Тобто після виготовлення першого прототипу та отримавши експериментальні результати, необхідно врахувати розбіжності між моделлю та прототипом. Для прикладу з мікросмужковим фільтром можна використати функції оптимізації в програмному пакеті ANSYS HFSS. Також експеримент показав важливість правильного обрання текстоліта для задачі виготовлення фільтру УКХ діапазону.

ЛІТЕРАТУРА

1. A. B. Williams and F. J. Taylor, *Electronic Filter Design Handbook*, 4th Edition. McGraw-Hill Education, 2006. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071471718>
2. Abdullah Eroglu, “MF-UHF Filter Design Techniques,” *CRC Press eBooks*, pp. 251–308, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1201/b14286-6>.
3. “What are the key parameters of filters,” *Analog IC Tips*, Aug. 25, 2021. <https://www.analogictips.com/an-overview-of-filters-and-their-parameters-part-3-key-parameters-faq/>
4. FesZ Electronics, “PCB based Filters,” *YouTube*, Oct. 26, 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=PxiMCnTilnc> (accessed Dec. 03, 2024).
5. T. Nguyen, M. Doan, and H. Ta, “Tri-band bandpass filter using two short stubs and an open stub loaded resonator,” *2013 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2013)*, pp. 697–699, Oct. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/atc.2013.6698205>.
6. G. çakir, S. Gündüz, and L. Sevgi, “A Matlab-based Filter Design Tool Using the Analogy between Wave and Circuit Theories,” Jan. 01, 2006. https://www.researchgate.net/publication/251246617_A_Matlab-based_Filter_Design_Tool_Using_the_Analogy_between_Wave_and_Circuit_Theories
7. “Default Stepped Impedance Lowpass Filter,” *Mathworks.com*, 2021. <https://www.mathworks.com/help/rfpcb/ref/filterstepimpedancelowpass.html> (accessed Dec. 03, 2024).
8. C. J. Kikkert, “A Design Technique for Microstrip Filters,” Dec. 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/icspcs.2008.4813713>.
9. Hossein Nikaein, “Stripline Compline Filter Tunes 900 to 1,300 MHz,” *Mwrf.com*, Apr. 11, 2016.

- <https://www.mwrf.com/technologies/components/passive-components/article/21846696/stripline-combine-filter-tunes-900-to-1300-mhz> (accessed Dec. 03, 2024).
10. A. Belen and M. A. Belen, “Data-driven modeling of band-pass filter for sub-5G applications,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 65, no. 8, pp. 2210–2216, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.33704>.
 11. S. Jain, T. Singh, A. Yadav, and M. D. Sharma, “Novel Hairpin Band-Pass Filter Using Tuning Stub,” *Lecture notes in networks and systems*, pp. 145–152, Oct. 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-7561-7_11.11
 12. A. C. F. Changpuak aka, “Interdigital Bandpass Filter Designer,” www.changpuak.ch.
https://www.changpuak.ch/electronics/interdigital_bandpass_filter_designer.php
 13. Масюк А. Д., *Активні фільтри на MEMC резонаторах: магістерська дисертація*, 153 Мікро- та наносистемна техніка, Київ, 2018, 88 с.
 14. Y.-F. Zhang, M. Cui, and D.-P. Wu, “Design and Fabrication of a MEMS Bandpass Filter with Different Center Frequency of 8.5–12 GHz,” *Micromachines*, vol. 14, no. 2, pp. 280–280, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14020280>.
 15. “DIGITAL FILTERS 6.a SECTION 6 DIGITAL FILTERS.” Available: https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/MixedSignal_Sect6.pdf
 16. “Marki Microwave,” *Marki Microwave*, 2024. <https://markimicrowave.com/> (accessed Dec. 03, 2024).
 17. “LC Filter Design Tool,” [markimicrowave.com](https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/lc-filter-design-tool/).
<https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/lc-filter-design-tool/>
 18. “Microstrip Filter Design Tool,” *Marki Microwave*, 2023. <https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/microstrip-filter-design-tool/> (accessed Dec. 03, 2024).

- 19.D. Jorgesen, “MMIC Filter Advancements Drive New Tools,” *Microwavejournal.com*, Feb. 13, 2024. <https://www.microwavejournal.com/articles/41452-mmich-filter-advancements-drive-new-tools> (accessed Dec. 03, 2024).
- 20.Analog Devices, “LTspice Information Center | Analog Devices,” *Analog.com*, 2024. <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- 21.“Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices,” *Analog.com*, 2019. <https://www.analog.com/en/index.html>
- 22.“Lecture 3: HFSS FEM Solution Setup.” Available: https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/2021/07/HFSS_GS_2020R2_EN_LE3_FEM_MeshSoln.pdf
- 23.“FNIRSI DSO-TC3 Багатофункціональний цифровий осцилограф 3 в 1,” *Arduino в Україні*, 2024. <https://arduino.ua/prod6262-dso-tc3-bagatofynkcionalnii-cifrovii-oscilograf-3-v-1>