

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Створення скалярного аналізатора кіл Signal Hound для вимірювання
параметрів телекомунікаційних фільтрів на базі комірки метаматеріалу»**

Виконав:

студент II курсу, групи ТЗ-11мп

Галицький Ілля Іванович

Керівник:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, доцент, к.т.н.

Живков О.П.

Консультант:

Науковий керівник НН ІТС професор, професор, д.т.н.,

Ільченко М.Ю.

Рецензент:

Доцент кафедри ІКТС, кандидат технічних наук, доцент

Новогрудська Р.Л.

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Галицькому Іллі Івановичу

1. Тема дисертації «Створення скалярного аналізатора кіл Signal Hound для вимірювання параметрів телекомунікаційних фільтрів на базі комірки метаматеріалу», науковий керівник дисертації Живков Олександр Петрович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «28» жовтня 2022 р. № 3995-с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2022 р.
3. Об'єкт дослідження: вимірювальний комплекс Signal Hound та НВЧ фільтри на базі комірок метаматеріалів.
4. Предмет дослідження: модель обчислення комплексних параметрів 4-поліосників на базі вимірювального обладнання Signal Hound та програмного забезпечення на базі Labview.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: обґрунтувати актуальність теми, виконати аналіз фільтрів з керованими характеристиками та дослідити за допомогою обладнання Signal Hound, розробити моделі фільтрів зі змінними характеристиками в програмному середовищі Microwave Office, порівняти розраховані фільтри та виміряти їх параметри.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: актуальність, мета, об'єкт дослідження, предмет дослідження, фільтри НВЧ, аналізатор спектра та генератор Signal Hound, методичний посібник по експлуатації обладнання Signal Hound, методика досліджень мікрохвильових фільтрів, моделювання смугових фільтрів, результати вимірювання виготовлених фільтрів, висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. Zhivkov A., Akopian P., Galickiy I., Krylach O., Kopaniev M., Kamarali R., «Microwave filters with variable parameters based on cells of metamaterials». In: Fifteenth International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS", pp. 79-82, 2021.
2. Avdeyenko G., Galitskiy I., Krylach O., Zhivkov A., Shevtsov K., «Application of Signal Hound scalar network analyzer for measurement of filter parameters based on metamaterial cells», 2022.
3. Zhivkov A., Akopian P., Galickiy I., Sobko T., «The modelling of the group delay in metamaterial cells», 2019.
4. Ilchenko M., Zhivkov A., Akopian P., Galickiy I., Sobko T., «Attenuation poles in band-pass filters with even end odd modes», 2020.
5. Galickiy I., Shevtsov K., Zhivkov A. Kamarali R., «Attenuation Poles In Microwave Three-Resonator Bandpass Filters», 2022.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Ільченко М.Ю. професор кафедри ТК	10.09.2021	20.09.2021
2	Ільченко М.Ю. професор кафедри ТК	15.01.2022	26.01.2022
3	Ільченко М.Ю. професор кафедри ТК	30.04.2022	10.05.2022
4	Ільченко М.Ю. професор кафедри ТК	17.07.2022	27.07.2022
5	Ільченко М.Ю. професор кафедри ТК	01.10.2022	15.10.2022

9. Дата видачі завдання “ 10 ” вересня 2021 р.

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вступ - Актуальність - Предмет дослідження Мета роботи	10.09.2021 - 19.09.2021	виконано
2	Вимірювання параметрів матриць розсіювання 4-полісників мікрохвильового діапазону частот	20.09.2021 - 15.01.2022	виконано
3	Відношення між амплітудно-частотними характеристиками та фазово-частотними характеристиками 4-полісників	26.01.2022- 30.04.2022	виконано
4	Вимірювання характеристик НВЧ фільтрів за допомогою вимірювального комплексу Signal Hound	10.05.2022 - 17.07.2022	виконано
5	Моделювання характеристик фільтрів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення	27.07.2022 - 01.10.2022	виконано
6	Стартап-проєкт	15.10.2022 - 30.10.2022	виконано
7	Висновки Висновки до кожного розділу роботи Загальні висновки по роботі	20.11.2022 – 25.11.2022	виконано
8	Оформлення готової роботи	30.11.2022 – 05.12.2022	виконано
9	Надання ДР до комісії з захисту ДР	07.12.2022	виконано

Студент

Ілля ГАЛИЦЬКИЙ

Науковий керівник дисертації

Олександр ЖИВКОВ

РЕФЕРАТ

Робота містить 81 сторінки та 43 рисунки. Було використано 22 джерел.

Мета роботи: розробка сучасного векторного програмно-вимірювального комплексу Signal Hound для дослідження комплексних значень S-параметрів 4-поліосників.

Практичне використання: розроблений програмно-вимірювальний комплекс Signal Hound та методика його використання можуть бути застосовані як при підготовці спеціалістів в області телекомунікацій та радіотехніки, так і в якості вимірювального обладнання при проведенні наукових досліджень.

Наукова новизна: полягає в створенні експериментальний вимірювального комплексу Signal Hound та режекторного фільтра. Також у демонстрації адекватності запропонованої методики побудови сучасних вимірювальних комплексів, придатних як для університетських лабораторій, так і для наукових досліджень. Зроблено висновок, що обладнання Signal Hound є кращим варіантом за своєю дешевизною, легкістю у користуванні, калібруванні, вимірюванні в цілому, ніж професійні, дорогі, складні у калібруванні вимірювальні пристрої типу Rohde&Schwarz. На підставі програм проектування смугових і режекторних фільтрів, реалізованих у середовищі проектування LabView, дає змогу знаходити фазові характеристики фільтрів методами апроксимації і тим самим реалізовувати апаратно-програмні комплекси векторних аналізаторів мереж.

Ключові слова: метаматеріал, фільтр, смуговий, Signal Hound, НВЧ, Labview, Microwave Office, роздільний кільцевий резонатор, методика досліджень.

ABSTRACT

The work contains 81 pages and 43 drawings. 22 sources were used.

The purpose of the diploma: development of a modern vector software and measurement complex Signal Hound for the study of complex values of S-parameters of 4-poles.

Practical use: the Signal Hound software-measuring complex was developed and the method of its use both in the training of specialists in the field of telecommunications and radio engineering, and as measuring equipment in conducting scientific research.

Scientific novelty: consists in the creation of an experimental measuring complex Signal Hound and a rejection filter. Also in the demonstration of the adequacy of the proposed methodology for the construction of modern measuring complexes, suitable both for university laboratories and for scientific research. It was concluded that the Signal Hound equipment is a better option in terms of its cheapness, ease of use, calibration, measurement in general than professional, expensive, difficult-to-calibrate measuring devices of the Rohde&Schwarz type. On the basis of programs for designing band-pass and rejection filters, implemented in the LabView design environment, it is possible to find the phase characteristics of filters by approximation methods and thereby implement hardware and software complexes of vector network analyzers.

Keywords: metamaterial, filter, band, Signal Hound, UHF, Labview, Microwave Office, split ring resonator, research methodology.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1	11
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАТРИЦЬ РОЗСІЮВАННЯ 4-ПОЛЮСНИКІВ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ.....	11
Висновки	15
РОЗДІЛ 2	16
ВІДНОШЕННЯ МІЖ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА ФАЗОВО-ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ 4-ПОЛЮСНИКІВ.....	16
2.1 Співвідношення Крамерса–Кронінга.....	17
2.2 Відношення Боде та оптичний відгук.....	18
2.3 Немінімально-фазові функції.....	19
Висновки	23
РОЗДІЛ 3	24
ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НВЧ ФІЛЬТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SIGNAL HOUND.....	24
3.1 Ознайомлення з ПЗ Spike	24
3.2 Опис та налаштування вимірювального комплексу Signal Hound	26
3.3 Порядок вимірювань.....	32
3.3.1 Калібрування пристроїв	36
Висновки	47
РОЗДІЛ 4	48
МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	48
4.1 Моделювання за допомогою програмного забезпечення LabView	48
4.2 Порівняння вимірних та модельованих характеристик	55
Висновки	60
РОЗДІЛ 5	62
СТАРТАП-ПРОЄКТ	62
5.1 Опис ідеї проекту	62
5.2 Технологічний аудит проекту.....	67
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	68

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	76
Висновки	78
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ	амплітудно-частотна характеристика
ФЧХ	фазо-частотна характеристика
НДР	науково-дослідницька робота
ВЧ	високі частоти
НЧ	низькі частоти
ПК	персональний комп'ютер
ПЗ	програмне забезпечення
НВЧ	надвисокі частоти
КК	Крамерс-Кронінг
SH	Signal Hound
SRR	Split Ring Resonator
VNA	Vector Network Analiser
DUT	Device Under Test
GD	Group Delay
SWOT	Strength Weak Troubles and Opportunities
RF	Radiofrequency

ВСТУП

Актуальність роботи

Використовуючи вимірювальний комплекс Signal Hound (SH), а також знаючи залежності між АЧХ та ФЧХ 4-полюсників, можна на базі скалярного аналізатора та спеціалізованого ПЗ створити сучасний широкодоступний «векторний програмно-вимірювальний комплекс» для використання в навчальному процесі та виконанні науково-дослідницьких робіт (НДР).

Мета роботи: створення сучасного векторного програмно-вимірювального комплексу на базі Signal Hound для вимірювання значень S-параметрів 4-полюсників.

Розробка методичних вказівок щодо правильного користування обладнанням.

Об'єкт дослідження: вимірювальний комплекс Signal Hound та НВЧ фільтри на базі комірок метаматеріалів.

Предмет дослідження: модель обчислення комплексних параметрів 4-полюсників на базі вимірювального обладнання Signal Hound та програмного забезпечення на базі Labview.

Методи дослідження: аналіз мікрохвильових пристроїв на базі вимірювального комплексу Signal Hound, вимірювання та порівняння отриманих результатів смугових фільтрів, синтез моделей фільтрів з використанням програмного забезпечення AWR Microwave Office та Labview.

Практична цінність

Розроблена методика досліджень мікрохвильових фільтрів за допомогою обладнання Signal Hound може використовуватися для подальшого дослідження та розробки мікрохвильових пристроїв на базі метаматеріалів, для подальшого поліпшення учбового процесу. Даний програмно-вимірювальний комплекс також може використовуватися у дослідницьких та ремонтно-експлуатаційних галузях телекомунікацій.

РОЗДІЛ 1

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАТРИЦЬ РОЗСІЮВАННЯ 4-ПОЛЮСНИКІВ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

Параметри розсіювання [1] радіочастотних компонентів та кіл зазвичай вимірюються за допомогою векторного аналізатора (vector network analyser VNA). Значення «vector» означає, що амплітуду та фазу коефіцієнтів відбивання та передачі можна визначити. На малюнку нижче зображений VNA з високоточним вимірюванням, використовуючи коаксіальну лінії, та досліджуваним пристроєм (device under test DUT). VNA має два коаксіальні кабелі з портом опору $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ для вимірювань.

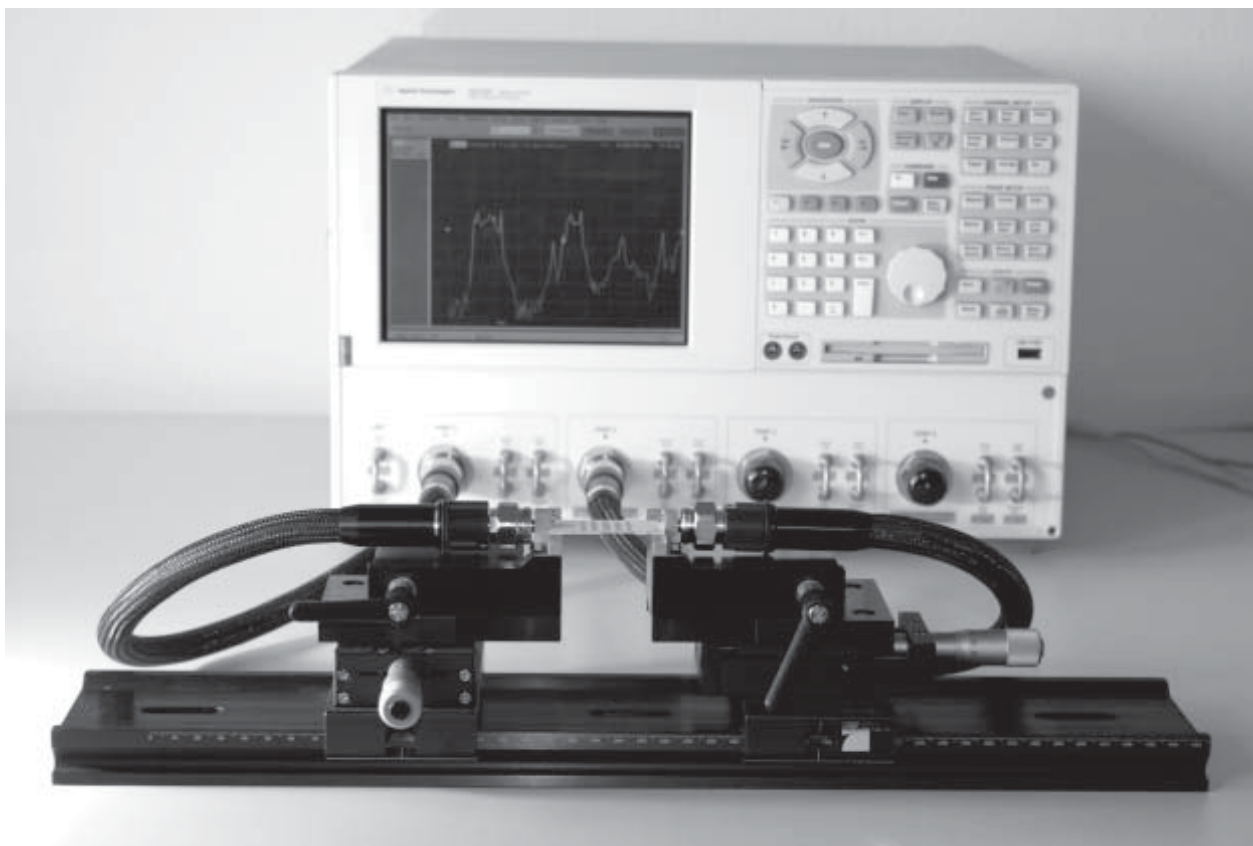


Рис. 1.1. Векторний аналізатор Agilent N5230A (вимірювання в частотному діапазоні 300КГц – 20ГГц) та мікрохвильовий фільтр

На малюнку нижче зображено фундаментальні компоненти та структурна схема VNA. Для того, щоб виміряти параметри розсіювання у визначеному

частотному діапазоні, генератор синусоїдальних сигналів проходить через цей частотний діапазон. На кожній частотній точці хвиля a_1 направлена до DUT. Направлений відгалуджувач відділяє частину хвилі a_1 як сигнал ka_1 . Далі DUT відбиває хвилю b_1 та передає до сигналу b_2 . Спрямований відгалуджувач розділяє сигнал kb_1 від відбиваючої хвилі b_1 . Таким чином, спрямований він здатен визначити сигнал, що надійшов, та відбити його. Після вимірювання параметрів ka_1 та kb_1 , можна визначити коефіцієнт відбивання s_{11} .

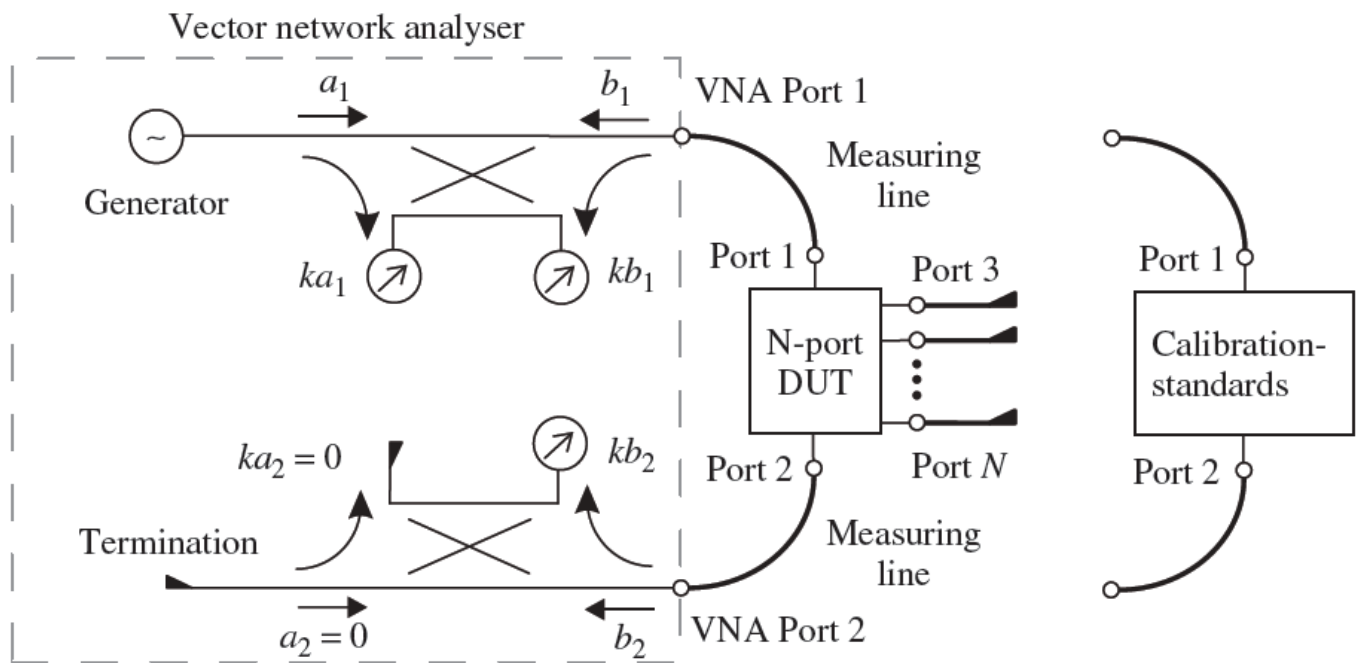


Рис. 1.2. Схематичне представлення векторного аналізатора Agilent N5230A та мікрохвильового фільтра

За допомогою другого порту можна виміряти параметр kb_2 . Тобто, з переданого сигналу kb_2 можна визначити коефіцієнт передачі s_{21} . Таким самим чином можна отримати параметри s_{12} та s_{21} , замінивши місцями generator та termination.

Для того, щоб високоточно вимірювати сигнал та отримувати s-параметри, пристрій необхідно калібрувати. Калібрування вимірювального пристрою дозволяє компенсувати всі похибки, які можуть утворитися в лініях передачі, конекторах. В

результаті калібрування можна отримати якісні амплітуду (dB) та фазу сигналу (degrees).

В сучасному світі, разом з Agilent N5230A, існують і інші відомі векторні аналізатори спектру, такі як: Keysight, Anritsu та Rohde&Schwarz.



Рис. 1.3. Векторний аналізатор Rohde&Schwarz [2]

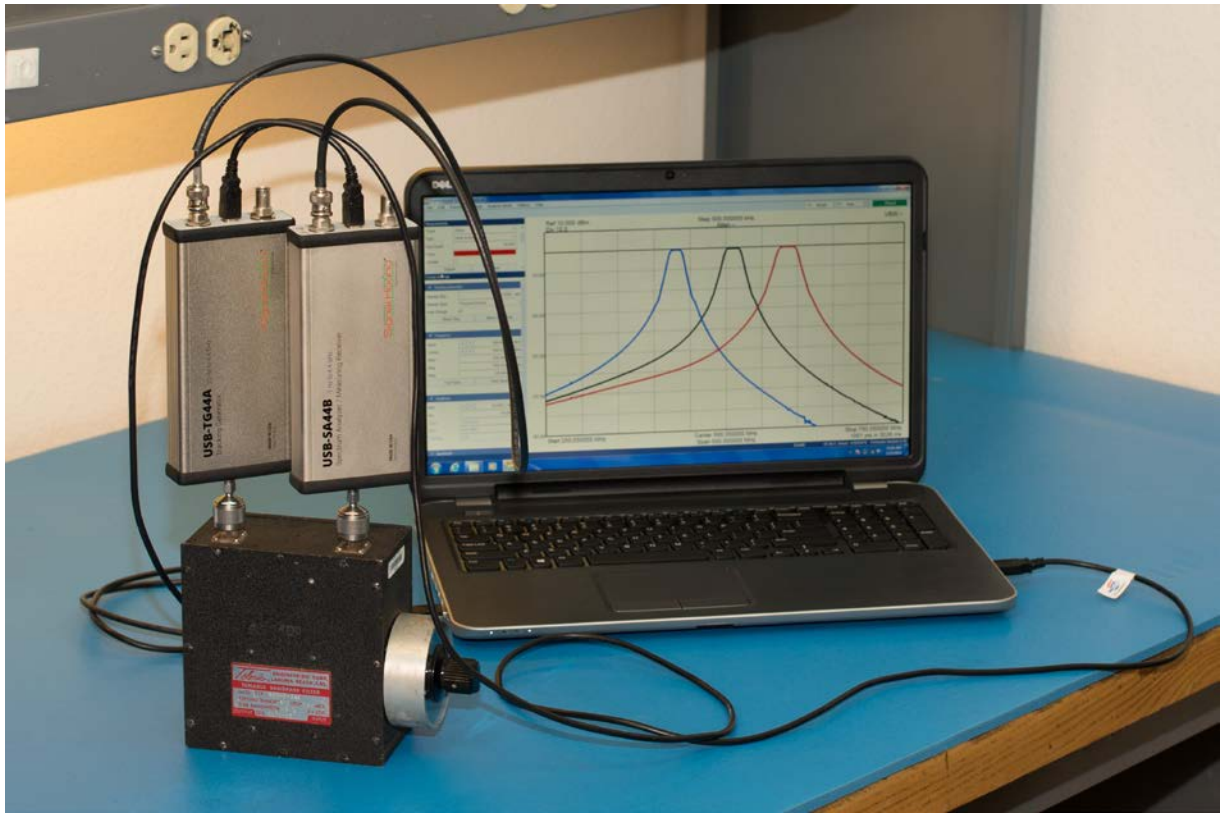


Рис. 1.4. Векторний аналізатор Keysight [3]

Так, вони є професіональними, точними, за допомогою них науковці роблять високоякісні дослідження, але вони дуже дорогі, великогабаритні та довго калібруються. Це не всім зручно. Але гарною заміною цих пристроїв є дешевий, легкокалібрувальний, компактний вимірювальний комплекс Signal Hound, який має абсолютно всі ті ж самі можливості вимірювання та дослідження. Тобто можна з легкістю цей комплекс калібрувати та отримувати якісні результати у вигляді амплітудних характеристик s-параметрів мікрохвильового фільтру. Єдиним недоліком є неможливість вимірювання фази. Про цей комплекс більш детально розповідається у розділі 3.



a)



б)

Рис. 1.5. Вимірювальний комплекс Signal Hound. а) Комплекс детального виду.

б) Взаємодія з ПК

Висновки

У розділі розглянуто вимірювальні пристрої, призначені для вимірювання параметрів матриць розсіювання 4-полюсників мікрохвильового діапазону частот. Також детально розглянуто принцип роботи дослідження фільтра. Порівняно професіональні вимірювальні комплекси з обладнанням Signal Hound та зроблено висновок, що SH є гарною заміною, оскільки має легкість в калібруванні, підключенні та дослідженні під час роботи.

РОЗДІЛ 2

ВІДНОШЕННЯ МІЖ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА ФАЗОВО-ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ 4-ПОЛЮСНИКІВ

Сучасні векторні аналізатори типу Agilent N5230A – дороге та складне в експлуатації обладнання та в силу цього не можуть бути ефективно використані в навчальному процесі. В той же час з'явилися прості в експлуатації пристрої типу Signal Hound, на базі яких можуть бути створені скалярні аналізатори. Різниця між векторними та скалярними є в можливості вимірювання ФЧХ.

З теорії кіл [4] відомо, що передавальною функцією (K) навантаженого чотириполосника називається відношення комплексних амплітуд до комплексних значень впливу. Передавальна функція будь-якого чотириполосника в правій півплощині змінної p є аналітичною функцією. Якщо даний чотириполосник належить до числа кіл мінімального фазового типу, то його передавальна функція K в правій півплощині не має нулів. Тоді аналітичним виразом буде:

$$\ln K(p) = \ln |K(p)| + j \arg K(p) \quad (2.1)$$

Граничні значення дійсної та уявної частин вище написаної функції зв'язані між собою парою **перетворень Гільберта**:

$$\arg K(j\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln |K(j\xi)|}{\xi - \omega} d\xi, \quad (2.2)$$

$$\ln |K(j\xi)| = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\arg K(j\omega)}{\omega - \xi} d\omega. \quad (2.3)$$

Таким чином, реалізуючи задану АЧХ чотириполосника, неможливо отримати при цьому будь-яку ФЧХ. Беручи до уваги перетворення Гільберта можна стверджувати, що, наприклад, якщо АЧХ мінімально-фазового чотириполосника на який-небудь частоті досягає максимум, то ФЧХ в цій же частоті проходить через нуль.

Отже, чотириполюсники, які не мають нулі передавальної функції в правій півплощині, називаються мінімально-фазовими ланцюгами. А якщо нулі в правій площині є, то чотириполюсники називаються немінімально-фазовими.

Якщо чотириполюсник належить до класу кіл з немінімальною фазою (тобто є нулі в правій півплощині чотириполюсника), то АЧХ та ФЧХ незалежні один від іншого. Серед немінімально-фазових кіл важливу роль відіграють всепропускні чотириполюсники, у яких модуль коефіцієнта передачі постійний та не залежить від частоти. Зазвичай, подібні чотириполюсники використовуються для фазової корекції сигналів. Вони дозволяють частково компенсувати спотворення різних форм сигналів, які пройшли через радіотехнічні пристрої.

2.1 Співвідношення Крамерса–Кронінга

Перетворення Гільберта в теорії кіл фактично є тим самим, як у фізиці так звані співвідношення Крамерса-Кронінга. Оскільки в теперішній час фізики використовують Крамерса-Кронінга для досліджень метаматеріалів, а метаматеріали все широко використовуються в телекомунікаціях, корисно буде розглянути і Крамерса-Кронінга.

Співвідношення Крамерса-Кронінга [5] з'єднує дійсну та уявну частини причинно-наслідкової лінійної функції $G(t)$. Інтерпретація $G(t)$ як функцію Гріна (або функцію імпульсного відгуку), описує відповідь системи в момент часу t після спрацювання дельта-функцією в момент часу 0 . Причинність означає, що $G = 0$ для $t < 0$. Лінійність означає, що вимірювання $y(t)$ у відповідь на $u(t)$ визначається як:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t - t')u(t')dt', \quad (2.4)$$

$$y(\omega) = G(\omega)u(\omega). \quad (2.5)$$

$y(t)$ - вихід системи, а $u(t)$ - вхід системи. Вираз для $y(\omega)$ випливає з перетворення Фур'є та застосування теореми про згортку, та використовує «перевантаження», де одна й та сама літера позначає функцію як у часовій, так і в частотній областях.

Форма Крамерса–Кроніга, наведена вище, пов’язує дійсну та уявну частини комплексної функції відгуку. Пов’язана мета полягає в тому, щоб знайти зв’язок між величиною та фазою комплексної функції відгуку.

Загалом, на жаль, фазу неможливо однозначно передбачити за величиною. Простим прикладом цього є чиста затримка часу T , яка має амплітуду 1 на будь-якій частоті незалежно від T , але має фазу, що залежить від T (зокрема, фаза $= 2\pi \times T \times$ частота).

Однак існує унікальне співвідношення амплітуда-фаза в окремому випадку системи мінімальної фази, яке іноді називають співвідношенням підсилення Боде-фаза. Терміни відношення Баярда–Боде та теорема Баярда–Боде після робіт Марселя Баярда (1936) та Хендріка Вейда Боде (1945) також використовуються для відношень Крамерса–Кроніга загалом або амплітудно-фазового відношення зокрема, зокрема у галузі телекомунікацій та теорії управління.

2.2 Відношення Боде та оптичний відгук

Відомо, що одне з основних застосувань відносини посилення/фаза Боде полягає у визначенні оптичних властивостей матеріалів. Цей метод особливо корисний у дальній інфрачервоній області (ІЧ), де не вистачає яскравих когерентних джерел. Натомість зазвичай вимірюють коефіцієнт відображення $R = |r|^2$ як функція частоти ω , де коефіцієнт відображення r є комплексною функцією лінійного відгуку $r = E_{out} / E_{in}$, відношення відображених до падаючих електричних полів. Оскільки джерело некогерентне, ми не можемо використовувати методи інтерференції, які зазвичай допомагають визначити фазу. Отже, тільки $R(\omega)$ зазвичай доступний і потрібно чисельно інтегрувати співвідношення фази / посилення Боде. при $R = G$ визначити фазу $(\omega) = \arg R(\omega)$. Для зразка, коефіцієнт відображення якого вимірюється за нормального падіння, ми використовуємо формулу Френеля для запису 2.6.

$$r = \sqrt{R} e^{i\omega t} = \frac{n+ik-1}{n+ik+1} \quad (2.6)$$

де $n(\omega)$ – показник заломлення, а $k(\omega)$ – коефіцієнт поглинання. Знаючи комплекс $r(\omega)$, ми вирішуємо чисельно для n та k .

На практиці існує низка проблем, найбільш важливими з яких є те, що коефіцієнт відображення $R(\omega)$ може бути виміряний тільки в обмеженому частотному діапазоні, і необхідно зробити деякі правдоподібні припущення, щоб екстраполювати R на всі частоти чисельному інтегруванні співвідношення Боде¹¹. Поки людина працює з нормальним падінням і зразками, метод уможливорює дуже точне визначення фази і, отже, властивостей матеріалу n і k . Дійсно, методика є стандартною для таких вимірів у далекому ГЧ-діапазоні частот.

Для похилого падіння або тонких плівок у багатьох випадках фаза, яка виводиться із співвідношення Боде, недооцінює фактичний зсув фази і, отже, призводить до неправильних висновків для параметрів матеріалу. спонукає ближче поглянути на основну (що лежить в основі) фізику.

2.3 Немінимально-фазові функції

Відношення Боде, рівняння (2.6), є рівністю для набору функцій відгуку, які є аналітичними у верхній напівплощині (і, отже, підпорядковуються співвідношенням КК) і, крім того, не мають нулів у верхній напівплощині. Тим не менш, багато функцій фізичного відгуку, які є причинними і підпорядковуються відношенням КК, мають нулі у верхній напівплощині. Такі функції відгуку мають додаткові затримки фази: запізнення фази на цій частоті більше, ніж передбачено ставленням Боде. Оскільки ці функції відгуку є фізичними, є сенс розглядати ставлення Боде як нерівність над набором функцій фізичного відгуку. Як приклад розглянемо функцію відгуку затримку τ з виходом $y(t) = u(t - \tau)$. Виконавши перетворення Фур'є, ми маємо:

$$y(\omega) = e^{i\omega\tau} u(\omega). \quad (2.6)$$

і ми можемо визначити функцію відгуку затримки як $G_{delay} = e^{i\omega\tau}$. Оскільки $G_{delay}(\omega)$ має суттєву особливість при $|\omega| \rightarrow \infty$, логарифм не аналітичний

на нескінченності, і співвідношення Боде не застосовується. З іншого боку, затримка являє собою фізично можливу причинно-наслідкову функцію, і її дійсні та уявні компоненти $G'(\omega) = \cos\omega t$ і $G''(\omega) = \sin\omega t$ задовольняють КК-співвідношенням.

Ми можемо розрахувати безпосередньо величину та фазу: $|G_{\text{delay}}| = 1$ та $\angle G_{\text{delay}} = \omega t$. Навпаки, якщо немає затримки, то $G_0 = 1$, яка має $|G_0| = 1$, але $\angle G_0 = 0$. Таким чином, ми маємо дві функції відгуку, з рівною амплітудою відгуку, але різняться по фазі. Застосування ставлення Боде до обох функцій відгуку передбачає нульову затримку фази обох. (Показник степеня $n = 0$.)

Ми бачили, що, якщо функція відгуку містить затримку, запізнення фазою перевищуватиме те, що передбачається співвідношенням Боде. Оскільки причинність виключає просування фази, ми укладаємо, що відношення Боде дає мінімальне запізнення фази: такі функції відгуку з мінімальною фазою (MP) мають найменше запізнення фази, яке сумісне з цією величиною відгуку. Функції відгуку з мінімальною фазою (NMP) мають велику затримку фази.

Крім точної затримки, є й інші функції відповіді NMP (НМФ – немінимофазові), які діють як приблизні затримки. Розглянемо сімейство $G_n(\omega)$ раціональних (Pad'e) наближень n -го порядку до одиничної затримки $G_{\text{delay}} = e^{i\omega}$. Перші апроксимації другого порядку:

$$G_1 = \frac{1 + \frac{i\omega}{2}}{1 - \frac{i\omega}{2}} \quad (2.7)$$

$$G_2 = \frac{1 + \frac{i\omega}{2} - \frac{\omega^2}{12}}{1 - \frac{i\omega}{2} - \frac{\omega^2}{12}} \quad (2.8)$$

Усі функції G_n мають одиничну величину (амплітуду). Наприклад:

$$|G_1(\omega)| = \sqrt{\left[\left(\frac{1 - \frac{i\omega}{2}}{1 + \frac{i\omega}{2}}\right) * \left(\frac{1 + \frac{i\omega}{2}}{1 - \frac{i\omega}{2}}\right)\right]} = 1 \quad (2.9)$$

Такі функції відгуку з відгуком на одиницю величини всіх частотах називаються всепрохідними функціями. (Через цю властивість розкладання Пада

корисніше, ніж розкладання Тейлора.) Тут ми можемо легко перевірити, що високочастотне фазове запізнення G_n дорівнює $n\pi/2$. На малюнку 2.1 (а) показані графіки Бode та відповіді на одиничний крок G_{delay} , G_1 та G_2 . Зазначимо, що G_1 та G_2 дійсно наближають затриману відповідь. Зверніть увагу, що перехідні процеси показують «зворотну відповідь» щодо кінцевого значення. Дійсно, перехідний процес для $G_n(t)$ перетинає нульову вісь n разів, перш ніж перейти до його асимптотичного значення 1. Інша «особливість» апроксимацій Паде полягає в тому, що G_1 і G_2 мають нулі у верхній половині комплексу ω . Площина - як завжди для немінимальних функцій фазового відгуку - і полюса в дзеркальному положенні нижньої половини площини ω (див. рис. 2.1).

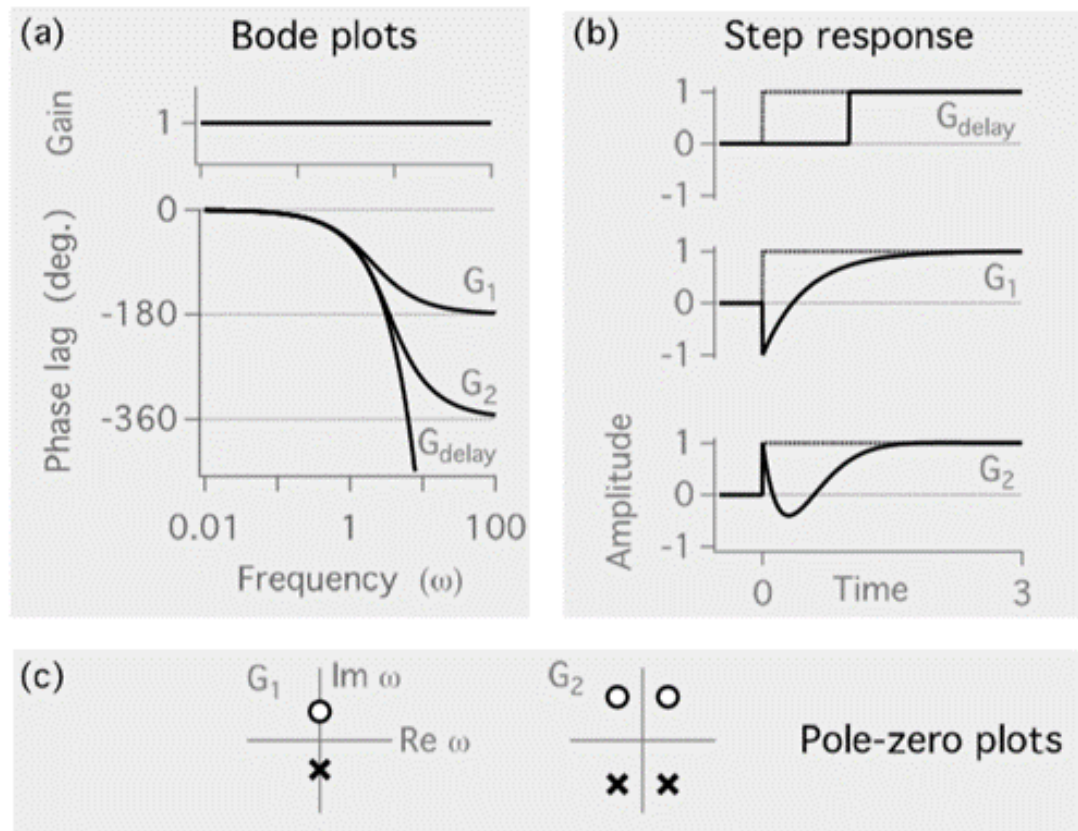


Рис. 2.1. Всепрохідні (всепропускні) наближення до одиничної затримки. (а) Бode графіки G_1 , G_2 та G_{delay} . (б) Відповіді на одиничний крок. (с) Графіки нульового полюса для G_1 ($z = 2i$, $p = -2i$) та G_2 ($z = 3i \pm \sqrt{3}$, $p = -3i \pm \sqrt{3}$). Нулі позначаються через $\circ$, полюси – через $\times$.

Хоча розглянуті вище повнопрохідні функції можуть здатися окремим випадком функцій з нулями у верхній комплексній площині, довільна функція відгуку NMP завжди може бути розкладена на виконання функції мінімальної фази (MP) і всепропускну функцію (AP).

$$G1 = G_{mp}(\omega)G_{ap}(\omega) \quad (2.10)$$

де GMP - мінімальна фаза, а GAP - весь пропускає.

Щоб побачити цей результат, зазначимо, що або $G(\omega)$ вже є мінімальною фазою, або вона має нулі при $\omega = \{iz1, iz2, \dots\}$.

$$G_{ap}(\omega) = \left(\frac{z1+i\omega}{z1-i\omega}\right)\left(\frac{z2+i\omega}{z2-i\omega}\right) + \dots \quad (2.11)$$

яка є всепропускнуою. Зверніть увагу, що оскільки $G(t)$ є дійсним, якщо є комплексний нуль, його сполучене також буде нулем, як видно для $G2(\omega)$ на рис. 2с. Потім ми визначаємо $GMP = G / GAP$, який змінює нулі верхньої площини для їхнього дзеркального відображення в нижній площині. Наприклад,

$$G(\omega) = \underbrace{\frac{1+i\omega}{-\omega^2-2i\omega+2}}_{\text{non-minimum phase}} = \underbrace{\left(\frac{1-i\omega}{-\omega^2-2i\omega+2}\right)}_{\text{minimum phase}} \underbrace{\left(\frac{1+i\omega}{1-i\omega}\right)}_{\text{all pass}} \quad (2.12)$$

Зверніть увагу на рис. 2.2, як нуль $G(\omega)$ при $\omega = i$ був перенесений на всепропускаючу функцію, в той час як мінімафозава функція замінює відбитий нуль при $\omega = -i$. Полюси при $-i \pm 1$ недоторкані.

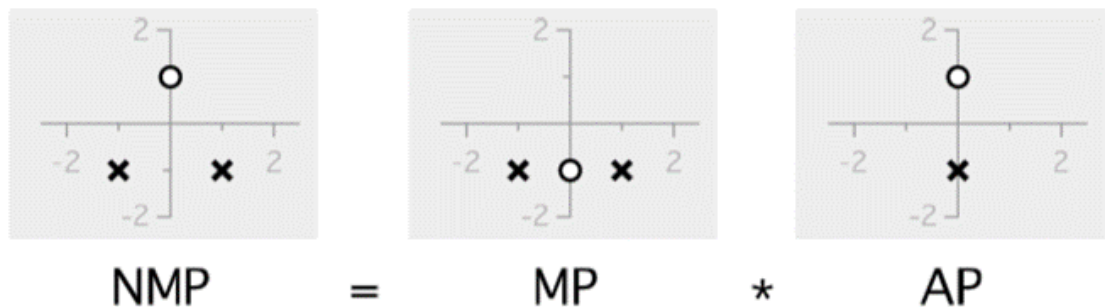


Рис. 2.2. Розкладання немінімофазової функції $G(\omega) = (1 + i\omega)/(-\omega^2 - 2i\omega + 2)$ на добуток мінімофазової функції $(1 - i\omega)/(-\omega^2 - 2i\omega + 2)$ та всепропускнуої функції $(1 + i\omega)/(1 - i\omega)$.

Висновки

У розділі через перетворення Гільберта показано, що, якщо АЧХ мінімально-фазового чотириполюсника на який-небудь частоті досягає максимум, то ФЧХ в цій же частоті проходить через нуль. Також доведено, що чотириполюсники, які не мають нулі передавальної функції в правій півплощині, називаються мінімально-фазовими ланцюгами. А якщо нулі в правій площині є, то чотириполюсники називаються немінімально-фазовими. Перетворення Гільберта є тим самим, що і співвідношення Крамерса-Кронінга.

РОЗДІЛ 3

ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НВЧ ФІЛЬТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SIGNAL HOUND

3.1 Ознайомлення з ПЗ Spike

Для того, щоб взаємодіяти з вимірювальним комплексом Signal Hound, необхідно встановити та відкрити програмне забезпечення Spike. Одразу після запуску, якщо не підключено ніяких зовнішніх пристроїв, ПЗ запитує Вас про зображення демо-версії сигналу.

Відразу запуститься робоче вікно, яке складається з:

1. Menu Bar;
2. Control Panel;
3. Working Window.

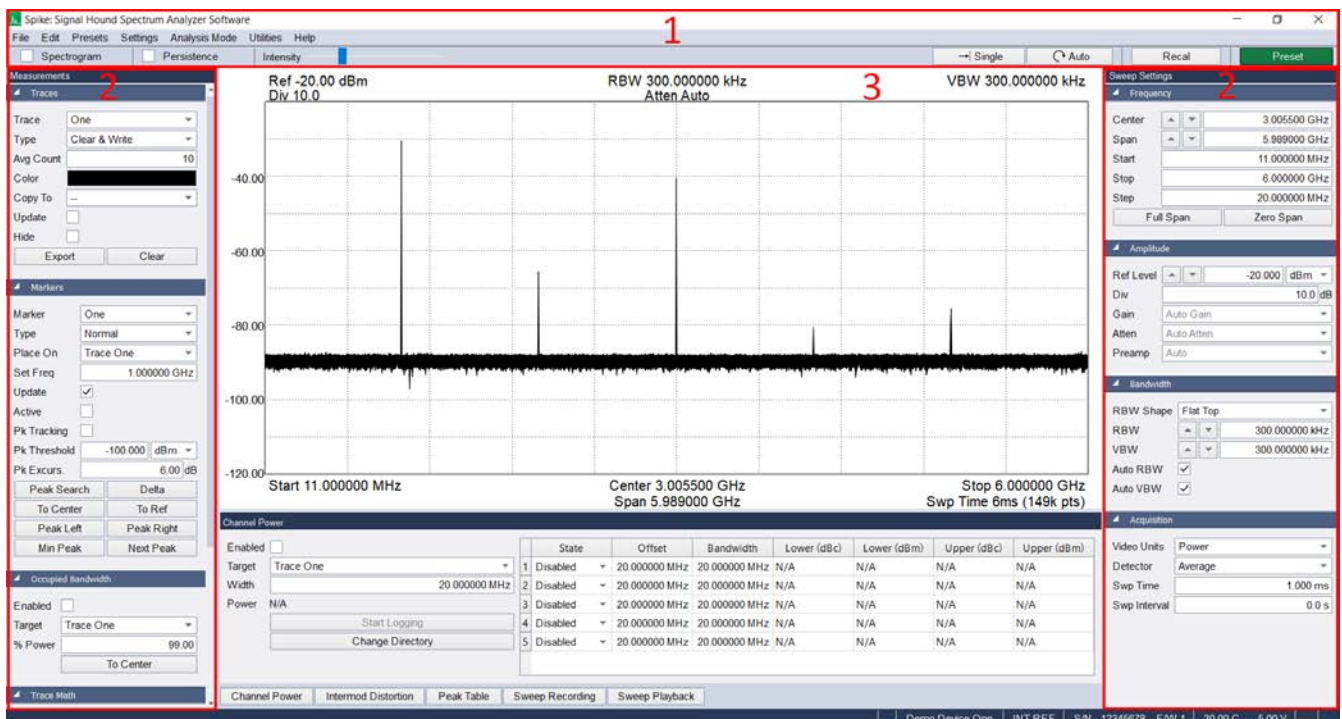


Рис. 3.1. Робочий інтерфейс ПЗ Spike

Working Window:

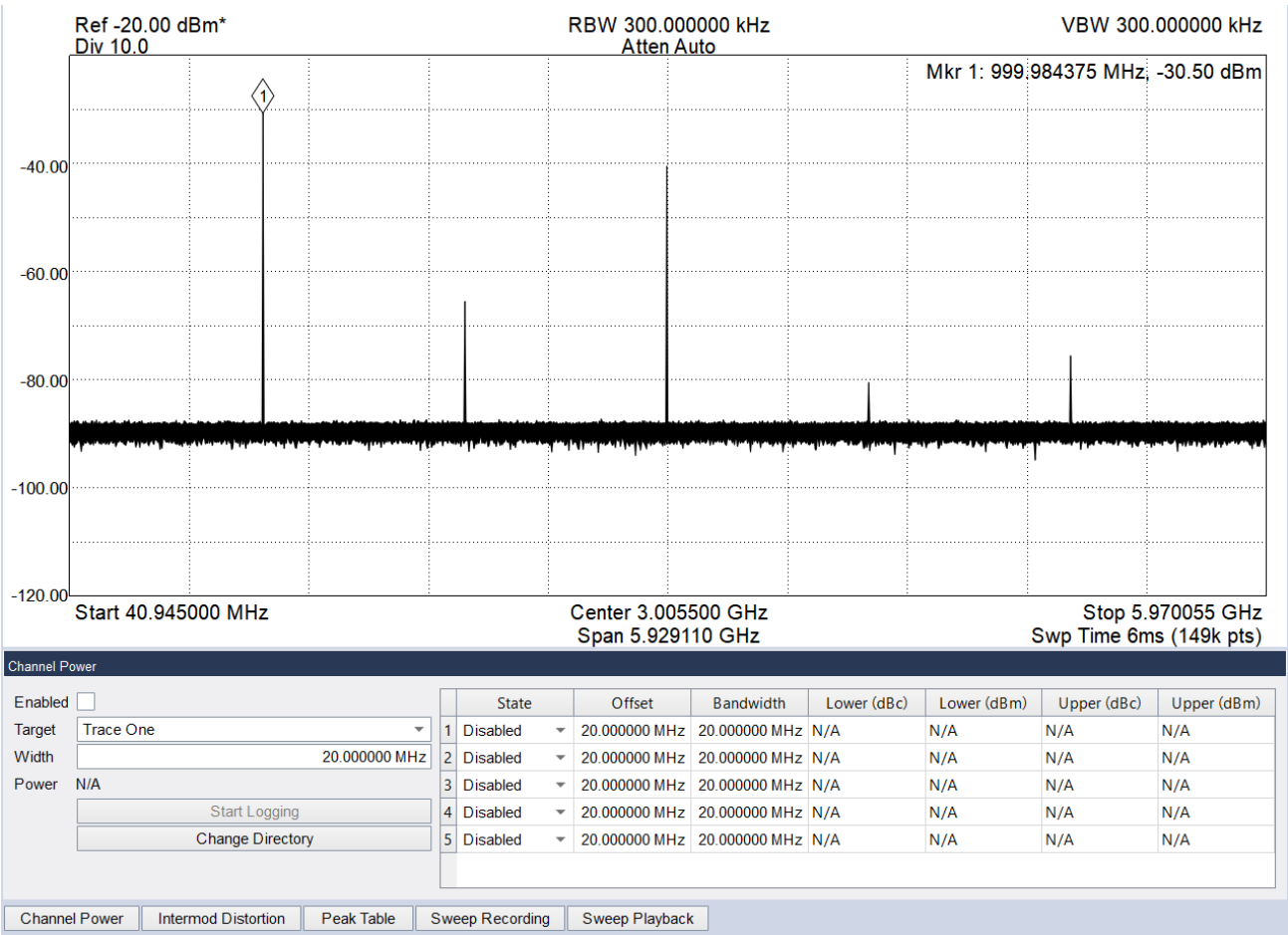


Рис. 3.2. Робочий інтерфейс ПЗ Spike

В цій області відображаються наші характеристики та інформація про них. Також нижче можна побачити додаткові функції до графіку: панель керування потужністю каналу, панель керування інтермодуляційними спотвореннями, таблиця піків та панелі для налаштування запису розгортки

3.2 Опис та налаштування вимірювального комплексу Signal Hound

Перш ніж працювати з пристроями, потрібно їх розглянути:

1. **Signal Hound USB-SA44B** — це аналізатор спектру від 1 Гц до 4,4 ГГц, який підключається до комп'ютера за допомогою USB, і вимірювальний приймач із попереднім радіочастотним підсилювачем. [6]



а)



б)

Рис. 3.3. Signal Hound USB-SA44B. а) Аналізатор спектру. б) З'єднання з ПК

- **На передній панелі** є радіочастотний вхід SMA 50 Ом. Рекомендовано не перевищувати +20 дБм (0.1 Ватт), інакше можуть виникнути пошкодження. Індикатор READY / BUSY блимає помаранчевим щоразу, коли обробляється команда з комп'ютера.



а)

SMA



б)

Рис. 3.4. а) Передня панель аналізатора спектра. б) Радіочастотний вхід SMA 50 Ом

- **На задній панелі є три роз'єми:**

1) Опорний вхід 10 МГц, автоматично виявляється після завершення кожної розгортки. Використовуйте чисте опорне значення 10 МГц з рівнем > 0 дБм. Рекомендується +13 дБм (0.02 Ватт).

2) Роз'єм USB типу В. Підключіть до ПК за допомогою USB-кабелю, що входить в комплект.

3) Багатоцільовий роз'єм BNC. Він може використовуватися як вихід сигналу самотестування, сигнал синхронізації генератора відстеження.



а)

BNC



б)

Рис. 3.5. а) Задня панель аналізатора спектра. б) Багатоцільовий роз'єм BNC

2. **Signal Hound USB-TG44A** — це генератор відстеження від 10 Гц до 4,4 ГГц, який підключається за допомогою USB та працює аналізаторами спектру, полегшуючи вимірювання скалярного аналізатора мережі. [7]



a)



б)

Рис. 3.6. Signal Hound USB-TG44A а) Детальний вид. б) Загальний вид

- **На передній панелі** є радіочастотний вхід SMA 50 Ом. Не подавайте сигнал або постійний струм до цього порту. Це вихід із сполученням постійного струму. Застосування постійного струму або сигналів, що перевищують +20 дБм (0.1 Ватт), призведе до пошкодження. Індикатор READY / BUSY блимає оранжевим щоразу, коли обробляється команда з комп'ютера.



Рис. 3.7. Передня панель генератора частот та радіочастотний вхід SMA 50 Ом

- **На задній панелі** є три роз'єми:
 - 1) Опорний вихід 10 МГц.
 - 2) Роз'єм USB типу B. Підключіть до ПК за допомогою USB-кабелю, що входить в комплект.
 - 3) TG Sync. Підключіть до порту USB-SA44(B) Sync Out для всіх діапазонів понад 100 кГц.



Рис. 3.8. Задня панель аналізатора спектра та багатоцільовий роз'єм BNC

- **Directional Coupler – 2 GHz – ZFDC-10-5-S+** - спрямований відгалужувач для відгалуження частини електромагнітної енергії з основної каналу передачі у допоміжний.



Рис. 3.9. Directional Coupler

3.3 Порядок вимірювань

Практичне використання буде складатися з декількох частин:

- Підключення аналізатору спектру до ПК та дослідження за допомогою ПЗ;
- Поєднання аналізатору спектра з генератором. Калібрування пристроїв;
- Сумісне використання аналізатору спектра, генератору та досліджуваного фільтра. Калібрування пристроїв;

1. Аналізатор спектра

Для підключення потрібно під'єднати пристрій через USB-кабель type B до ПК. [8]

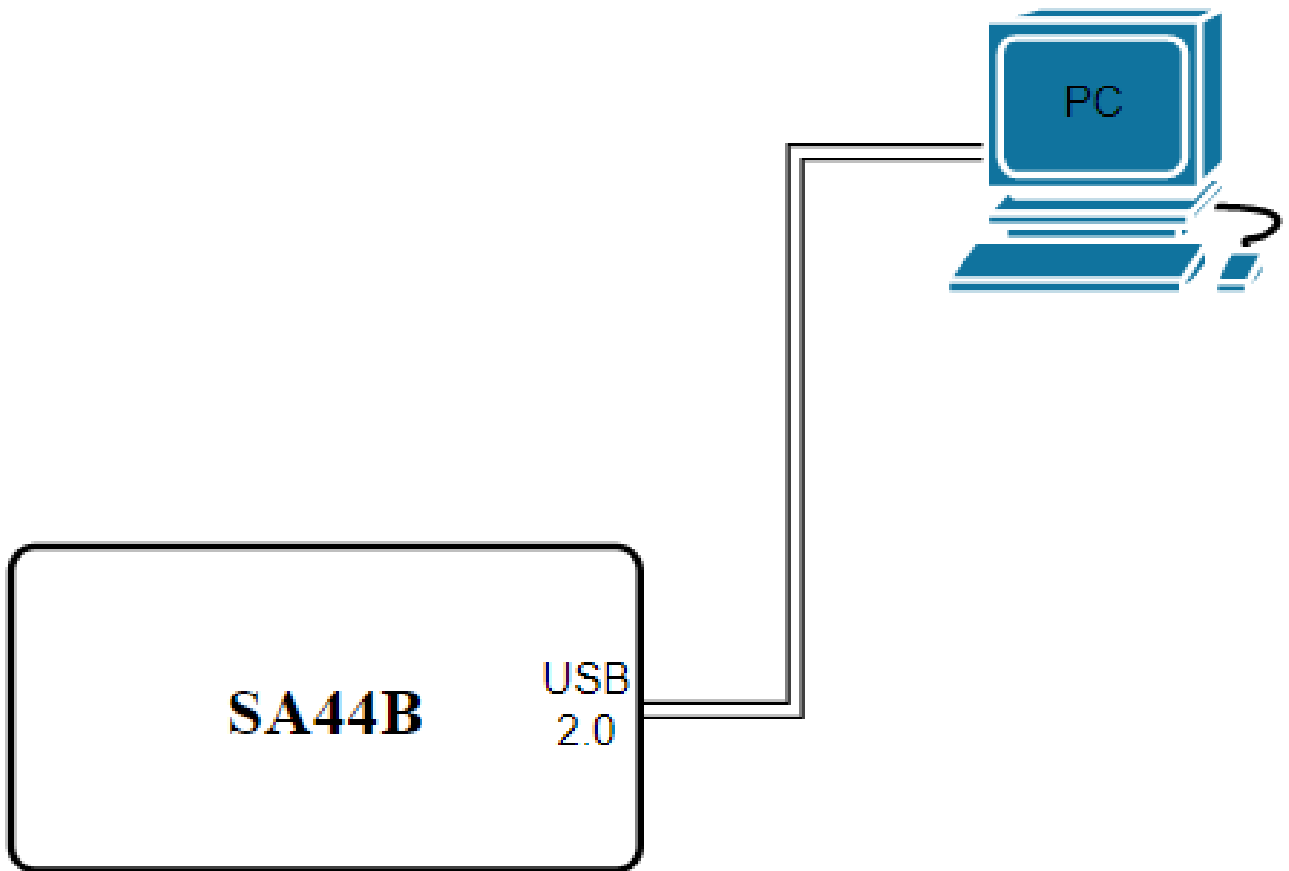


Рис. 3.10. Схема підключення аналізатора спектра до ПК



Рис. 3.11. Схема підключення пристрою до ПК на реальному прикладі

Запускаємо ПЗ Spike. Для дослідження пристрою необхідно в ПЗ Spike натиснути «**Analysis Mode**» після чого обрати «**Sweep**». Тут можна налаштовувати сигнал, видозмінювати, обирати інші функції тощо.

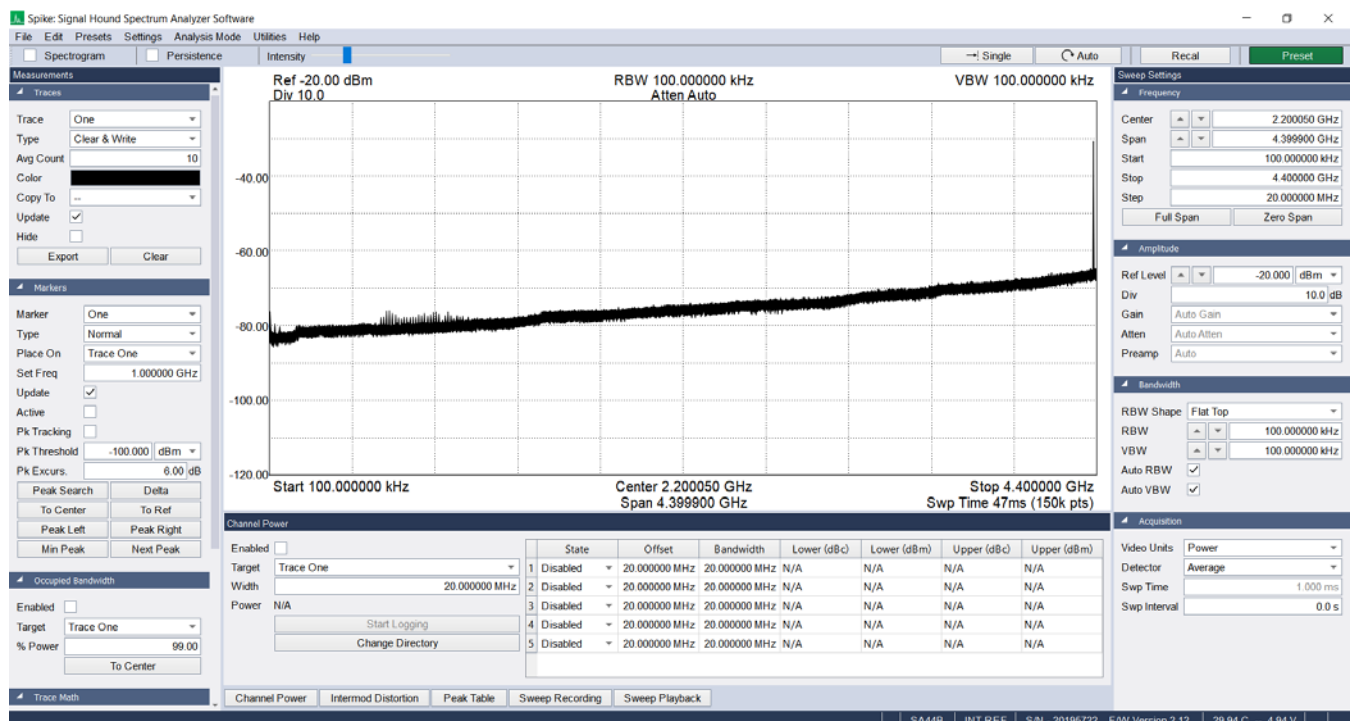


Рис. 3.12. Робоче вікно в ПЗ Spike (Analysis Mode – Sweep)

2. Аналізатор спектра + генератор

Для підключення потрібно під'єднати пристрої через USB-кабель type B до ПК, між собою за допомогою кабелю BNC та перехідника female-female SMA.

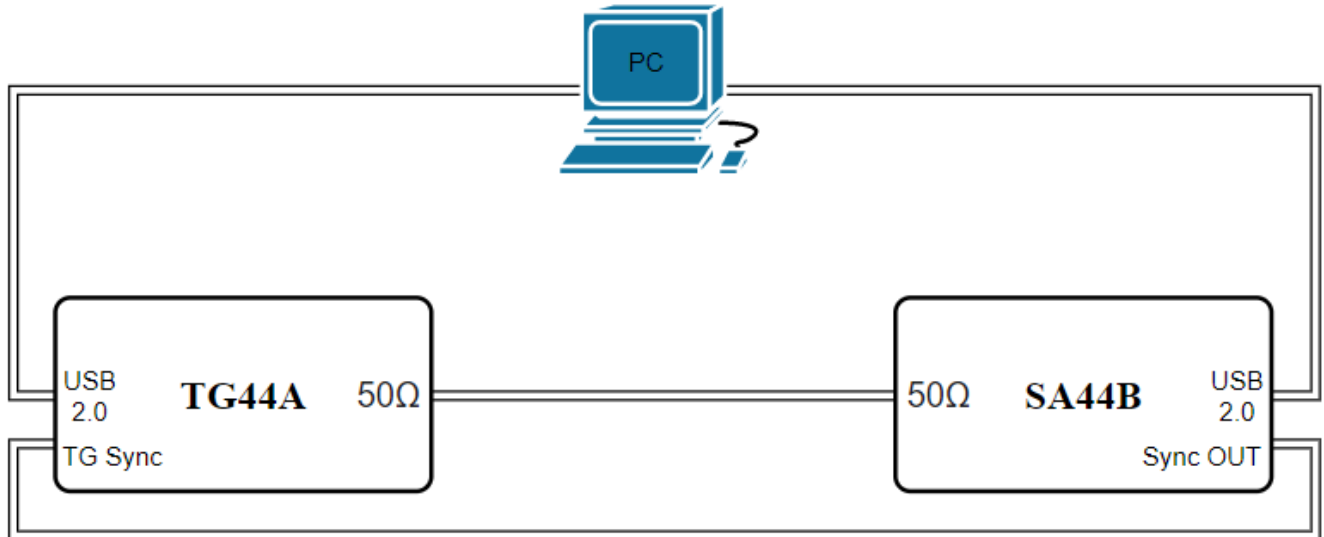


Рис. 3.13. Схема підключення аналізатора спектра + генератора до ПК



а)



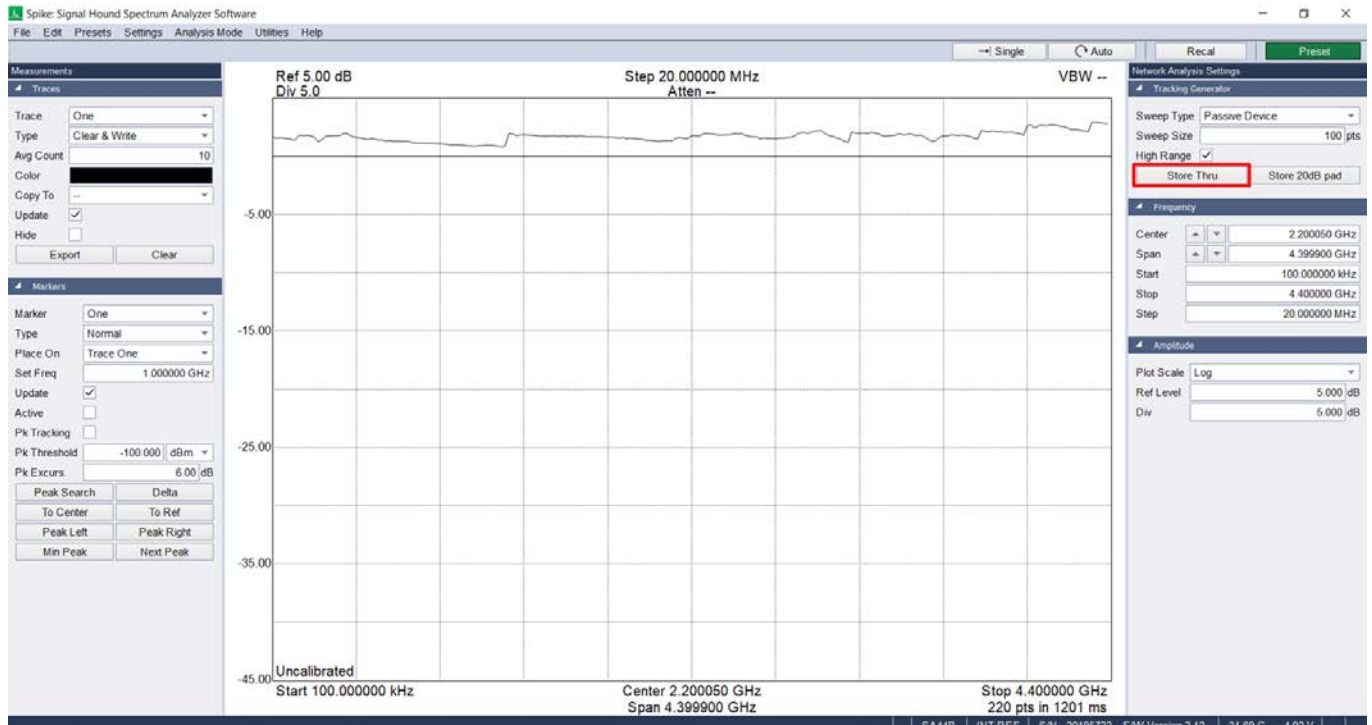
б)

Рис. 3.14. Схема підключення пристроїв до ПК на реальному прикладі в режимі калібровки. а) Загальний вид. б) Детальний вид.

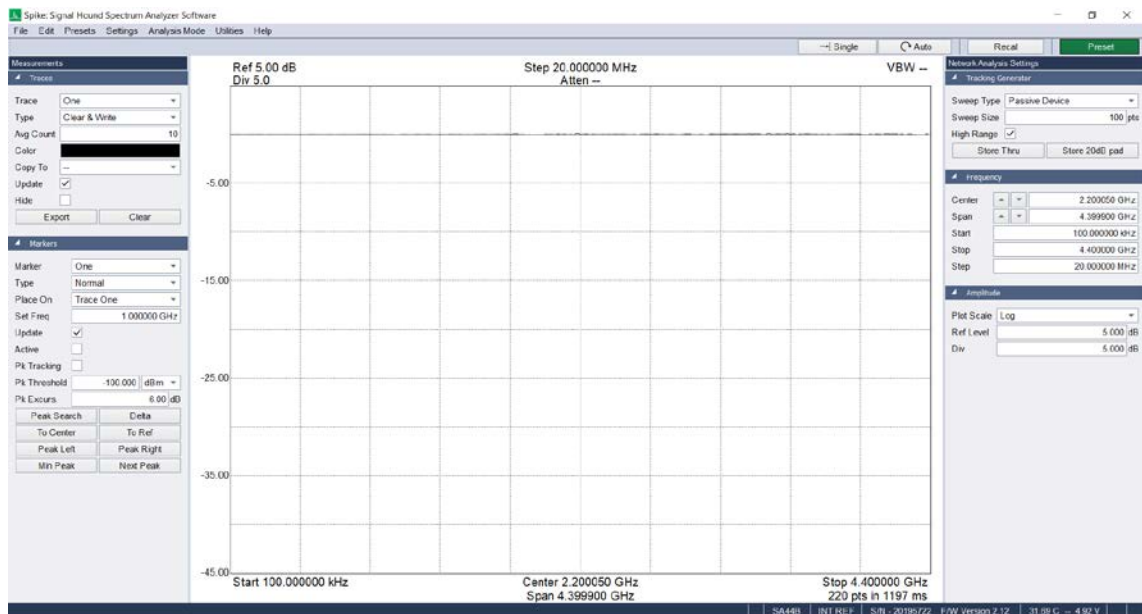
Для дослідження стенду вам необхідно в ПЗ Spike натиснути «**Analysis Mode**» після чого обрати «**Scalar Network Analysis**». Тут можна налаштовувати сигнал, видозмінювати, калібрувати тощо.

3.3.1 Калібрування пристроїв

Перш ніж досліджувати сигнал, його потрібно правильно відкалібрувати. Калібрування відбувається тільки за допомогою пристроїв аналізатора та генератора (рис. 3.14). Для цього необхідно встановити потрібний частотний діапазон та кількість точок відображення. Далі натиснути кнопку «**Store Thru**». Нижче наведені малюнки ДО та ПІСЛЯ калібрування пристроїв.



a)

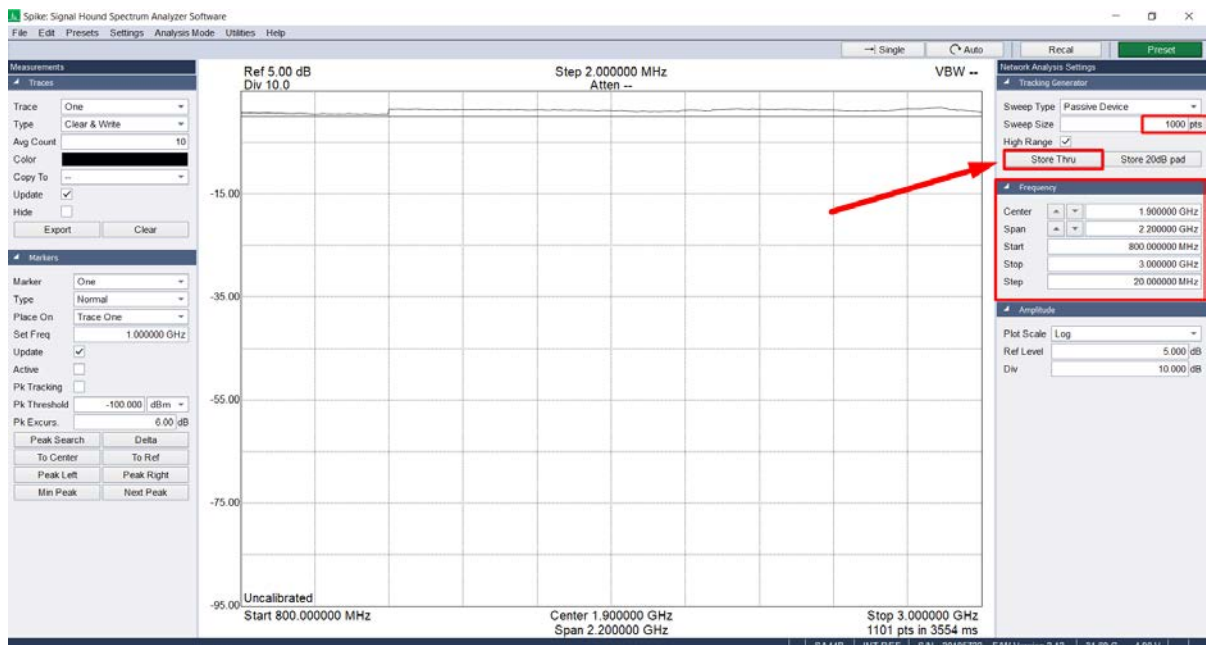


б)

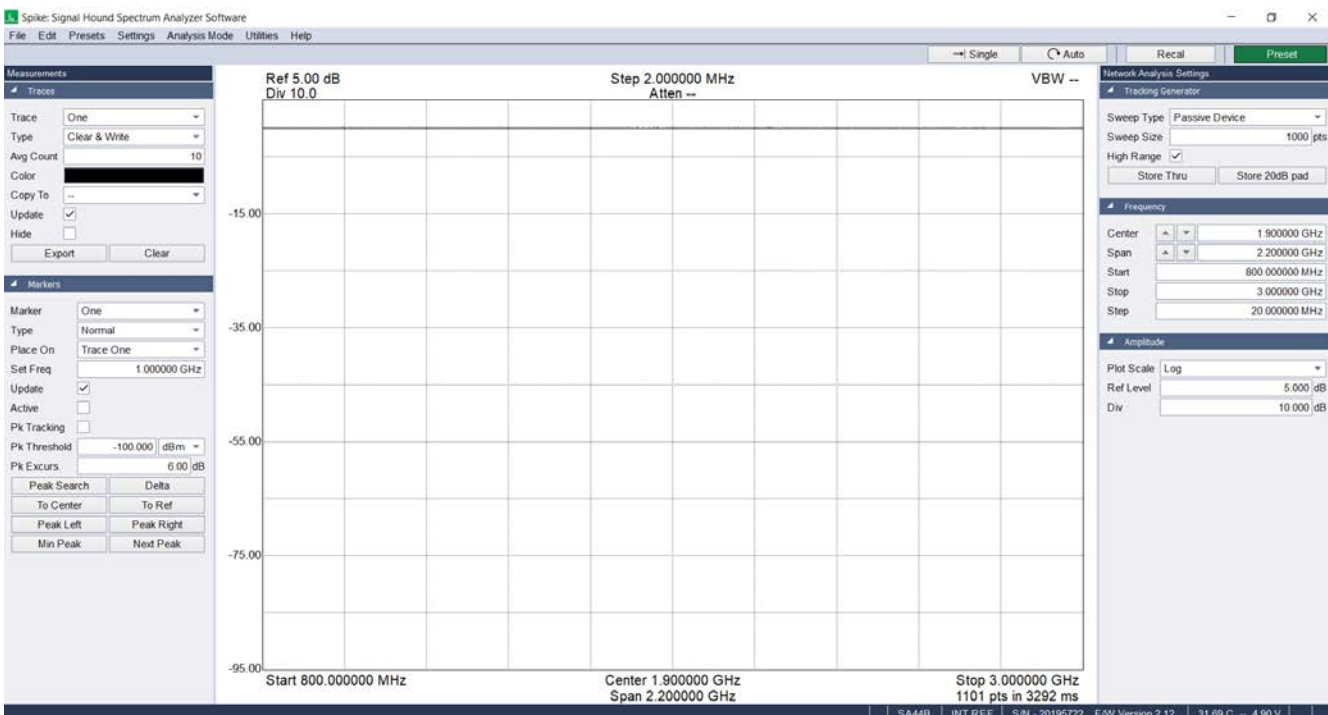
Рис. 3.15. Робоче вікно в ПЗ Spike (**Analysis Mode – Scalar Network Analysis**).
Калібрування пристроїв для частоти 0.1 – 4.4 GHz та 100 точок. а) До калібрування.
б) Після калібрування

Примітка: у разі зміни частотного діапазону або кількості точок відображення, вимірюваний комплекс слід заново калібрувати.

Нижче наведений приклад з іншою частотою та кількістю точок відображення:



а)



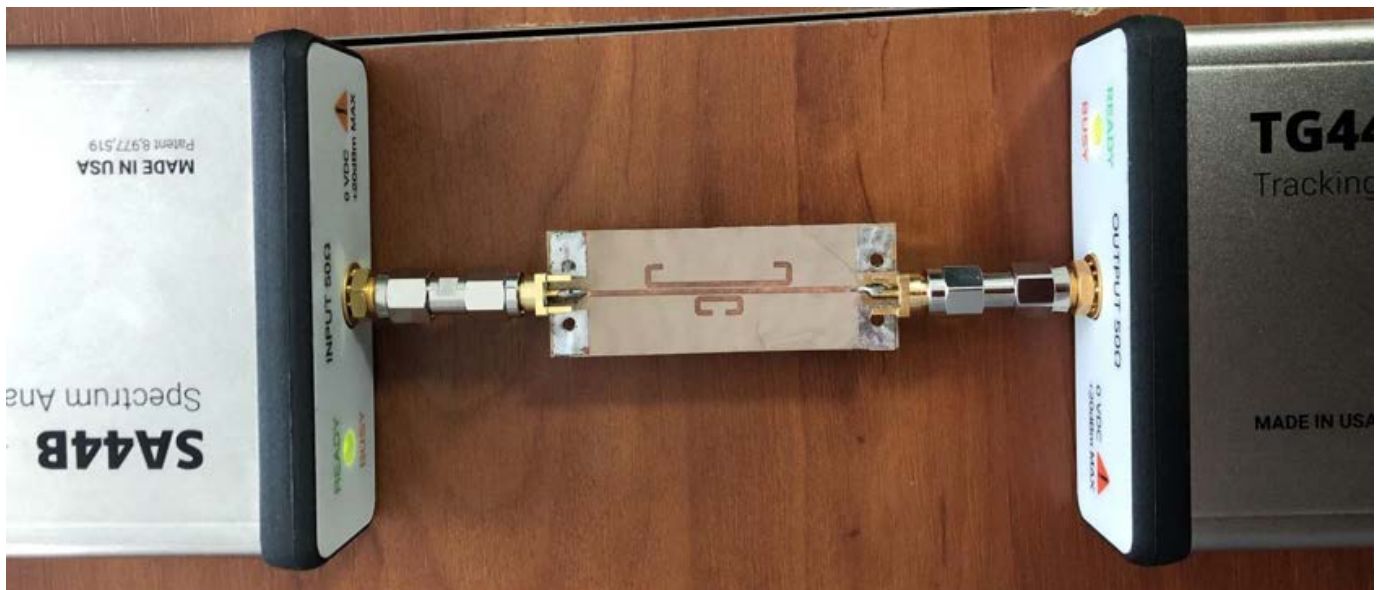
б)

Рис. 3.16. а) Зміна калібруючих даних (0.8 – 3 GHz та 1000 точок). б) Результат зміни

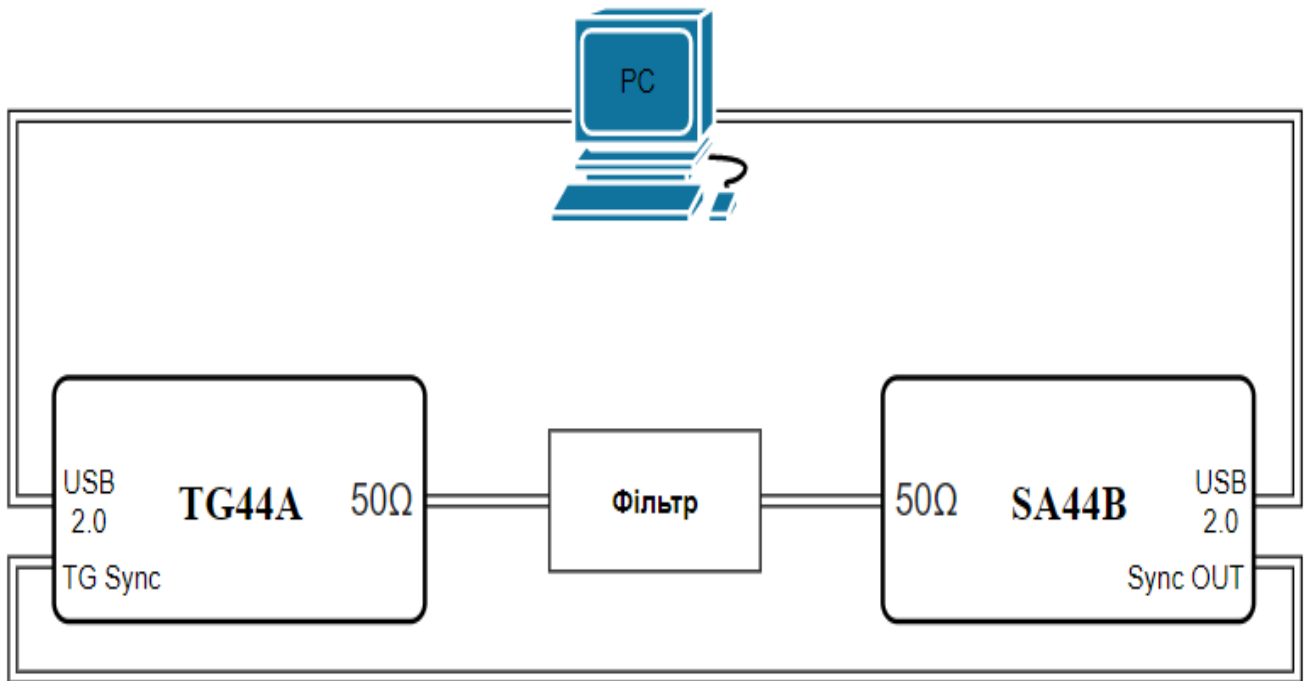
3. Аналізатор спектра + генератор + досліджуваний фільтр (DUT Device Under Test)

У розділі експериментально досліджується мікросмуговий режекторний фільтр на базі комірки метаматеріалів [9]. Фільтр виготовлений на підкладці матеріалу ФЛАН-10 (діелектрична проникність $\varepsilon=9.8$, товщина підкладки – 1мм). Для вимірювань амплітудної характеристики коефіцієнта передачі фільтра $|S_{21}|$ були використані аналізатор спектру Signal Hound USB-SA44B та генератор Signal Hound USB-TG44A (схема вимірювань представлена на рис. 3.17 (б)). На відміну від професійних векторних аналізаторів мереж, обладнання Signal Hound у подібній конфігурації не дозволяє проводити вимірювання фазових характеристик об'єктів, що досліджуються.

Для підключення потрібно під'єднати пристрої через USB-кабель type B до ПК, між собою за допомогою кабелю BNC та між ними фільтр за допомогою переходників female-female SMA.



a)



b)

Рис. 3.17. а) Схема вимірювань б) Вимірюваний режекторний (bandstop) фільтр

Однак для фільтрів з кількома паралельними каналами передачі енергії, до яких відноситься і досліджуваний зразок (у ньому два паралельні канали передачі енергії – по одному через кожен резонатор), існує однозначна залежність між коефіцієнтами передачі та відображення. Таким чином, якщо визначені коефіцієнти зв'язку першого та другого резонаторів з лінією передачі, можна за відомими аналітичними виразами побудувати частотні характеристики коефіцієнта відображення S_{11} , так і фазові характеристики коефіцієнта передачі S_{21} і відповідні їм характеристики групового часу затримки (Group Delay - GD). Але перш ніж досліджувати сигнал, його потрібно правильно відкалібрувати. Калібрування відбувається тільки за допомогою пристроїв аналізатора та генератора.

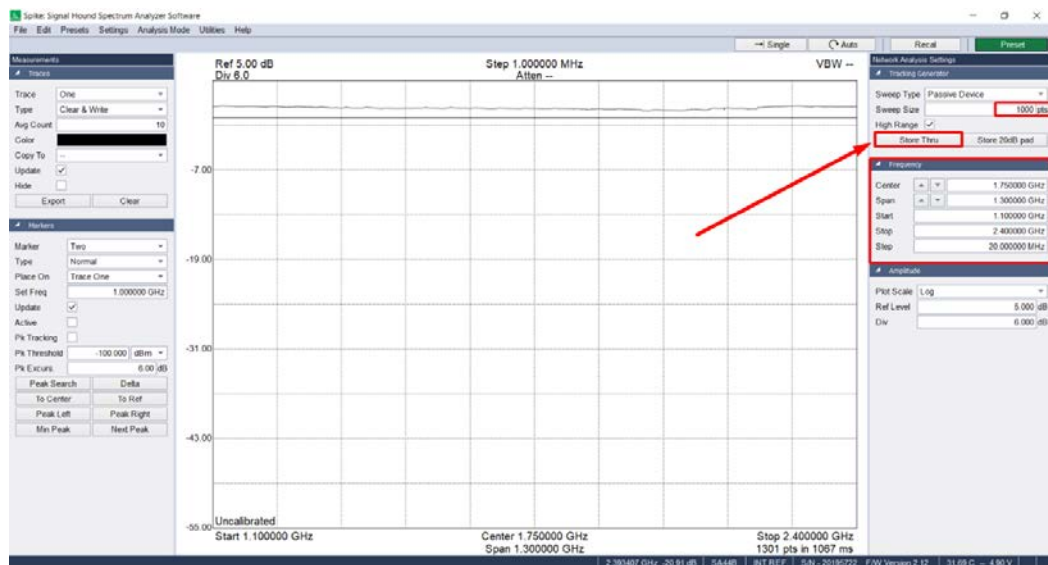
Для дослідження стенду вам необхідно в ПЗ Spike натиснути «**Analysis Mode**» після чого обрати «**Scalar Network Analysis**».

Тут є два варіанти перш ніж продовжувати:

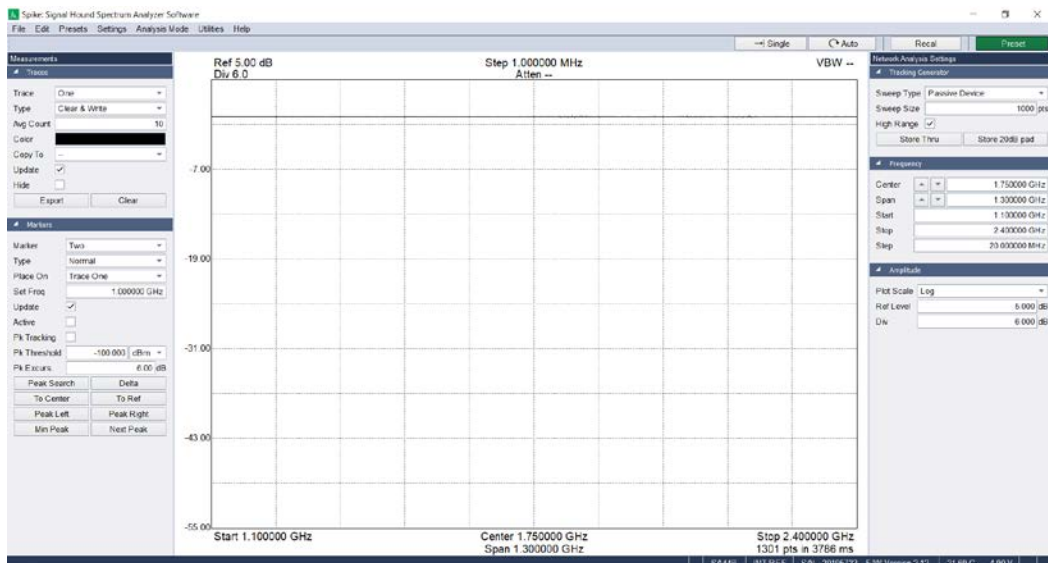
1. Одразу підключити досліджуваний фільтр до аналізатора спектру та генератора. Після цього визначитись з частотним діапазоном та кількістю

точок відображення. Від'єднати фільтр та з'єднати аналізатор та генератор між собою для калібрування. Після калібрування знову під'єднати фільтр.

2. Заздалегідь визначитись з частотним діапазоном та кількістю точок відображення. Відкалібрувати виставлені дані за допомогою аналізатора та генератора. Під'єднати досліджуваний фільтр та спостерігати за сигналом.



a)



б)

Рис. 3.18. а) Робоче вікно в ПЗ Spike (Analisis Mode – Scalar Network Analysis).

б) Результат калібрування пристроїв

На малюнку 3.21 показані виміряні характеристики (від 1 до 5) коефіцієнта передачі фільтра, отримані при зміні резонансної частоти меншого резонатора. Зсув його резонансної частоти «вниз» проводиться насунанням тонкої діелектричної пластини на резонатор.

Щоб зробити декілька різнокольорових кривих на одному графіку, слід скористуватися вкладкою Control Panel в ПЗ Spike. А саме у підвкладці Traces:

- **Traces:**

В цій вкладці можна налаштовувати наші сигнали, їх тип, колір, оновлювати та приховувати сигнал. Avg Count – змінює, скільки розгортку усереднюється разом, коли вибрано середній тип трасування. Поточний підрахунок усереднених розгортку відображається в рядку нижче, коли вибрано середній тип трасування. Також, в результаті АЧХ можна експортувати для дослідження даних в іншому ПЗ.

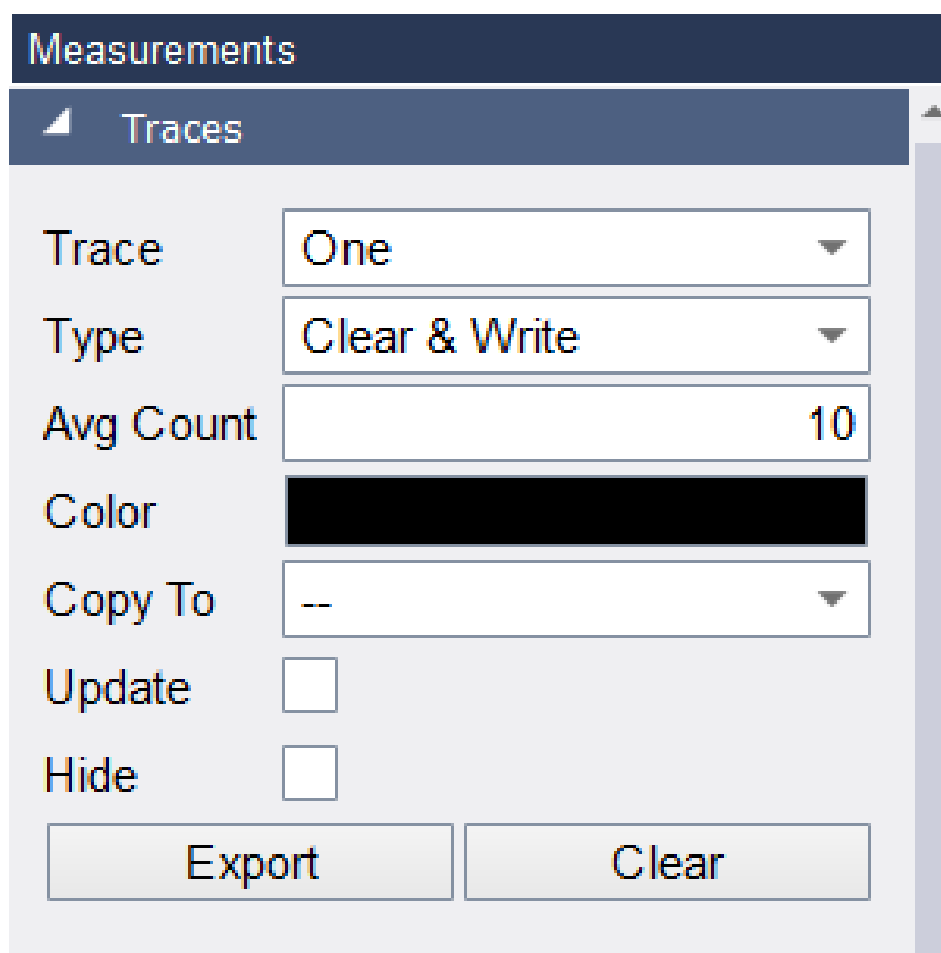


Рис. 3.19. Підвкладка Traces в ПЗ Spike

В цій вкладці можна налаштовувати наші сигнали, їх тип, колір, оновлювати та приховувати сигнал. Avg Count – змінює, скільки розгортки усереднюються разом, коли вибрано середній тип трасування. Поточний підрахунок усереднених розгортки відображається в рядку нижче, коли вибрано середній тип трасування. Також, в результаті АЧХ можна експортувати для дослідження даних в іншому ПЗ.

Отже, дослідивши сигнал та вказавши йому Trace - One, знімаємо галочку з Update, змінюємо параметр Trace на Two, змінюємо колір, вказуємо тип тощо. Результатом має бути графік з декількома кривими.

Також на криві можна встановлювати відповідні маркери на вкладці Markers:

- **Markers:**

Markers	
Marker	One
Type	Normal
Place On	Trace One
Set Freq	1.000000 GHz
Update	☒
Active	☒
Pk Tracking	☐
Pk Threshold	-100.000 dBm
Pk Excurs.	6.00 dB
Peak Search	Delta
To Center	To Ref
Peak Left	Peak Right
Min Peak	Next Peak

Рис. 3.20. Підкладка Markers в ПЗ Spike

За допомогою цієї вкладки можна розташовувати в зручному порядку маркери на графік, а саме: їх тип, кількість, max/min пік і т.д. Яскравим прикладом цих можливостей є малюнок нижче.

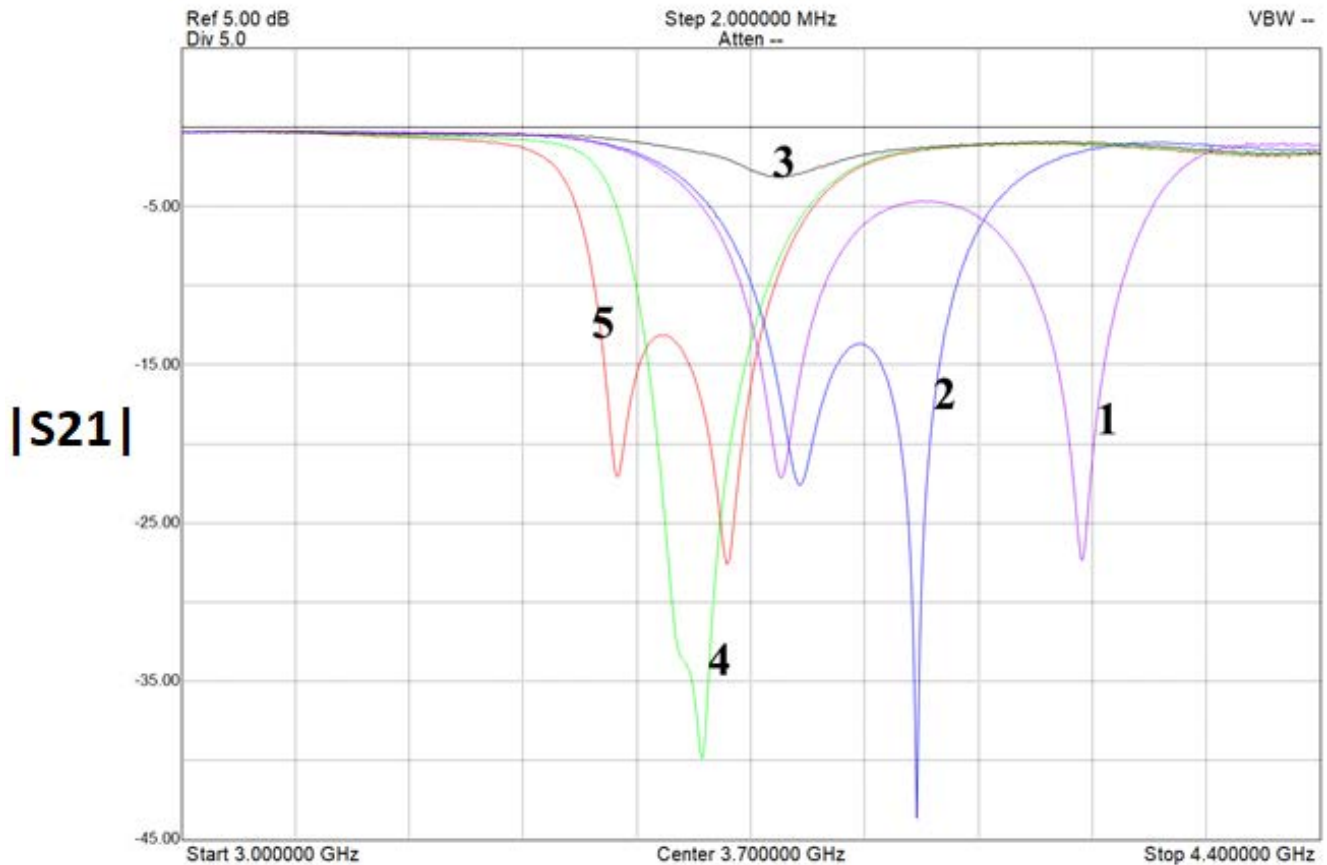
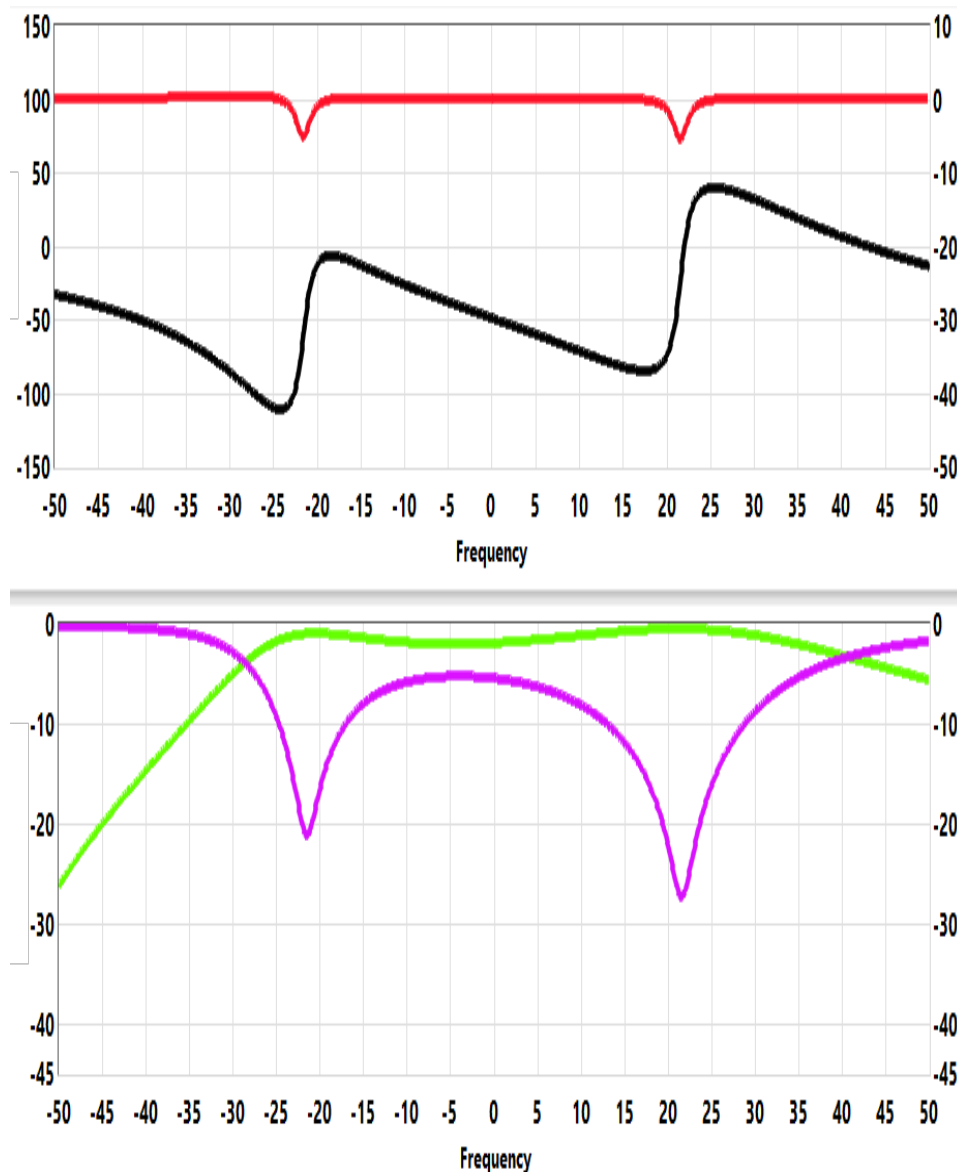


Рис. 3.21. Амплітудна характеристика коефіцієнта передачі смугового фільтра S21: крива 1 – вихідний варіант, резонатори спочатку розстроєні по частоті; крива 2 – резонанс Фано; крива 3 – режим, близький до «вікна прозорості» (частоти коливань резонаторів однакові), крива 4 – режим, близький до резонансу Фано, але видно початок «зняття виродження»; крива 5 — резонансна частота «короткого» резонатора нижче резонансної частоти «довгого» резонатора.

Використовуючи методику для пошуку навантажених добротностей резонаторів, можна апроксимувати (виміряні криві за допомогою програми на базі LabView, підбираючи параметри коефіцієнтів зв'язку резонаторів з лініями K1 і K2, співвідношення їх добротності «b» і відносну структуру «a». » між ними (фіолетова і синя криві на рис. 3.22 а) і б) відповідно, аналогічні криві 1 і 2 на рис. 3.21) і

отримати також «змодельовані» характеристики коефіцієнтів відбитків S11 (зелені криві на рис. 3.22 а) і б)), а також фазові характеристики і ГВЗ (груповий час затримки – Group Delay – GD – червоні і чорні криві на рис. 3.22 а) и б)), відповідному коефіцієнту передачі S21.

Відмітимо, що в області резонансу Фано (аномально високе затухання і висока резонансна характеристика в районі частоти $f = 3.9$ ГГц) фазова характеристика фільтра має дуже крутий нахил [10], що, в свою чергу, призводить до більшого значення Г.Д. . Залежність між різким зміною фази та амплітуди відома в теорії кіл – «зміна затухання, викликане втратами, буде пропорційною «часу затримки».



а)

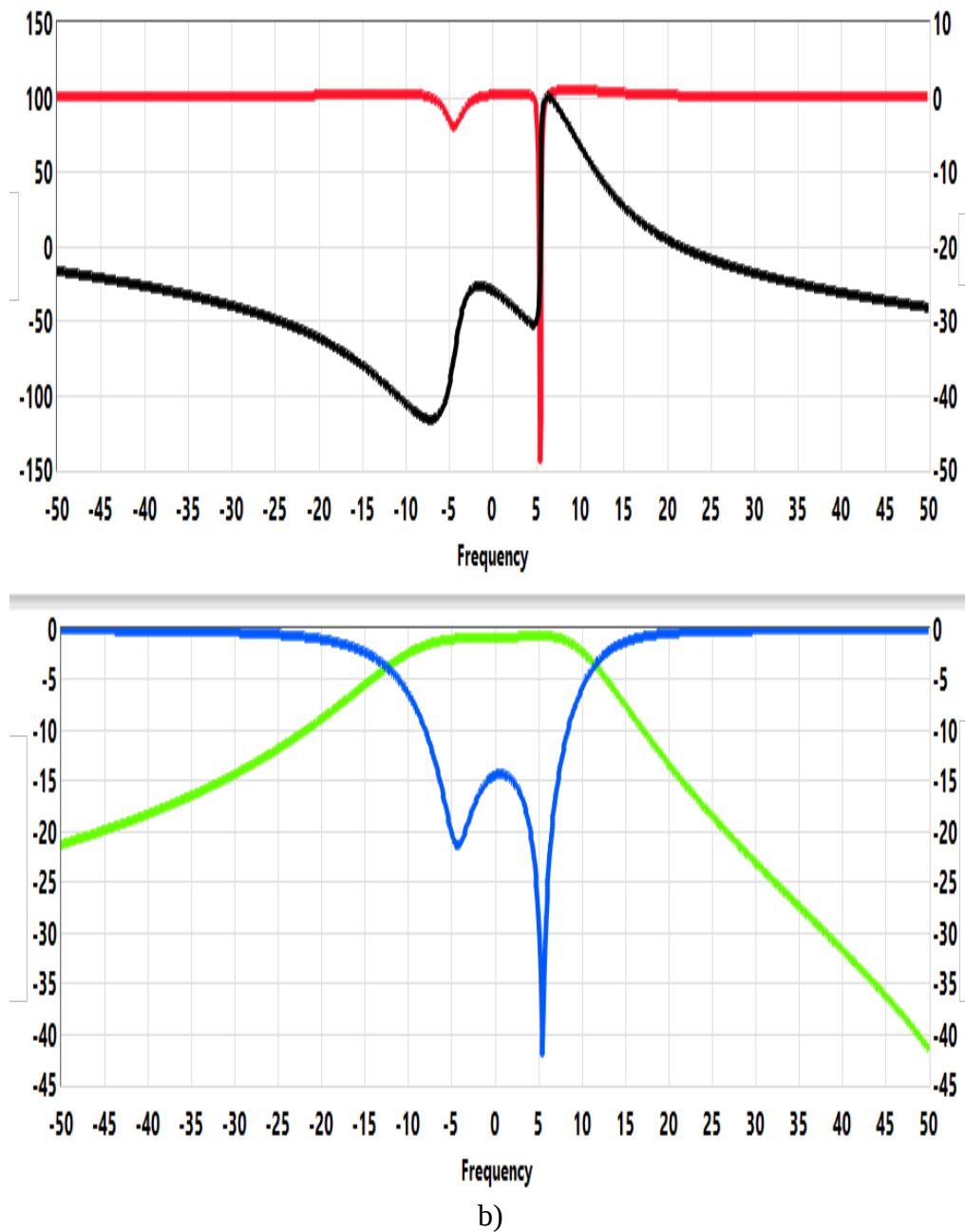


Рис. 3.22. Досліджувані модельовані криві: а) Коефіцієнт передачі S_{21} відповідає кривою 1 на рис. 2, $K_1=8$, $K_2=20$, $a=50$, $b=1$ б) Коефіцієнт передачі S_{21} відповідає кривою 2 на рис. 2, $K_1 = 8$, $K_2 = 18$, $a = 17$, $b = 3$

Таким чином, використовуючи можливості простого та відносно недорогого вимірювального комплексу на базі обладнання Signal Hound з одного боку, а також властивості фільтрів на базі комірок метаматеріалів з іншого, можна моделювати параметри таких структур, що не підлягають вимірюванню, тобто отримувати фазові характеристики і GD.

Висновки

В даному розділі було показано вимірювання НВЧ фільтрів на базі вимірювального комплексу Signal Hound. Детально розібрано як теоретичну, так і практичну частину посібника. Було продемонстровано підключення аналізатору спектру до ПК та дослідження за допомогою ПЗ, поєднання аналізатору спектра з генератором, калібрування пристроїв, сумісне використання аналізатору спектра, генератору та досліджуваного фільтра. Вказано багато нюансів, яких слід дотримуватися для ефективності результатів. Методичний посібник розроблений для поліпшення учбового процесу студентів, а також для покращення результатів досліджень в сфері телекомунікацій.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Моделювання за допомогою програмного забезпечення LabView

Після того, як знайдені виміряні амплітудні характеристики фільтра, визначимо їх фазові характеристики, використовуючи апроксимацію за допомогою програмного забезпечення LabVIEW. За допомогою формул [10], якими можна порахувати коефіцієнт передачі та відбивання, можна порахувати на графіку амплітудні і частотні характеристики 4-полюсника.

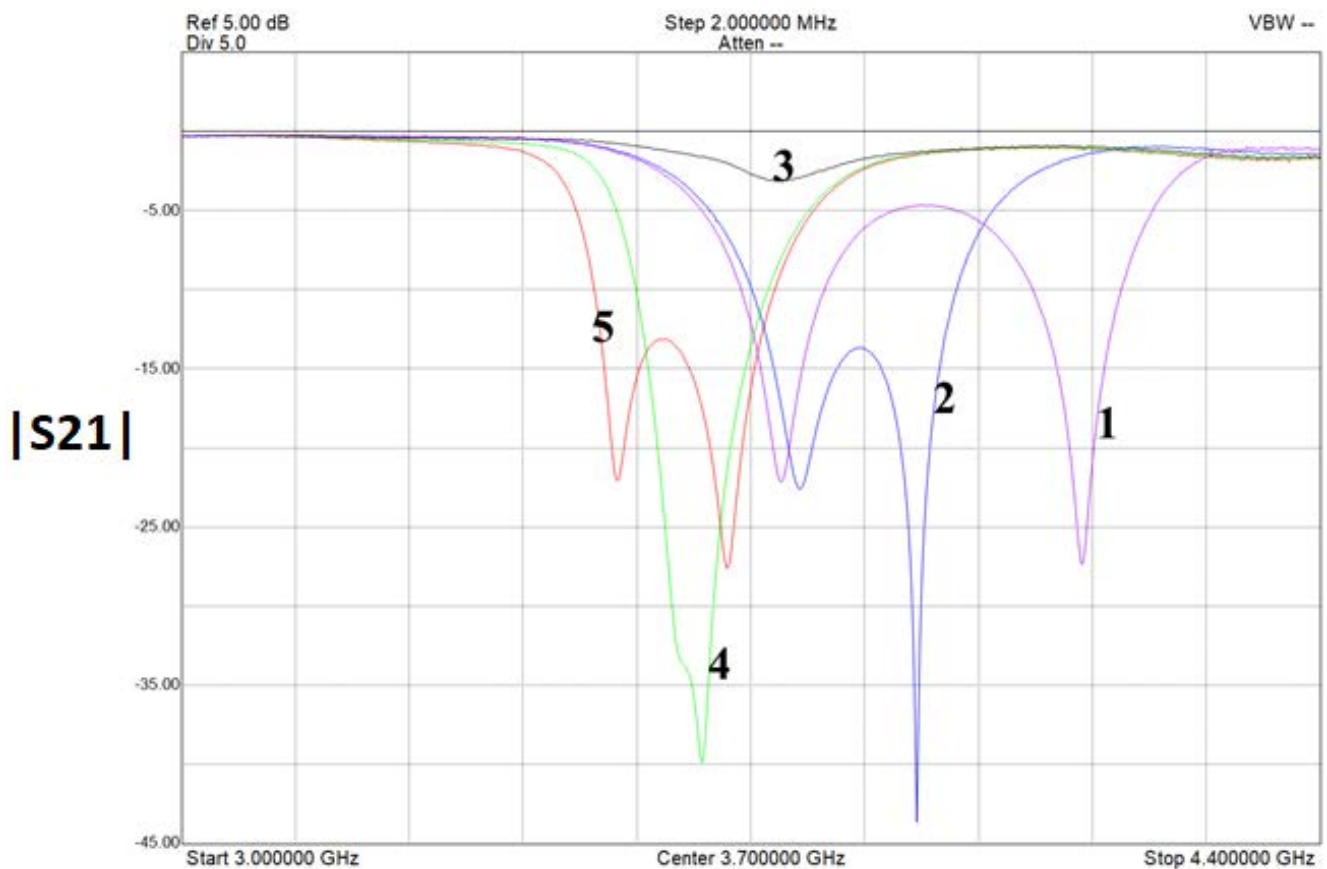


Рис. 4.1. Амплітудна характеристика коефіцієнта передавача смугового фільтра
S21

Для того, щоб максимально точно апроксимувати криві у відповідному ПЗ, необхідно визначити частоту окремих резонаторів, одна з яких f_e та f_m , відповідно електричного та магнітного коливачів, а також добротності фільтра Q_{01} та Q_{02} .

Знаючи ці параметри, можна знайти центральну частоту f_0 за формулою:

$$f_0 = (f_m + f_e)/2 \quad (4.1)$$

Після цього знаходиться параметр a – узагальнена розстройка f_m та f_e частот щодо f_0 .

$$a = 2(f_e - f_m)/(f_e + f_m) * \sqrt{Q_{01} * Q_{02}} \quad (4.2)$$

Та параметр b – відношення добротностей.

$$b = \sqrt{\frac{Q_{01}}{Q_{02}}} \quad (4.3)$$

Далі визначаються K_1 (K_m), K_2 (K_e) - коефіцієнти зв'язку резонаторів лінії електропередачі:

$$K_1 = K_1/(1 + j(\xi + a)) \quad (4.4)$$

$$K_2 = K_2/(1 + j(\xi - a) * b) \quad (4.5)$$

Де:

$$K_1 = Q_{01}/Q_{ext1} \quad (4.6)$$

$$K_2 = Q_{02}/Q_{ext2} \quad (4.7)$$

Q_{01} та Q_{02} – власні добротності та Q_{ext1} з Q_{ext2} – зовнішні добротності

Далі визначаємо коефіцієнти передачі T та відбивання R :

$$T = S_{21} = \frac{K_2}{(1+K_2)} - \frac{K_1}{(1+K_1)} \quad (4.8)$$

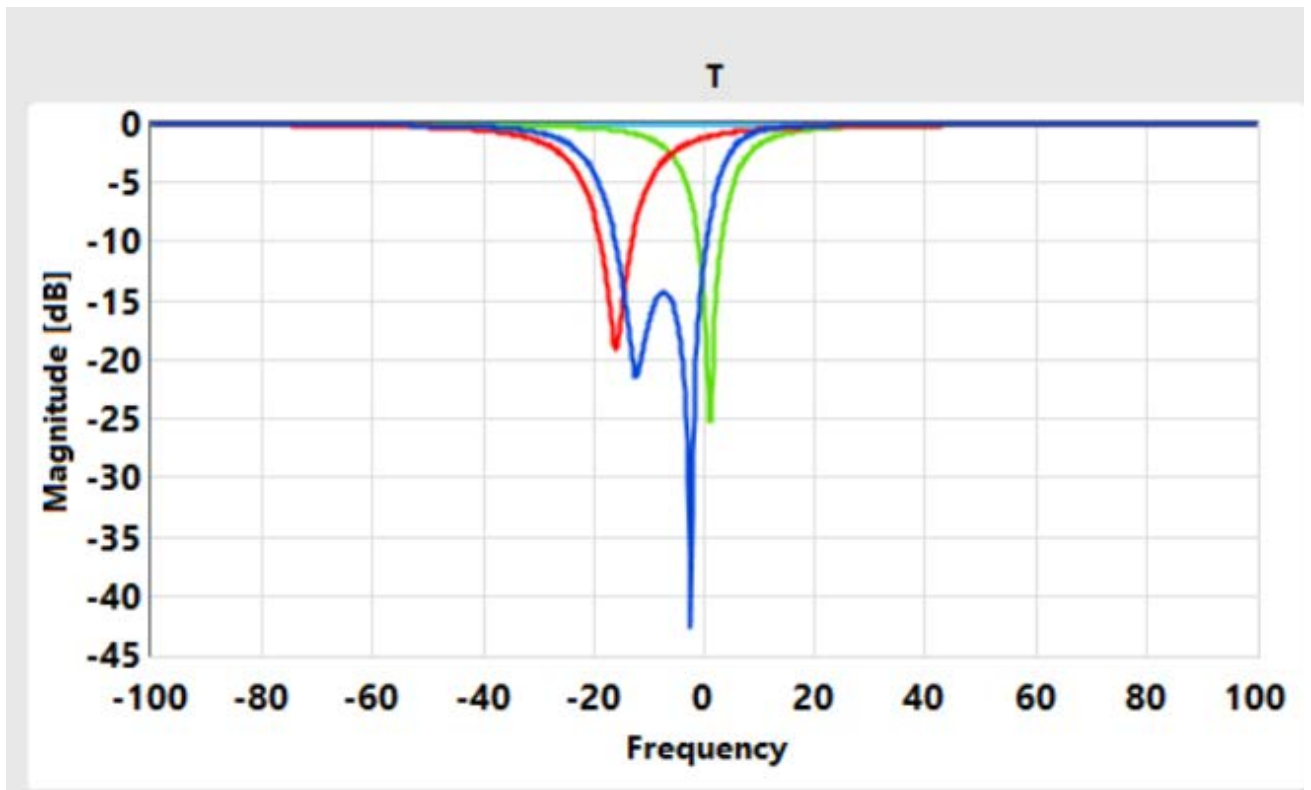
$$R = S_{11} = 1 - \frac{K_1}{(1+K_1)} - \frac{K_2}{(1+K_2)} \quad (4.9)$$

ξ - це узагальнене розстройка частоти відносно центральної частоти f_0 фільтра.

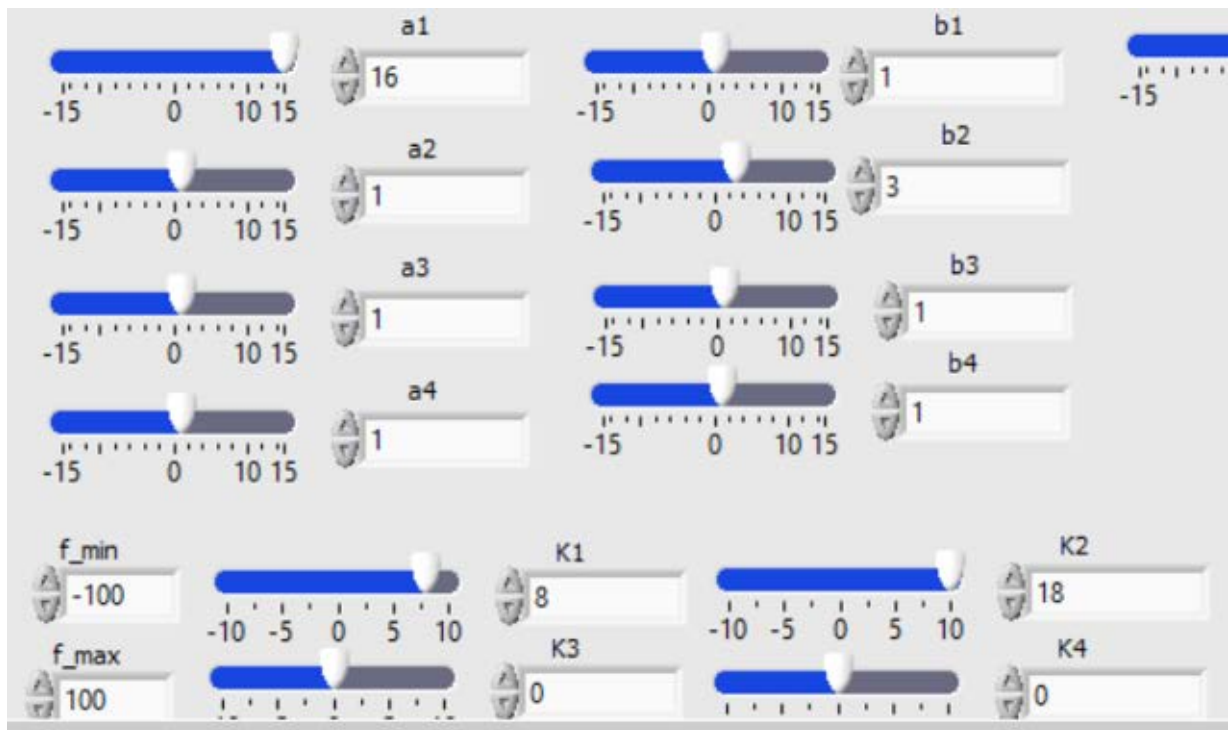
$$\xi = 2(f - f_0)/(f + f_0) * \sqrt{Q_{01} * Q_{02}} \quad (4.10)$$

Отже, знаючи всі необхідні параметри можна апроксимувати криві, змінюючи параметри K_1 , K_2 та a у програмі LabVIEW.

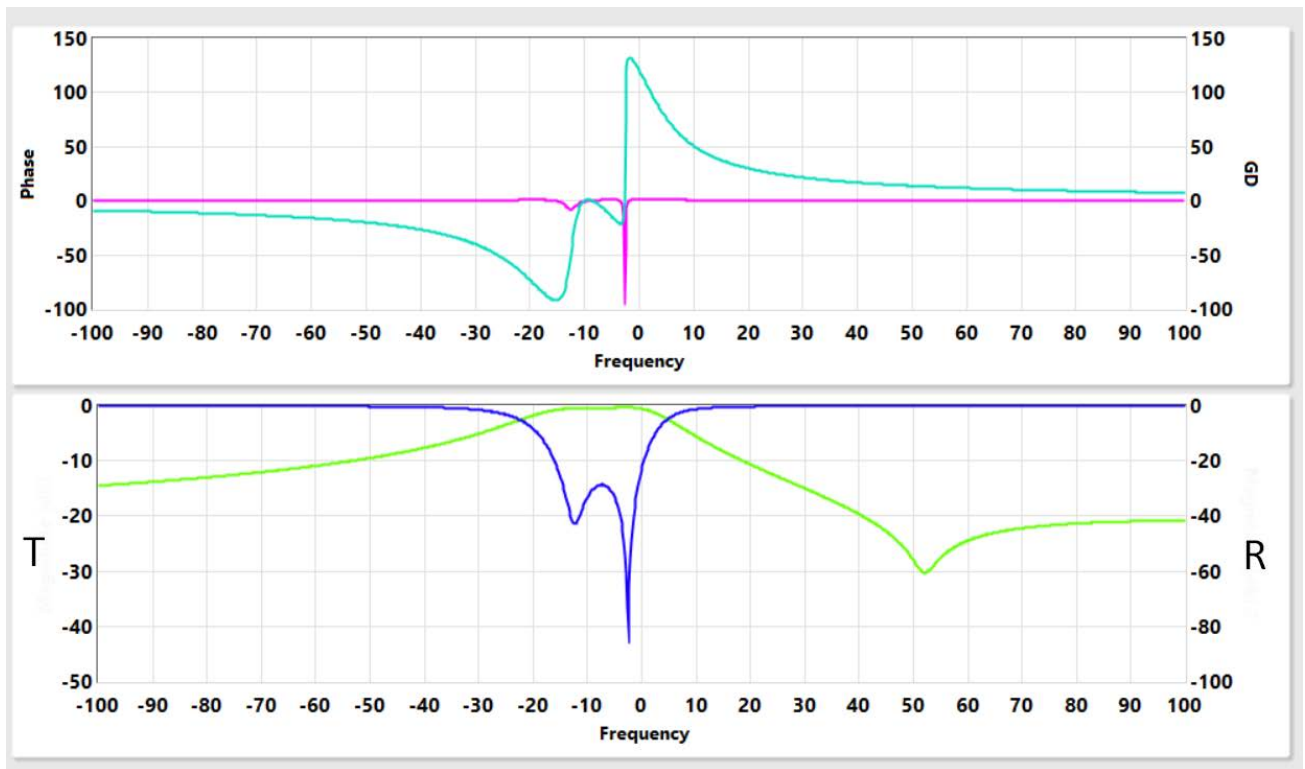
Для прикладу візьмемо криві 2 з рисунку 4.1.



a)



b)



в)

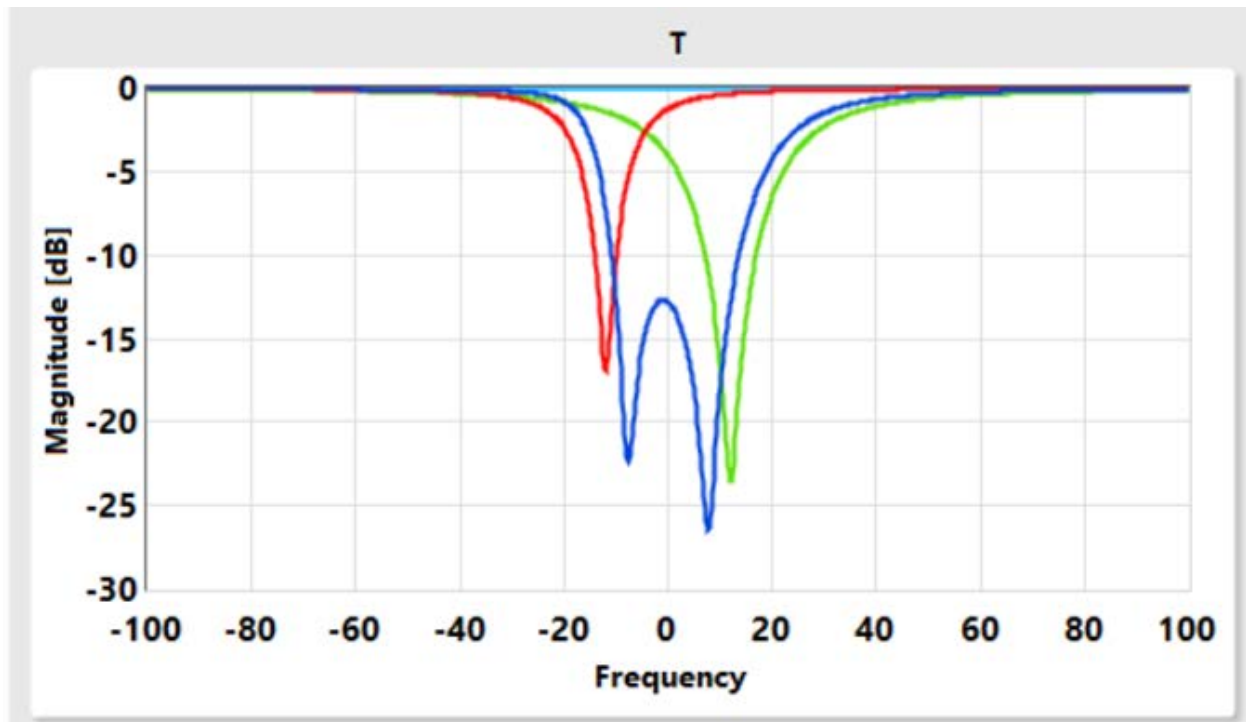
Рис. 4.2. а) Апроксимована крива 2. б) Параметри кривої. в) S21, S11, GD and Phase

На малюнку вище апроксимовано криву 2, де в результаті демонструється коефіцієнт передачі та відбивання, а також їх фаза (Phase).

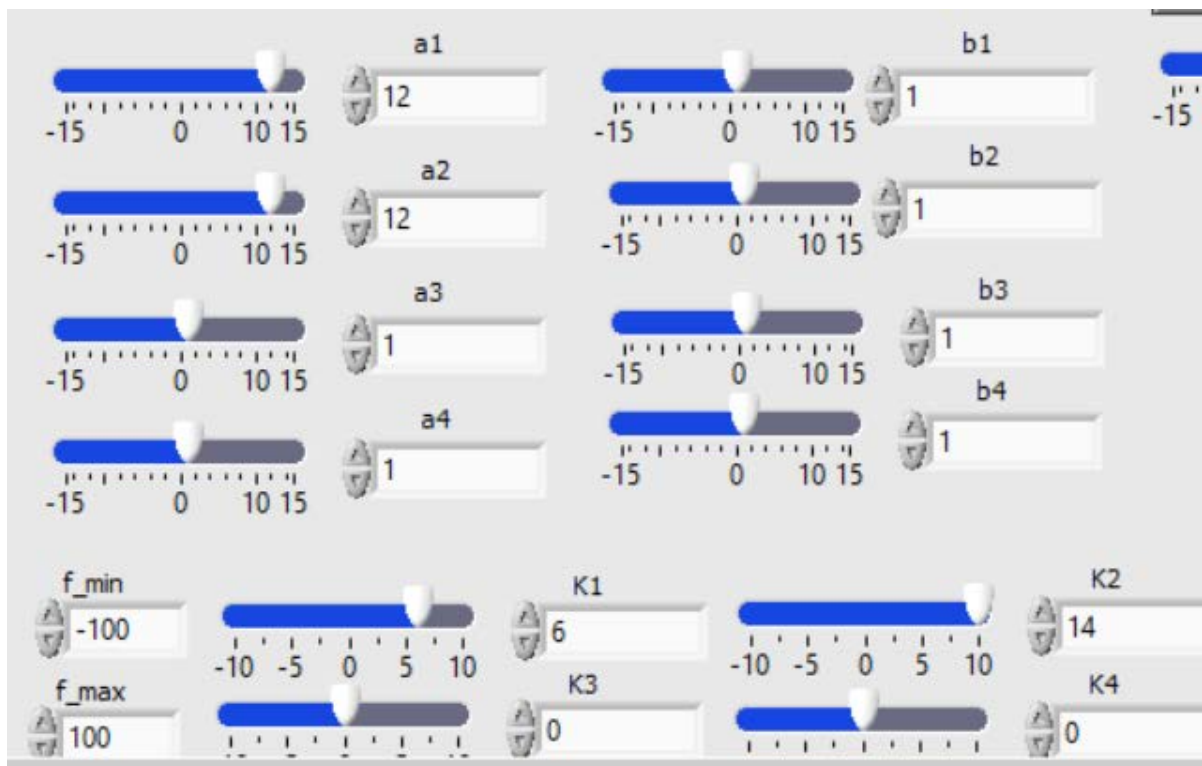
В даному випадку нас цікавить коефіцієнт передачі, де можна спостерігати важливу особливість фільтрів - резонанс Фано (метаматеріальний ефект) – точка, де амплітуда дорівнює нулю (або дуже мала), і вона знаходиться між резонансними частотами окремих коливань (резонаторів).

В результаті апроксимації криві мають параметри: $K1 = 8$, $K2 = 18$, $a = 16$, $b = 3$.

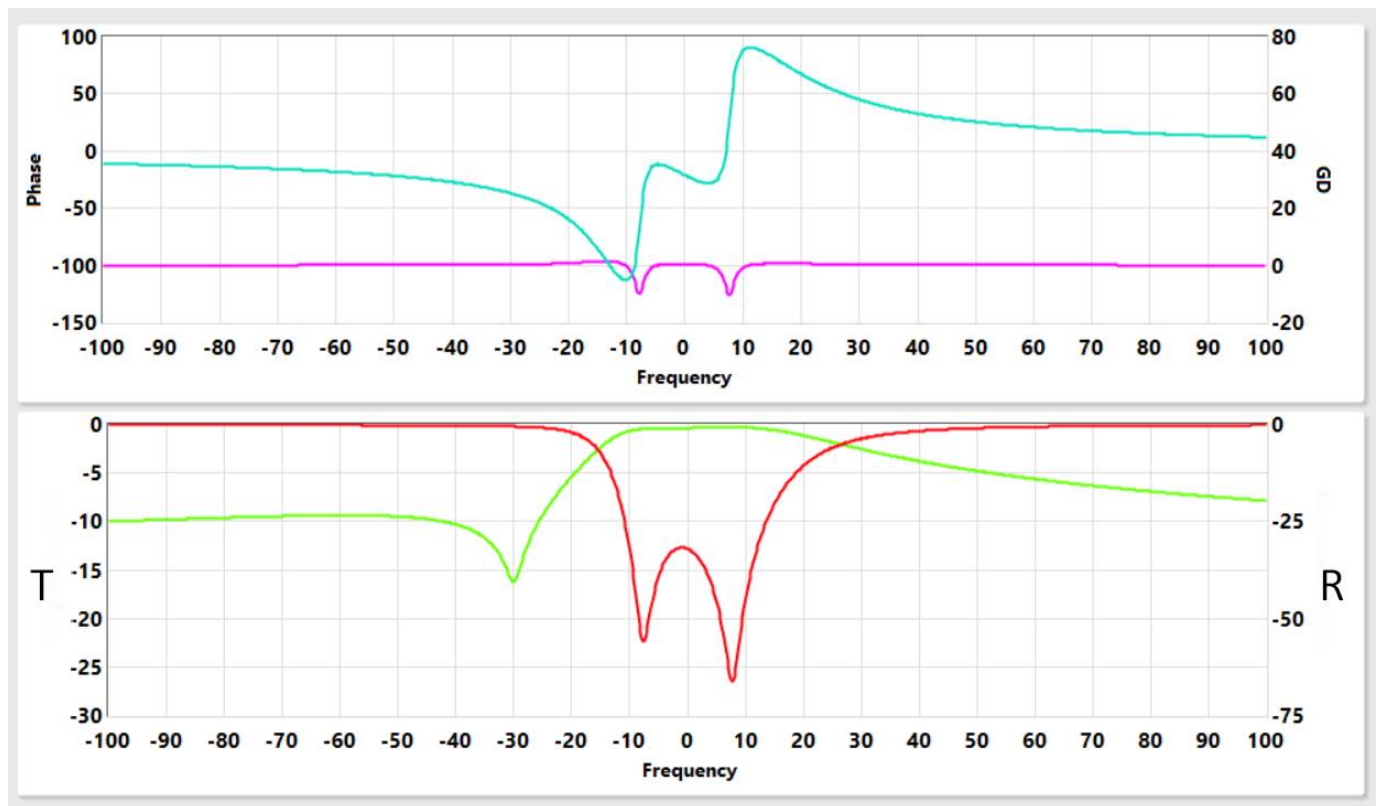
Для прикладу візьмемо ще криву 5 з рисунку 4.1.



a)



b)



в)

Рис. 4.3. а) Апроксимована крива 5. б) Параметри кривої. в) S21, S11, GD and Phase

На малюнку вище апроксимовано криву 5, де в результаті демонструється коефіцієнт передачі та відбивання, а також їх фаза (Phase).

В результаті апроксимації криві мають параметри: $K1 = 6$, $K2 = 14$, $a = 12$, $b = 1$.

Для перевірки правильності запропонованої методики, використаємо вимірювання цього ж фільтра, зробленими за допомогою професіонального векторного вимірювача мереж Agilent PNA-X.



Рис. 4.4. Амплітуда та фаза фільтра

Моделюючи цю характеристику за допомогою ПЗ LabVIEW, отримуємо характеристику рис. 4.5, на якій позначені як нормальні коливання (червона f_e та зелена f_m), так і загальну характеристику фільтра (синя крива).

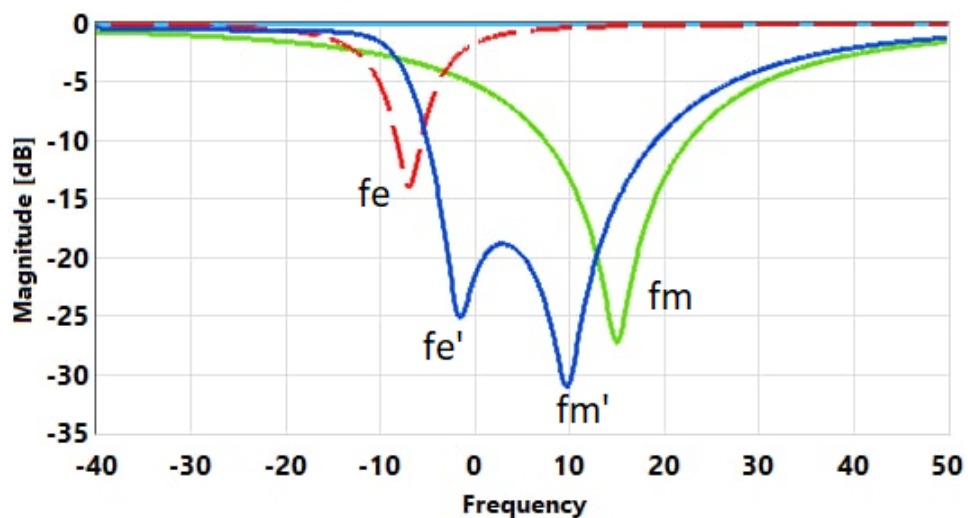


Рис. 4.5. Змодельовані характеристики в ПЗ LabVIEW

Розрахована фазова характеристика показана на рис. 4.6., якщо не брати до уваги скачок фази на 360 градусів (еквівалентно переходу через 0) на рис. 4.4 та 4.6, то ми бачимо подібність не тільки амплітудних, а і фазових характеристик, виміряних за допомогою Agilent PNA-X та розрахованих за допомогою LabVIEW.

Таким чином, це ще раз підтверджує правильність, обраної нами методики знаходження, комплексних параметрів матриці розсіювання фільтрів.

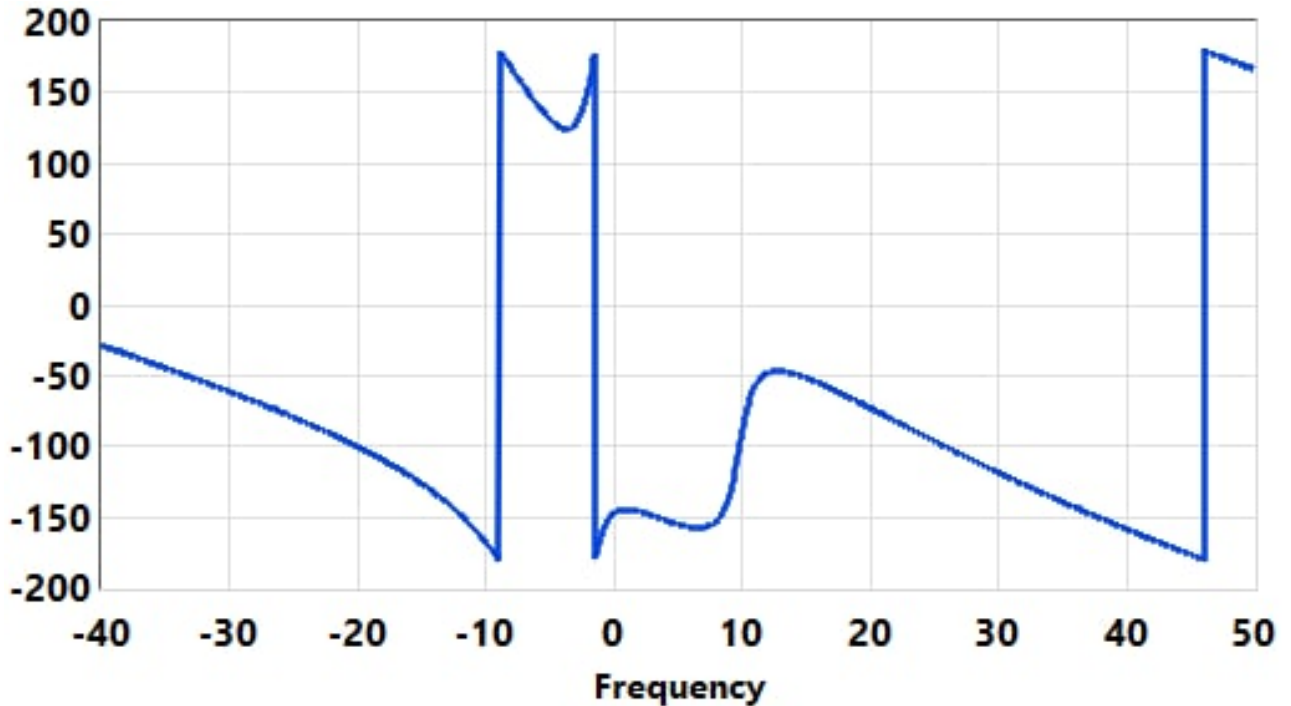
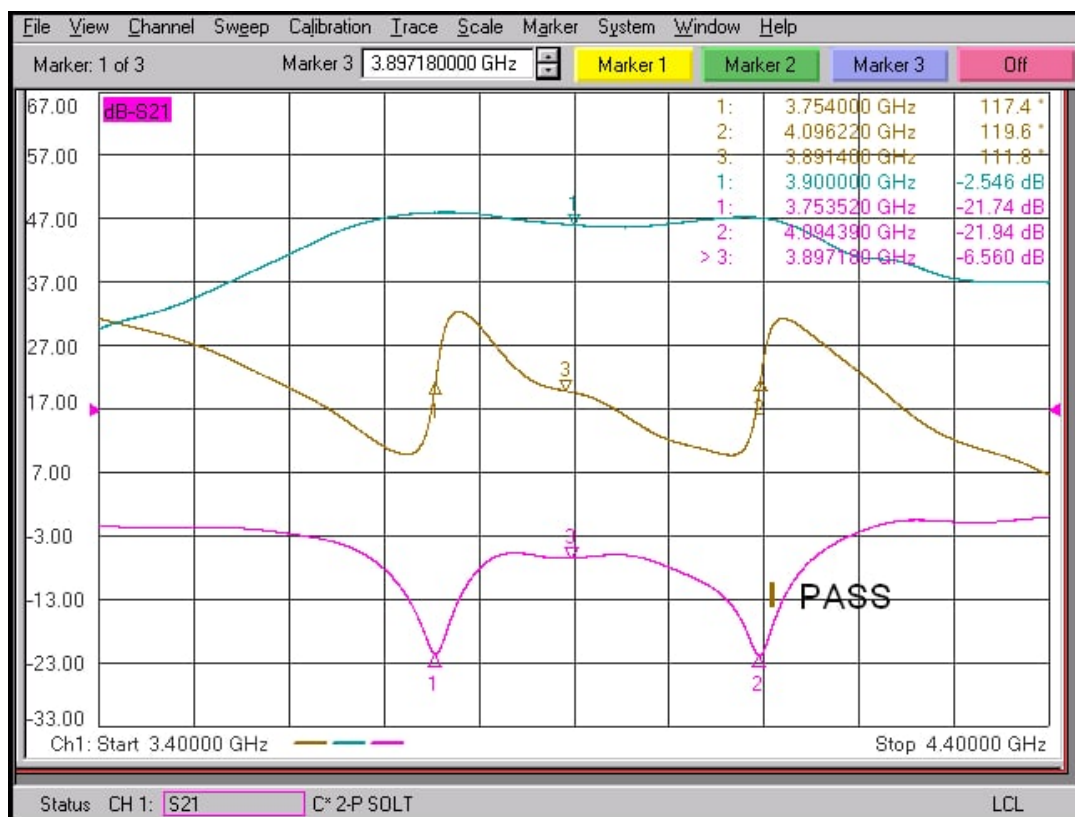


Рис. 4.6. Змодельована фаза в ПЗ LabVIEW

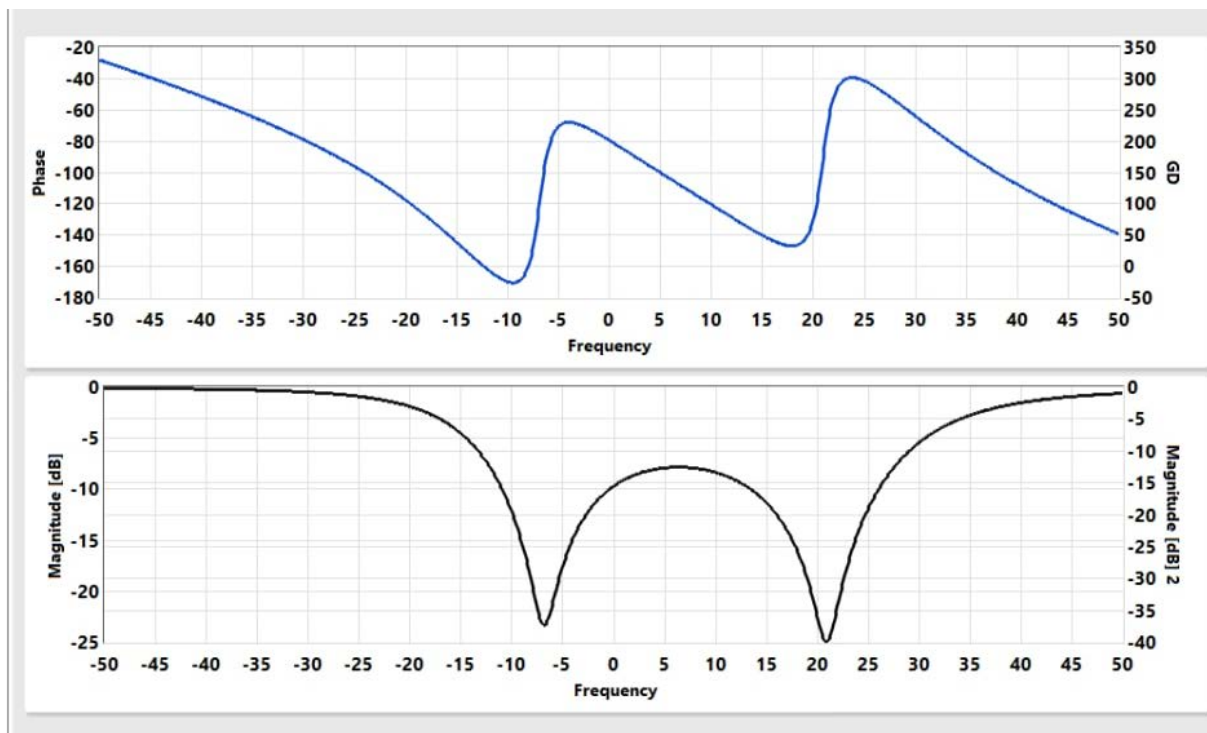
4.2 Порівняння виміряних та модельованих характеристик

Після того, як провелися вимірювання на реальному професійному обладнанні на базі режекторного фільтру (рис. 3.17 (а)), можна змодельовати криві за допомогою ПЗ LabView та переконатися у їх подібності. Для цього необхідно порахувати параметри K_1 , K_2 , a та b , формули яких були описані вище.

На рисунках нижче бачимо порівняння експериментальних та теоретичних кривих. Порівнюємо криві з різними значеннями, тому що при дослідженні фільтра на базі метаматеріалу проводився зсув тонкої діелектричної пластини на резонатор.

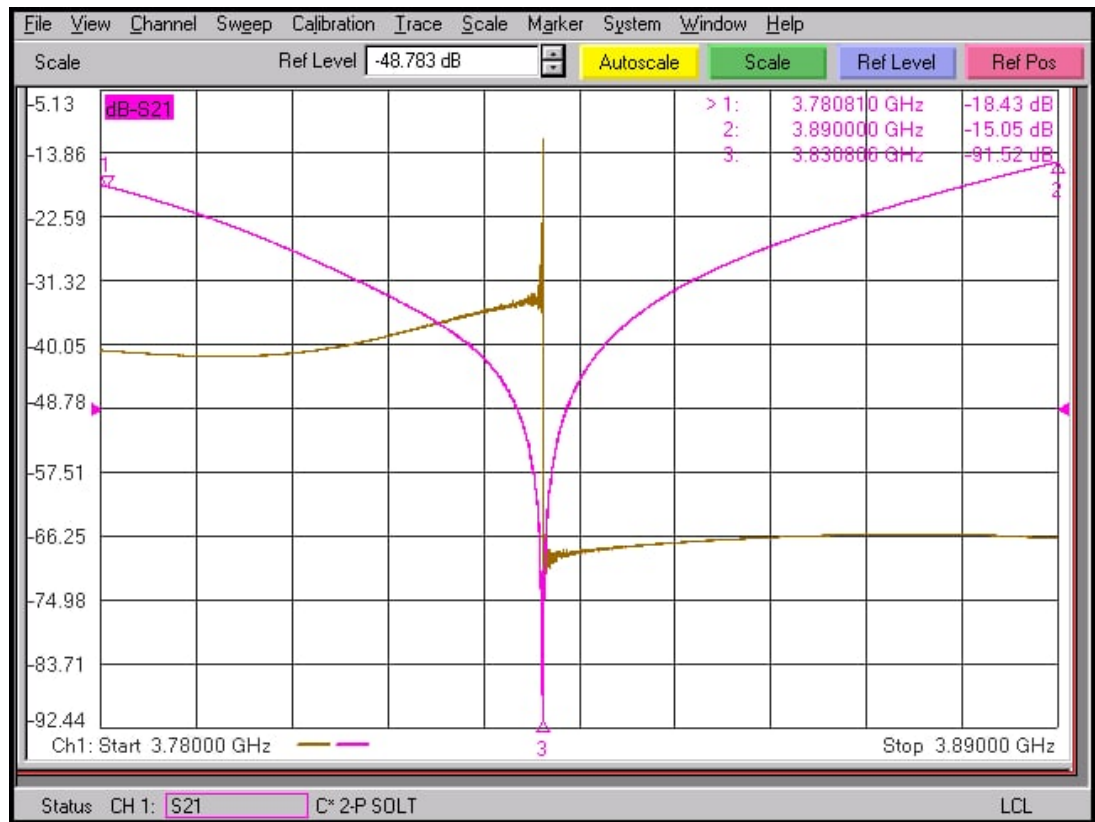


a)

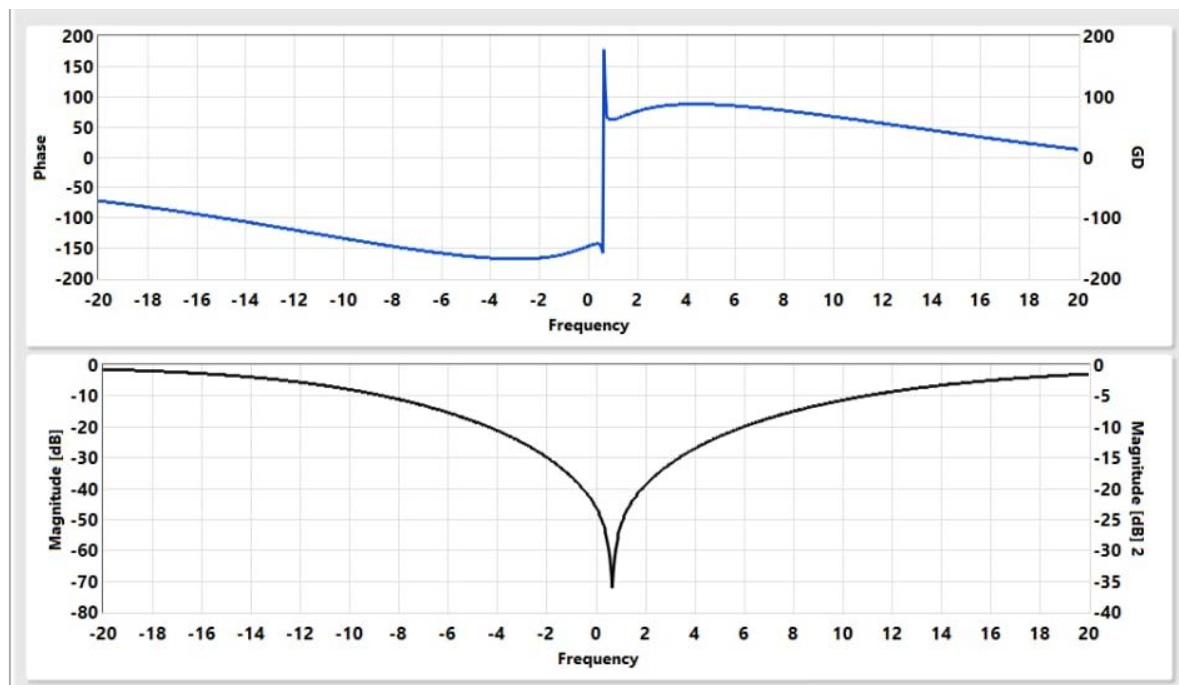


б)

Рис. 4.7. Порівняння АЧХ та ФЧХ реальних (а) та змодельованих кривих (б)



a)



б)

Рис. 4.8. Порівняння АЧХ та ФЧХ реальних (а) та змодельованих кривих (б)

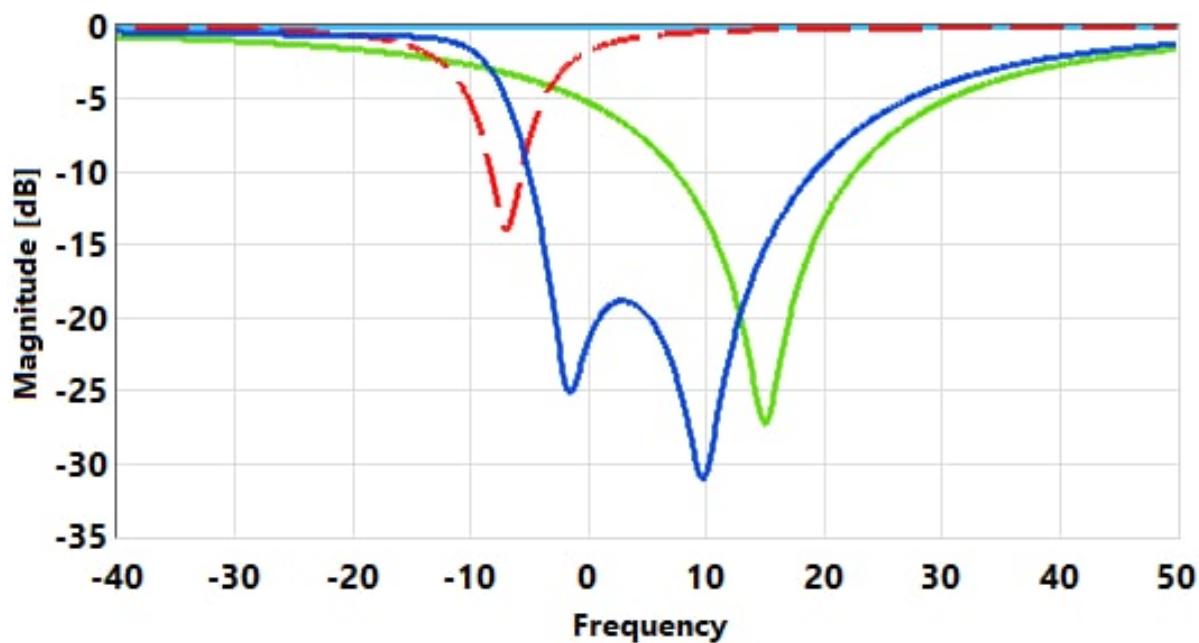
На рисунках нижче бачимо фіолетову криву – параметр S21, та коричневу криву – фаза. При дослідженні виявлено маркер 1, що відповідає рівню -24.59 dB, маркер 2 -31.48 dB та маркер 3 -19.65 dB.

Під час моделювання кривих використовувалися параметри K1, що відповідає значенню 20, K2 – 4.1, також параметри a, що дорівнює -11 та b – 1.

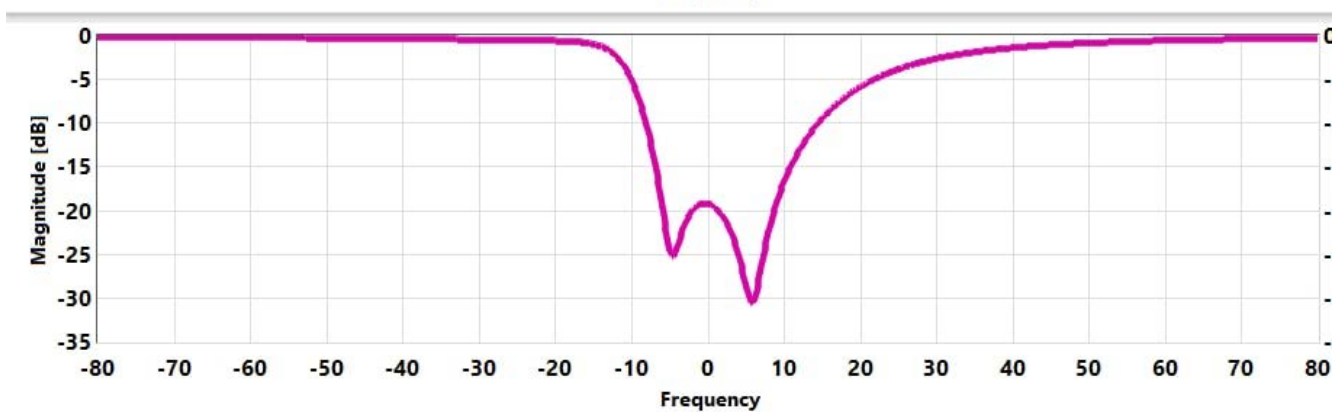
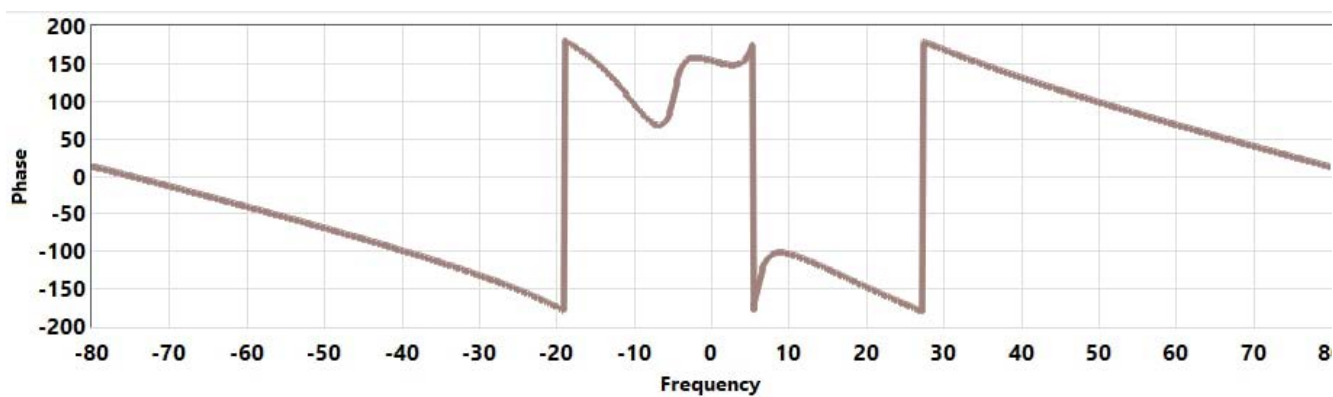
При порівнянні досліджених та змодельованих кривих бачимо, що фіолетова крива (S21) та фаза (коричнева крива) збігаються.



a)



б)



в)

Рис. 4.9. а) Реальна крива 2. б) Змодельована крива. в) АЧХ та ФЧХ в ПЗ
LabVIEW

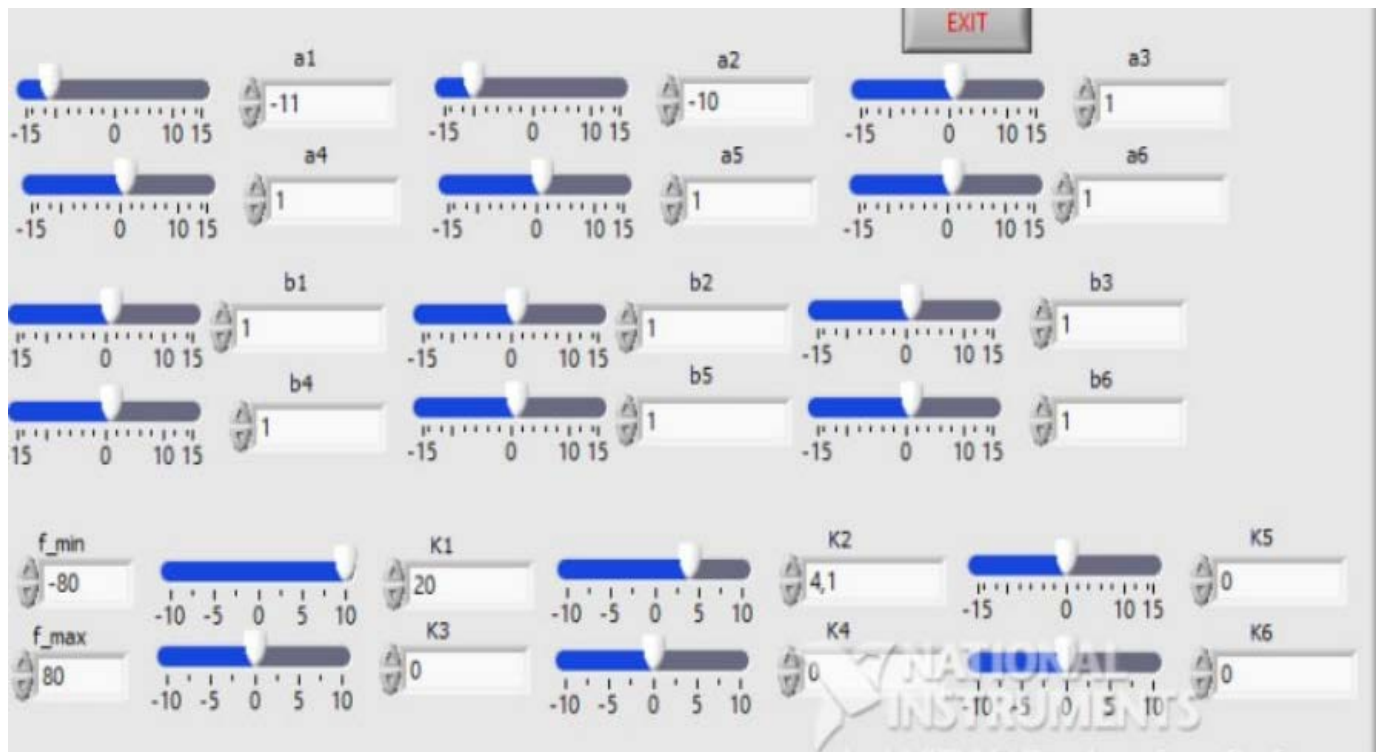


Рис. 4.10. Параметри кривих в ПЗ LabVIEW

Таким чином, ми спостерігаємо високу подібність порівняння та робимо висновок, що у нас є можливість змоделювати та порівняти будь-які характеристики за допомогою спеціальних програм.

Висновки

За допомогою апроксимації ми можемо, маючи тільки вимірний коефіцієнт передачі, знаходити також коефіцієнт відбиття, фазо-частотну характеристику та групове час затримки, і таким чином визначати комплексні параметри матриці розсіювання досліджуваного фільтра. Таким чином, можна зробити висновок, що сумісне використання вимірювального комплексу Signal Hound та програмного забезпечення LabVIEW дозволяє побудувати апаратно-програмний комплекс, який виконує функції векторного аналізатора мереж.

В результаті отриманих параметрів та графіків, виміряна модель фільтра за допомогою Signal Hound має велику схожість з розрахованими кривими в ПЗ LabVIEW, тим самим підтверджуючи високу подібність моделей. Оскільки

вимірювальний комплекс не має можливості вимірювати фазу нашого сигналу, то на основі отриманих результатів подібності, можна сказати, що і фаза буде максимально схожою.

РОЗДІЛ 5

СТАРТАП-ПРОЄКТ

5.1 Опис ідеї проекту

Ідея стартап-проєкту полягає в створенні вимірювальної лабораторії на базі дешевих та простих пристроїв Signal Hound для вимірювання та дослідження сигналу, а також використання сучасних датчиків Vernier.



Рис. 5.1. Вимірювальний комплекс Signal Hound

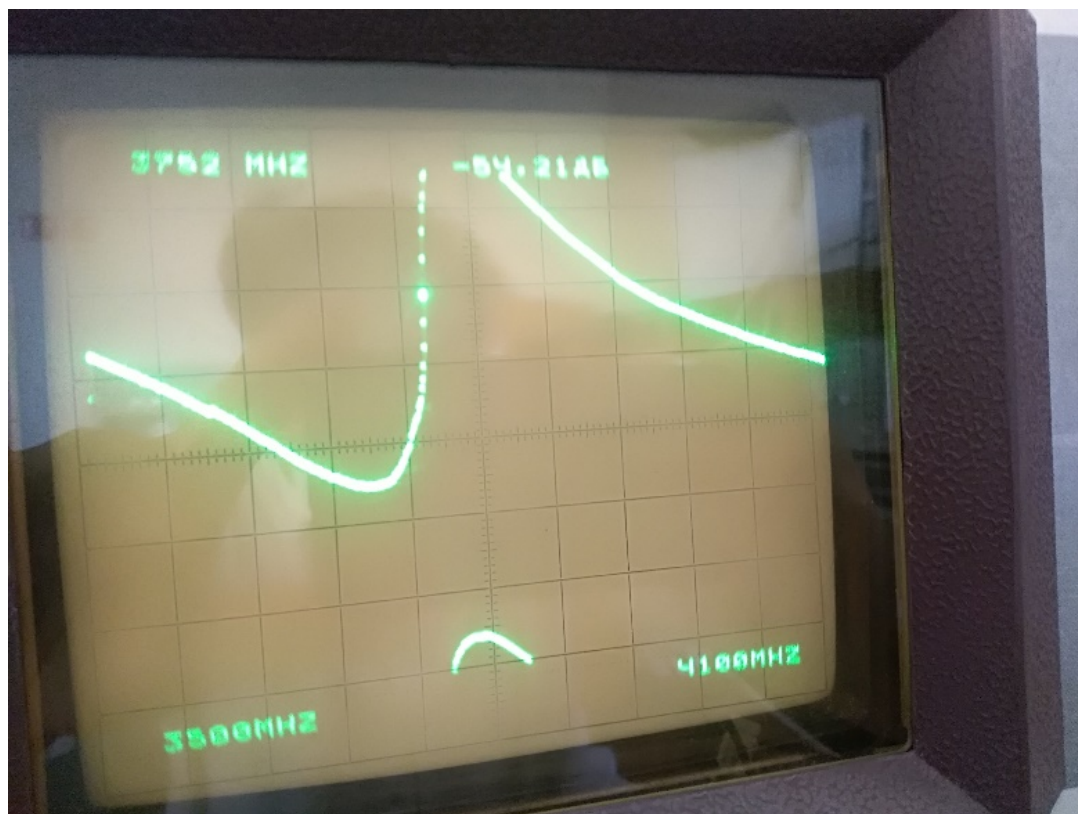


Рис. 5.2. Датчики Vernier [12]

Наразі в більшості аудиторіях ми маємо старі обладнання, або ж в науково-дослідних кабінетах стоять дорогі та великі векторні аналізатори та генератори сигналу. Наприклад, серед них є виробники: Keysight, Aligen, Anritsu та Rohde&Schwarz. Саме тому пропонується замінити старе обладнання на більш нове, дороге обладнання на більш дешеве та компактне, тим самим роблячи дослідження простішим, швидшим та привабливим.



Рис. 5.3. Панорамний вимірювач ксх та послаблення [13]



а)



б)

Рис. 5.4. а) Дослідження сигналу. б) Вимірювач комплексних коефіцієнтів передач [14]

Таблиця 5.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення вимірювальної лабораторії на базі дешевих пристроїв для вимірювання та дослідження сигналу, а також використання сучасних датчиків Vernier.	Збільшення кількості обладнання (аналізатори, генератори, датчики) за рахунок оптимізації їх вартості. Обладнання має багато різноманітних функцій порівняно зі старим.	Користувачі зможуть використовувати нове обладнання в лабораторії, щоб проводити дослідження швидше, простіше, цікавіше.

В наступній таблиці розглянуто порівняння з конкурентами, а також визначення переваг і недоліків завдяки архітектурному підходу, де забезпечується швидкість роботи та ефективність у кожному конкретному випадку.

Таблиця 5.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних ідей проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційне) обладнання/конц епціїконкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральн асторона)	S (сильна сторона)
		Обладнання Signal Hound	Rohde&Schw arz	Anritsu			
1	Розкрученість бренду	ні	так	так	так		
2	Непередбачуване зростання вартості	ні	так	так		так	так
3	Вимірювання ФНЧ	ні	так	так		так	так
4	Швидке та просте калібрування пристроїв	так	ні	ні		так	так
5	Зручне порівняння результатів	так	ні	ні		так	так

5.2 Технологічний аудит проєкту

Таблиця 5.3

Технологічна здійсненність ідеї проєкту

Ідея проєкту	Технологія та кроки її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Створити вимірювальну лабораторію на базі дешевих та простих пристроїв для вимірювання та дослідження сигналу, а також використання сучасних датчиків Vernier.	Розробка плану заміни обладнання (аналізатори спектру, генератори частот та датчики)	Розроблена	Розроблена автором проєкту
	Створення тестової лабораторії	Наявна	Перший зразок виготовлений і проходить тестування
	Порядок виконання лабораторних робіт	Наявна	Перший зразок виготовлений і проходить тестування
	Придбання додаткового обладнання для датчиків Vernier	Наявна	Потребує додаткових фінансових затрат

Отже, можна зробити висновок, що даний проєкт є реалізованим, але потребує додаткових затрат.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж	?
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	?

Спостерігаючи сьогоднішню потребу ринку в рішенні стосовно підвищення лояльності клієнта, ринок є привабливим для впровадження.

Даний проєкт є рентабельним при вирішенні поставлених задач. Це є дуже важливим фактором при подальшому впровадженні.

Таблиця 5.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Збільшення кількості дослідницьких аудиторій	науковці	Науковці в свою чергу можуть раціонально облаштувати лабораторію для передових досліджень	- Впровадження систем моніторингу стану ґрунту. - Можливість використовувати обладнання та датчики в малих по габаритам аудиторіях. - Зручне використання для досліджень

Таблиця 5.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Відсутність зацікавленості у продукті	Успіх системи залежить від підтримки малого бізнесу, адже з великою імовірністю користувачі не будуть звертати увагу на новий нерозкручений продукт.	Робота з малим бізнесом над підвищенням лояльності клієнта, що буде означати створення бази клієнтів, які будуть рекомендувати цей продукт.
2	Затратність на початку проекту	Великою проблемою при запуску даного стартапу є більші затрати у порівнянні з вже існуючими аналогами. Якщо не отримати знижку на виробництво і дослідницьку роботу існує великий шанс втрати прибутковості проекту.	Розпочати програму запити на отримання льгот на реалізацію програми зарахунок гарантії покращення наукового дослідження

Таблиця 5.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Необхідність рішення для науковців.	Сьогодні великою проблемою науковців, що використовують дороге та складне обладнання, є необхідність в простому та швидкому калібрування пристроїв. В результаті це призведе до великої результативності.	Просування продукту на всеукраїнський форум науковців
2	Збільшення кількості даних про стан обладнання за допомогою датчиків Vernier	При збільшенні кількості датчиків збільшиться і кількість даних які будуть з них отримуватися, що в свою чергу дозволить робити більш точні прогнози.	Інтеграція з більшими компаніями

Отже, загрозою даного стартап-проєкту є необхідність затрат на початку інтеграції. А можливостями є просування продукту на всеукраїнський форум наукових діячів.

Таблиця 5.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції: олігополія	На ринку представлені декілька компаній, що поставляють подібні послуги рішення проблеми відтоку	Акцентування переваг продукту, що забезпечує використання нових методів машинного навчання
2. Рівень конкурентної боротьби: національний/інтернаціональний	Першим етапом є боротьба за ринок України з подальшим виходом на ринки інших країн	Маркетингова компанія в першу чергу орієнтована на захоплення місцевого ринку
3. Галузева ознака: внутрішньогалузева	Економічна боротьба з конкурентами відбувається в одній галузі економіки, пропонуються аналогічні послуги, що мають архітектурні відмінності у функціонуванні	Пропозиція суттєвих переваг у порівнянні з продуктами конкурентів у визначеній галузі економіки
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція відбувається між пристроями одного виду. За такої конкуренції значення набуває марка товару	Постійна робота над забезпеченням високого рівня іміджу компанії
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Передбачається ведення конкурентної боротьби не за рахунок зниження ціни на аналогічні пристрої, а за рахунок новизни та унікальних характеристик пристроїв	Акцент на унікальних характеристиках пропонованого товару
6. За інтенсивністю: марочна	Виведення товару на ринок передбачається під власною маркою	Просування продукту компанії під визначеним брендом

Таблиця 5.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Keysight, Anritsu та Rohde&Schwarz	Гнучкі ціни, Патент на продукт	Змінні витрати постачальників	Рівень чутливості до зміни цін	Ціна, лояльність споживачів
Висновки	Конкуренція не інтенсивна, кожен працює в окремому регіоні	Можливість входу в ринок висока. Потенційні конкуренти присутні	Постачальник може диктувати умови: ціни на послуги	Кожен з клієнтів потребує індивідуального підходу для вирішення його задач	Обмежень для роботи на ринку з боку товарів-замінників на даний момент не існує

Отже, за результатами проведеними вище в таблиці 5.9, можна зробити висновок, що, дивлячись з боку конкурентної ситуації, можливість виходу на ринок є високою. В першу чергу для виходу на ринок обладнання повинно пропонувати унікальні характеристики, що відсутні у продуктах конкурентів.

Таблиця 5.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Динаміка галузі	Проблема простоти та зручності у використанні є дуже важливою, тому користувачі зацікавлені
2	Концепція товару	Система підвищення лояльності клієнтів дозволяє утримувати клієнтів впливаючи на них маркетинговими методами.

Продовження таблиці 5.10

3	Післяпродажне обслуговування	Підтримка щодо використання пристрою після його продажу
---	------------------------------	---

Таблиця 5.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін системи підвищення лояльності абонентів операторів мобільного зв'язку

№	Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Динаміка галузі	3							✓
2	Концепція товару і послуги	1						✓	
3	Після продажне обслуговування	2					✓		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12

SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: • Інноваційні технології • Висока якість	Слабкі сторони: • Слабкий імідж компанії • Слабкий маркетинг • Мало оборотних коштів • Невідома торгівельна марка
--	---

Продовження таблиці 5.12

Можливості: • Нові технології • Нові потреби клієнтів • Тенденції попиту	Загрози: • Продукти-замінники
--	---

Таблиця 5.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Цільові групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Науковці	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
Інвестори	Часткова готовність	Високий	Помірна	Складно
Обрані цільові групи: Науковці, Інвестори				

Таблиця 5.14

Базові стратегії в обраних сегментах ринку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Динамічний розвиток завдяки висвітленню унікальних характеристик обладнання	Унікальність обладнання, для збільшення лояльності клієнта	Використання технології метаматеріалів	Стратегія диференціації

Таблиця 5.15

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект першопрохідцем на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не є першопрохідцем	Компанія буде шукати нових користувачів	Компанія буде копіювати найкращі з характеристик конкурентів	Стратегія наслідування лідеру за для економії фінансових ресурсів

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (таблиця 5.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки була розроблена стратегія позиціонування (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту
1	Висока доступність	Стратегія диференціації	Використання технології метаматеріалів що є новітнім підходом к рішенню цієї задачі	Доступність, якість, швидкість

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Таблиця 5.17

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентом
1	Необхідність правильного використання обладнання перед калібруванням пристроїв	Відсутність необхідності заміни складних дротів, налаштування параметрів	Простота, надійність, швидкість
2	Компактність системи	Портативність обладнання завдяки малим розмірам	Портативність, зручність

Після цього розробляється маркетингова модель обладнання трьох рівнів: ідея продукту та послуги, фізичні складові, особливості процесу його надання. Це все наведено в таблиці нижче.

Таблиця 5.18

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Товар забезпечує вимірювання фільтрів на базі метаматеріалів мікрохвильового діапазону
2. Товар у реальному виконанні	Властивості: доступність, цілісність, зручність, прозорість
	Товар представляє собою пристрій для збирання енергії мікрохвильового діапазону
	Поставляється у вигляді комплексного пристрою
	Назва: Signal Hound

Продовження таблиці 5.18

3. Товар із підкріпленням	До продажу: відбувається інсталяція та конфігурування системи, проводяться тренінги для клієнта
	Після продажу: відбувається підтримка апаратного забезпечення та його доопрацювання під потреби клієнта

Аналіз системи збуту передбачає визначення ефективності кожного елемента цієї системи, оцінювання діяльності апарату працівників збуту. Аналіз витрат обігу передбачає зіставлення фактичних збутових витрат за кожним каналом збуту і видом витрат із запланованими показниками для того, щоб виявити необґрунтовані витрати, ліквідувати затрати, що виникають у процесі руху товарів і підвищити рентабельність наявної системи збуту.

Таблиця 5.19

Формування системи збуту

№п/п	Специфіка закупівельно і поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Власна система збуту	Проведення та розгортання програмного забезпечення на стороні компанії-клієнта	Канал нульового рівня, продаж товару відбувається безпосередньо споживачам через відділ збуту	Оптимальною системою збуту є прямий збут з каналом нульового рівня за відсутності посередників

Таблиця 5.20

Концепція маркетингової комунікації

Цільові групи	Канали комунікації якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Науковці	Інтернет	Достовірність, простота та швидкість	Зацікавити клієнта в покупці обладнання	Надійність, Швидкість, Зручність, Достовірність
Інвестори	Інтернет	Надійність, екологічність		

Висновки

1. Виявлено, що стартап-проект не має аналогів на ринку, але є попит на даний продукт серед інвесторів та науковців.
2. Проведено оцінку рентабельності проекту. Враховуючи середні витрати на реалізацію даного проекту, даний проект є рентабельним.
3. Визначено переваги та недоліки стартап-проекту, а також інші фактори. До переваг проекту можна віднести простоту, надійність, можливість доповнення, швидкість, портативність, зручність, широку сферу застосування. До недоліків проекту можна віднести відсутність повноти функції порівняно з більш дорогим та габаритним обладнанням. Для впровадження даного проекту в якості головного фактору загрози є складне економічне становище в країні та становище загалом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Використання простих, недорогих, зручних в експлуатації генератора та аналізатора компанії Signal Hound дає змогу реалізувати придатні для навчального процесу скалярні аналізатори кіл, що працюють до 4.6 ГГц.
2. Використання програм проєктування смугових і режекторних фільтрів, реалізованих у середовищі проєктування LabView, дає змогу знаходити фазові характеристики фільтрів методами апроксимації і тим самим реалізовувати апаратно-програмні комплекси векторних аналізаторів мереж.
3. Використане обладнання являє собою приставки до комп'ютерів і спеціалізоване програмне забезпечення, що дає змогу проводити вимірювання, зберігання й оброблення інформації в цифрових форматах, дуже зручних для створення сучасних наукових звітів рівня, придатного для науково-дослідних робіт і публікацій у науковій літературі високого рівня.
4. Проведене порівняння вимірювань одного й того самого фільтра, виконані як на дорогій, складній в експлуатації вимірювальній техніці, так і за допомогою комплексу обладнання Signal Hound продемонструвало адекватність запропонованої методики побудови сучасних вимірювальних комплексів, придатних як для університетських лабораторій, так і для наукових досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Frank Gustrau, «RF and Microwave Engineering Fundamentals of wireless communications», 2012.
2. https://www.rohde-schwarz.com/home_48230.html
3. <https://www.keysight.com/us/en/home.html>
4. 2С. И. Баскаков, «Радиотехнические цепи и сигналы», 2000.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Kramers%E2%80%93Kronig_relations
6. <https://signalhound.com/products/usb-sa44b/>
7. <https://signalhound.com/products/usb-tg44a/>
8. <https://www.keysight.com/zz/en/products/network-analyzers/pna-network-analyzers.html>
9. Avdeyenko G., Galitskiy I., Krylach O., Zhivkov A., Shevtsov K., «Application of Signal Hound scalar network analyzer for measurement of filter parameters based on metamaterial cells», 2022.
10. M. E. 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. doi:10.1007/978-3-030-16770-7_14
11. Zhivkov A., Akopian P., Galitskiy I., Krylach O., Kopaniev M., Kamarali R., «Microwave filters with variable parameters based on cells of metamaterials». In: Fifteenth International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS", pp. 79-82, 2021.
12. <https://www.vernier.com/products/>
13. <https://zapadpribor.com/ua/r2-100/>
14. <https://standart-pribor.com.ua/product/r4-37-1-izmeritel-kompleksnykh-koeffitsientov-peredach/>

15. Ilchenko M.E., Zhivkov A.P. Microwave filters based on the structures with resonators in parallel channels as metamaterial cells //KPI Science News. – 2018. – № 6. – с. 7-21. DOI: 10.20535/1810-0546.2018.6.151520
16. Zhivkov, A. P., Shevtsov, K. O., Kamarali, R. V., & A.T., O. (2019). Fano resonance and metamaterial cells equivalent circuits. 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). doi:10.1109/ukrmico47782.2019.9165428
17. H.W. Bode Network Analysis and Feedback Amplifier Design, D. Van Nostrand. Co., Inc., 1945.
18. Hendric W. Bode. Ph. D., «Network Analysis and Feedback Amplifier Design», 1946.
19. Zhivkov A., Akopian P., Galickiy I., Sobko T., «The modelling of the group delay in metamaterial cells», 2019.
20. Ilchenko M., Zhivkov A., Akopian P., Galickiy I., Sobko T., «Attenuation poles in band-pass filters with even end odd modes», 2020.
21. Galickiy I., Shevtsov K., Zhivkov A. Kamarali R., «Attenuation Poles In Microwave Three-Resonator Bandpass Filters», 2022.
22. Ilchenko M.E., Zhivkov A.P. Microwave filters based on the structures with resonators in parallel channels as metamaterial cells //KPI Science News. – 2018. – № 6. – с. 7-21. DOI: 10.20535/1810-0546.2018.6.151520