

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)
магістра
(ступінь вищої освіти)

на тему **ОБРОБКА ЕМПІРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗІ СТВОРЕННЯМ**
МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ

Виконав: студент 2 курсу, групи БК-912м

Спеціальності _____

172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____

«Інформаційні мережі зв'язку»

ВОЛОШИН Володимир Миколайович
(прізвище та ініціали)

Керівник КОСТЕНКО Валер'ян Остапович
(прізвище та ініціали)

Рецензент КАС'ЯН Микола Миколайович
(прізвище та ініціали)

2023 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інформаційної безпеки та електронних комунікацій
 Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Інформаційні мережі зв'язку»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри РТТ
к.ф.-м.н., доц. САМОЙЛИК С.С.
 « » грудня 20 23 року

С.С.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ВОЛОШИНУ Володимиру Миколайовичу

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Обробка емпіричних вимірювань зі створенням математичної моделі процесу

керівник проекту (роботи) к.т.н., доцент, КОСТЕНКО Валер'ян Остапович
 (науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "14" листопада 2023 року №443



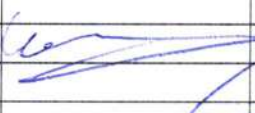
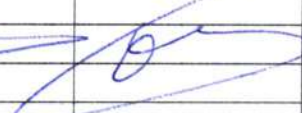
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Необхідно дослідити можливості математичного пакету прикладних програм MatLab для вимірювання параметрів схем заміщення н'єзокерамічних елементів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз еквівалентної математичної моделі резонансних контурів, розробка оптимального алгоритму обробки емпіричних даних, отриманих при вимірюванні провідності, розробка на основі пакету MatLab програм реалізації алгоритмів апроксимації резонансних кривих, виконання обчислень та аналіз отриманих результатів відповідно для одно-, двох- та трьох-резонансних схем.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація роботи в Microsoft PowerPoint

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	КОСТЕНКО В.О., доцент		
нормо-контроль	МОРОЗ Г.В., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз еквівалентної математичної моделі резонансних контурів	1-й тиждень	виконано
2	Розробка оптимального алгоритму обробки емпіричних даних, отриманих при вимірюванні провідності	1-й тиждень	виконано
3	Розробка на основі пакету MatLab програм реалізації алгоритмів апроксимації резонансних кривих	2-й, 3-й тиждень	виконано
4	Виконання обчислень та аналіз отриманих результатів відповідно для одно-, двох- та трьох-резонансних схем.	4-й тиждень	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації у Microsoft PowerPoint	5-й тиждень	виконано
6	Проходження нормоконтролю, рецензування, антиплагіату, оформлення дублінського ядра	5-й тиждень	виконано

Студент(ка)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Володимир ВОЛОШИН
(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Валер'ян КОСТЕНКО
(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 156 с., 13 табл., 82 рис., 12 джерел.

ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ, ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ, МІНІМІЗАЦІЯ, ІНТЕРПОЛЯЦІЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ, АПРОКСИМАЦІЯ, ЦИФРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ, ПРОВІДНІСТЬ, РЕЗОНАНС, ІТЕРАЦІЇ.

Пропонується технологія визначення параметрів схем заміщення п'єзокерамічних елементів шляхом використання програм оптимізації математичного пакету прикладних програм MatLab.

Метою роботи є дослідження можливостей математичного пакету прикладних програм MatLab для вимірювання параметрів схем заміщення п'єзокерамічних елементів.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано сучасний комп'ютерний інструмент вимірювання параметрів п'єзокерамічних елементів.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що за допомогою розробленого програмного інструменту можна скоротити час розробки та налаштування пристроїв, побудованих на основі п'єзокерамічних елементів: високостабільних генераторів гармонічного сигналу, сенсорів, приладів керування навігацією рухомих об'єктів, акустичних радарів, і т.і.

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки	6
Вступ.....	7
1 Апроксимації однорезонансних кривих	9
2 Апроксимації двох-резонансних кривих	27
3 Апроксимації трьох-резонансних кривих.....	62
Висновки	96
Перелік джерел посилань	97
Додаток А.....	98
Додаток Б	109
Додаток В.....	130

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
КІХ-фільтр	–	фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою
ПКЕ	–	п'єзокерамічний елемент
ФНЧ	–	фільтр нижніх частот
ФЧХ	–	фазо-частотна характеристика

ВСТУП

П'єзокерамічні елементи призначені як для перетворення електричної енергії на механічну, так і на принципі зворотного п'єзоефекту. П'єзокерамічні перетворювачі, залежно від діапазону частот, поділяються на три види: звукові (нижче 20 кГц) – зумери, телефонні мікрофони, високочастотні - гучномовці, сирени тощо; ультразвукові – високоінтенсивні випромінювачі для зварювання та різання, миття та очищення матеріалів, датчики рівня рідин, дисперсійні розпилювачі, генератори туману, інгалятори, зволожувачі повітря. Значною групою виділяються так звані ультразвукові вимірювачі відстані повітряного середовища (Air Transducers), що є п'єзокерамічними компонентами. Вони використовуються як вимірювачі відстані для автотракторної техніки, сенсорів наявності та руху в охоронних системах, в рівнемірах, для дистанційного контролю та управління, в пристроях відлякування птахів, звірів, сільськогосподарських шкідників і т.і. Виробляються пристрої трьох типів: передавальні, приймальні та приймально-передаючі. Всі вироби, виготовлені на базі п'єзокераміки, поділяють на основні групи: генератори, датчики (сенсори), актюатори (п'єзоприводи), перетворювачі та комбіновані системи.

П'єзокерамічні резонатори, використовуючи високодобротний електромеханічний резонанс, є основою для побудування високостабільних опорних автогенераторів гармонічного сигналу, які є одним з найважливіших елементів радіоелектронного обладнання, забезпечуючи синхронізацію телекомунікаційних мереж, завдяки створенню високоточних джерел радіочастоти в приймально-передаючих трактах.

П'єзокерамічні генератори перетворюють механічний вплив на електричний потенціал, використовуючи прямий п'єзоефект. Прикладами можуть служити іскрові запалювачі натискного і ударного типів, що застосовуються в різного роду запальничках і системах, що підпалюють, а

також твердотільні батареї на основі багатошарової п'єзокераміки, що застосовуються в сучасних електронних схемах.

П'єзокерамічні датчики перетворюють механічну силу або рух у пропорційний електричний сигнал, тобто засновані на прямому п'єзоефекті. У разі активного впровадження комп'ютерної техніки датчики є незамінними пристроями, що дозволяють узгоджувати механічні системи з електронними системами контролю та управління.

П'єзокерамічні актюатори (п'єзоприводи) будуються на принципі зворотного п'єзоефекту і тому призначені для перетворення електричних величин (напруги або заряду) на механічне переміщення (зсув) робочого тіла.

Нагальною потребою застосування п'єзокерамічних елементів є вимірювання їх вольт-амперних характеристик, які мають суттєво нелінійний характер. Для апроксимації цих характеристик неможливо використати рівняння простих тригонометричних функцій або ступеневі поліноми. Тому використовують в якості моделі п'єзокерамічних елементів відповідні електричні схеми заміщення. Дана робота присвячена саме дослідженню можливостей використання математичного апарату – програмного продукту MatLab – в якості інструменту визначення параметрів схем заміщення п'єзокерамічних елементів.

1 АПРОКСИМАЦІЇ ОДНОРЕЗОНАНСНИХ КРИВИХ

У подальших дослідженнях приймаємо відомі дані, що для п'єзокерамічного елемента (ПКЕ) паразитна вхідна ємність C_0 в еквівалентній схемі складає десятки пФ, добротність Q резонансного LC-контуру знаходиться у діапазоні $10^4 - 10^6$ (рис. 1.1), величина активного опору R складає 10-1000 Ом.

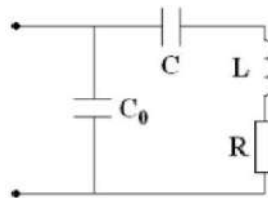


Рисунок 1.1 – Одноконтурна еквівалентна схема п'єзокерамічного елемента (ПКЕ)

Знайдемо вираз для модуля провідності еквівалентного одно-резонансного контуру:

$$\begin{aligned}
 Y(\omega) &= j\omega C_0 + \frac{\omega C}{R\omega C + j(\omega^2 LC - 1)} = \\
 &= j\omega C_0 + \frac{\omega C [R\omega C - j(\omega^2 LC - 1)]}{(R\omega C + j(\omega^2 LC - 1))(R\omega C - j(\omega^2 LC - 1))} \\
 &= j\omega C_0 + \frac{\omega C [R\omega C - j(\omega^2 LC - 1)]}{[(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2]} \\
 &= j\omega C_0 + \frac{[\omega^2 C^2 R - j\omega C(\omega^2 LC - 1)]}{[(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2]} \\
 &= \frac{\omega^2 C^2 R}{[(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2]} + j \left[\omega C_0 - \frac{\omega C(\omega^2 LC - 1)}{[(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2]} \right], \\
 Y(\omega) &= G(\omega) + jB(\omega)
 \end{aligned}$$

$$G(\omega) = \frac{\omega^2 C^2 R}{[(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2]} = \frac{R}{\left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]},$$

$$B(\omega) = \omega C_0 - \frac{\omega C (\omega^2 LC - 1)}{[(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2]} = \omega C_0 - \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{\left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]},$$

де $G(\omega)$ – активна частина провідності $Y(\omega)$;

$B(\omega)$ – реактивна частина провідності $Y(\omega)$. Відповідно модуль провідності $Y(\omega)$ дорівнює:

$$|Y(\omega)| = \sqrt{G^2(\omega) + B^2(\omega)}.$$

Отримана формула для $|Y(\omega)|$ застосована в реалізованих на основі пакета MatLab програмах для обчислення теоретичних значень провідності. При цьому у даній одноконтурній еквівалентній схемі маємо два типи резонансу:

– послідовний резонанс, утворений елементами L , C , R з максимальним значенням (без урахування незначного впливу ємності C_0):

$$|Y(\omega)| \text{ на частоті резонансу } \omega_0 = 1/\sqrt{LC};$$

– паралельний резонанс, утворений елементами L , C , C_0 , R з мінімальним значенням:

$$|Y(\omega)| \text{ на частоті резонансу } \omega_{\text{пар}} = 1/\sqrt{L \left(\frac{C_0 C}{C_0 + C} \right)}.$$

Частота паралельного резонансу $\omega_{\text{пар}}$ розраховується в програмах для уточнення діапазону обробки експериментальних даних з метою складання

найбільш точної теоретичної моделі контуру з урахуванням паралельного резонансу – це особливо впливає на точність знаходження значення паразитної ємності C_0 , яка незначно впливає на функцію $|Y(w)|$ порівняно з L , C , R в області резонансної частоти W_0 .

Розрахунок початкових значень L , C , R ґрунтується на вимірюванні смуги пропуску на рівні $(1/\sqrt{2}) W_0$ ($W_{0.707}$) за допомогою відомих виразів для послідовного резонансу:

$$\rho = W_0 \cdot L = 1/W_0 \cdot C = Q \cdot R, \quad Q = W_0/W_{0.707}, \quad R = 1/|Y(W_0)|, \quad |Y(W_0)| = |Y(w)|_{\max},$$

де ρ – характеристичний опір резонансного контуру.

Початкове значення C_0 розраховується шляхом виміру модуля провідності на частоті $W_{10} = 10 \cdot W_0$, при цьому використовуємо той факт, що на частоті W_{10} реактивна складова провідності ємності C_0 набагато більше реактивної складової провідності послідовного LC-контуру та відповідно останньою можна знехтувати (тобто C_0 повністю шунтує послідовний LC-контур на частоті $10 \cdot W_0$):

$$W_{10} C_0 = |Y(W_{10})|, \quad C_0 = |Y(W_{10})| / W_{10}.$$

В дослідженні розглядається резонансні контури з типовою центральною частотою $f_0 = 10$ МГц, та значенням добротності $Q = 10^4, 10^5, 10^6$, $C_0 = 10$ пФ, $R = 10$ Ом. Тобто смуга пропуску контурів за рівнем $0.707 F_{0.707}$ дорівнює відповідно 1000 Гц, 100 Гц, 10 Гц. Так як контури мають дуже великі значення Q , то результати апроксимації дуже залежать від точності визначення початкових значень L , C , R , тому крок вимірювання частоти step на основних ділянках послідовного та паралельного резонансу приймається рівним 0.1 Гц. При цьому для найкоротшого за смугою пропуску контуру з добротністю $Q = 10^6$ кількість відліків в смузі за рівнем 0.707 становить

$10/0.1=100$. Сучасні професійні генератори частоти дозволяють встановлювати крок частоти 0.01 Гц. Для зменшення кількості точок виміру, на проміжній ділянці між послідовним та паралельним резонансами крок вимірювання частоти приймається рівним 1 Гц.

Для суттєвого збільшення точності розрахунку початкових значень параметрів контуру в дослідженні використана інтерпретація резонансної кривої з помилковим шумом як сигнал з шумом, який розповсюджується в часі, тобто 1 сек відповідає 1 Гц (рис. 1.2).

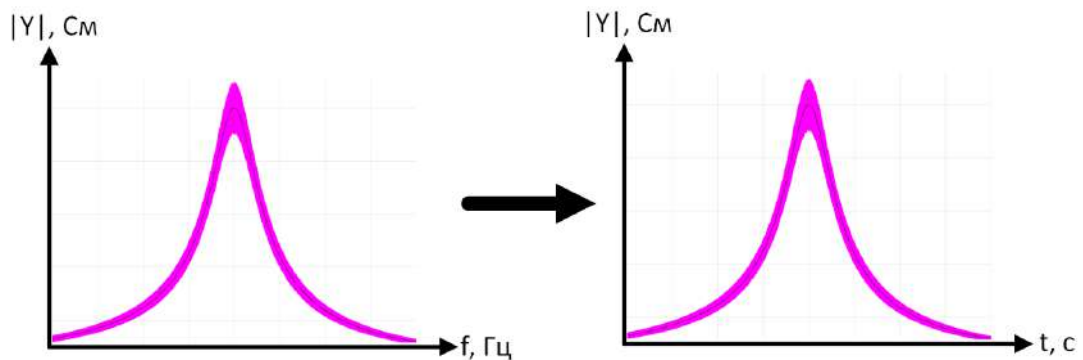


Рисунок 1.2 – Інтерпретація резонансної кривої як сигнал в часі

Тому для зменшення помилкового шуму використовується цифрова фільтрація за допомогою цифрового фільтра нижніх частот ФНЧ. В якості фільтра обраний КІХ-фільтр (фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою) з найкращою рівномірною (чебишевською) апроксимацією. Перевагою такого КІХ-фільтру є те, що він забезпечує строго лінійну фазо-частотну характеристику ФЧХ, тобто форма сигналу, розташованому у смузі пропуску, на виході фільтру не спотворюється – відбувається зсув сигналу на час групової затримки. Час групової затримки КІХ-фільтру (нормовані відліки) можна розрахувати, тому після фільтрації шляхом зворотного зсуву можна отримати початкову форму кривої провідності по відношенню до осі частот з зменшеним рівнем похибки. В даному дослідженні розрахунок

параметрів КІХ-фільтру виконується у програмі Filter_FIR_LPF (див. в додатку А) за допомогою функцій пакету MatLab `firpmord`, `firgr`, `grpdelay`. Вхідними параметрами програми Filter_FIR_LPF є частота дискретизації $F_s=1/\text{step}$, де `step` – це крок частоти (в інтерпретації 1Гц - 1с); гранична частота смуги пропуску (bandwidth) ФНЧ $f_b = 2(1/\text{TRMIN})$, де $\text{TRMIN} = 2 \cdot f_{\text{maxexp}}/10^6$ – оціночний розрахунок мінімального періоду в Гц резонансної кривої, що відповідає максимальній добротності $Q_{\text{max}}=10^6$, f_{maxexp} – частота максимуму резонансної кривої; $f_{\text{db}} = 1.2 \cdot f_b$ – гранична частота смуги затримки (delay band); $d_1=0.01$ – значення максимально допустимого відхилення АЧХ ФНЧ у смугі пропуску (0,1dB); $d_2=0.0001$ – значення максимально допустимого відхилення АЧХ ФНЧ у смугі затримки (80 dB) (рис. 1.3). Вихідними параметрами програми Filter_FIR_LPF є вектор `b1` коефіцієнтів фільтра, `h1` – довжина вектору коефіцієнтів `b1`, `grpdelay` – ціле значення нормованого відліку групової затримки фільтра.

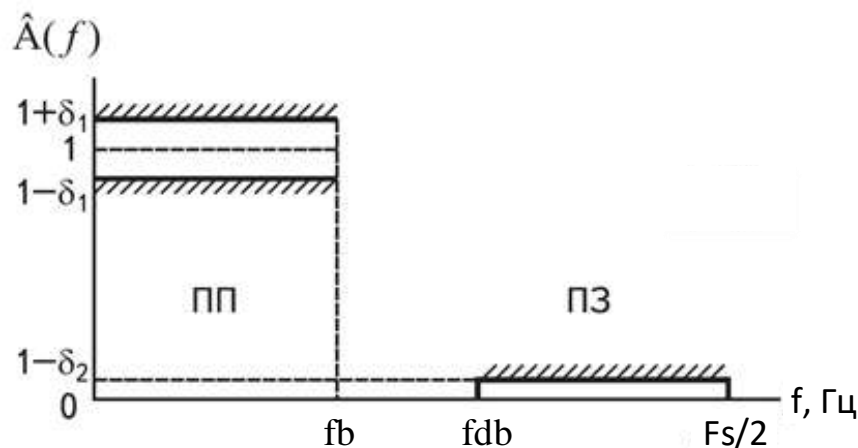


Рисунок 1.3 – АЧХ КІХ-фільтру ФНЧ

Вихідні параметри використовуються в програмах апроксимації/розрахунку початкових умов для фільтрації функції експериментальних даних за допомогою програми з пакету MatLab `filter` та виконання описаної вище процедури зворотного зсуву. Якщо дослідження

виконуються в діапазоні частот $f_0 \pm 1\%$, то при зміні частоти постійно звертатися до виконання програми Filter_FIR_LPF немає необхідності – розраховані на початку вихідні параметри без змін використовуються у наступних програмах апроксимації/розрахунку початкових умов. За допомогою програми пакету MatLab fvtool відображається характеристика розрахованого фільтра у програмі пакету MatLab GUI FVTool (рис. 1.4).

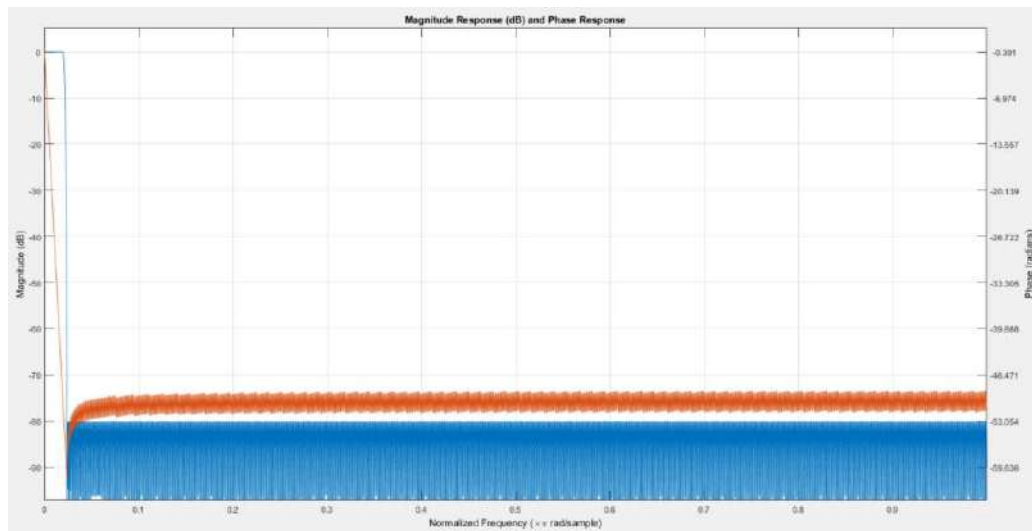


Рисунок 1.4 – АЧХ/ФЧХ розрахованого КІХ-фільтра ФНЧ для $f_0=10$ МГц

На рисунку 1.5 зображено групову затримку КІХ-фільтра ФНЧ для $f_0=10$ МГц, а на рисунку 1.6 відображено результат фільтрації розрахованим ФНЧ одиничної функції провідності зі значенням широкосмугової похибки вимірювання 10 %. Рівень придушення помилкового шуму складає приблизно 10 dB.

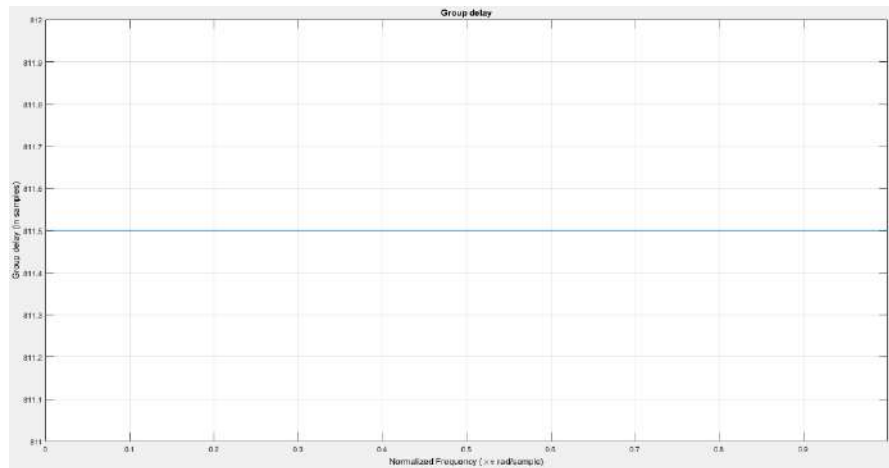


Рисунок 1.5 – Групова затримка КІХ-фільтру ФНЧ для $f_0=10$ МГц

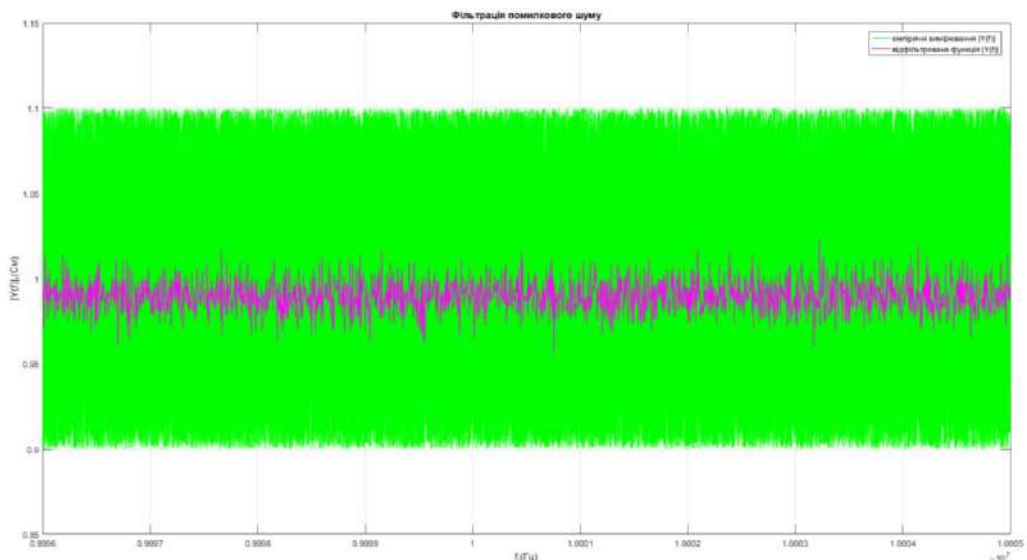


Рисунок 1.6 – Фільтрація помилкового шуму

На основних ділянках вимірювання інтервал діапазону частот послідовних резонансів для різних значень добротності розраховується з урахуванням відсікання перехідного процесу після фільтрації – кількість нормованих відліків для відсікання розраховується із запасом як $2h_1$ (відомо, що довжина перехідного процесу для КІХ-фільтру оцінюється як порядок

фільтру, тобто $h1-1$). Для ділянки частот паралельного резонансу інтервал з кроком $step$ розраховується як $f_{par} \pm 1.0001 * f_{par}$.

Блок програм апроксимації модуля провідності одно-резонансного контуру містить наступні програми (додаток А):

– `Experiment_1R_10MHz` – програма розрахунку фактичних та експериментальних даних виміру з заданою похибкою. При цьому під фактичними тут і далі маються на увазі розраховані по вищенаведеним формулам теоретичні резонансні криві, які при модулюванні «вимірюються» з додаванням помилки. У програмі задаються вхідні параметри: f_0 , Q , C_0 , R , крок частоти $step$, похибка вимірювання $error$ (у відсотках). При цьому фактичні значення L , C , діапазон частот послідовного резонансу $f_{min}(a)$, $f_{max}(b)$, а також діапазон частот $f_{par} \pm 1.0001 * f_{par}$ розраховуються автоматично. Для зручного вводу параметрів контуру в програмі не використовується інтерактивний ввід значень – це здійснюється шляхом вводу значень в самій програмі, що є зручним при зміні одного з параметрів і фіксуванні інших. В даній програмі, а також у всіх інших наведені детальні коментарі. Вихідними даними програми є відповідні файли даних для подальшого розрахунку у програмах формування фільтру ФНЧ та програмах апроксимації/оптимізації;

– `Filter_FIR_LPF` – розглянута вище програма формування параметрів КІХ-фільтру ФНЧ;

– `Fminsearch_1R` – програма апроксимації/оптимізації з використанням функції мінімізації з пакету `MatLab` `fminsearch`. Функція `fminsearch` реалізує метод Нелдера-Міда. При обчисленні функцією `fminsearch` передбачено виведення статистичних даних процесу: кількість ітерацій `Iterations` та кількість звертань до цільової функції `FuncCount`, а також загальний час виконання програми `Fminsearch_1R`. У програмі `Fminsearch_1R`, як зазначено вище, виконується фільтрація функції експериментальних даних, відсікання перехідного процесу зі зворотним зсувом вліво по осі нормованих частот на

нормоване значення групової затримки фільтра. У програмі `Fminsearch_1R` також розраховуються початкові значення параметрів контуру L , C , R , C_0 , а також відображаються у відсотках похибки розрахування початкових та вихідних значень відносно фактичних. При цьому для збільшення точності частота максимуму кривої уточнюється по емпіричним даним, а значення максимуму та смуга пропуску контуру за рівнем 0.707 розраховуються по фільтрованим даним;

- `Funfim_1R` – підпрограма, яка формує цільову функцію у вигляді суми квадратів різниць між емпіричними вимірами і теоретичними значеннями для обчислення функції `fminsearch` у програмі `Fminsearch_1R`;

- `Lsqnonlin_1R` – програма апроксимації/оптимізації з використанням функції мінімізації з пакету `MatLab` `lsqnonlin`. Функція `lsqnonlin` об'єднує реалізацію методів Ньютона-Гаусса і Левенберга-Марквардта (`algorithm: 'trust-region-reflective'`). В іншому програма `Lsqnonlin_1R` виконує функції, розглянуті вище для програми `Fminsearch_1R`;

- `Funlsq_1R` – підпрограма, яка формує цільову функцію у вигляді суми різниць між емпіричними вимірами і теоретичними значеннями для обчислення функції `lsqnonlin` у програмі `Lsqnonlin_1R`.

У таблиці 1.1 наведені результати модулювання одно-резонансних кривих для центральної частоти резонансу $f_0=10$ МГц при значеннях добротності $Q=10^4, 10^5, 10^6$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10%. У таблиці також наведені параметри процесу обчислення, а саме: кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій `Iterations` та кількість звертань до цільової функції `FuncCount`, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 1.1 – Апроксимація одно-резонансної кривої, ($f_0=10.0$ МГц)

Добротність контуру, Q	Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів					Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time		
			r	L	C	CO	f_0						
10^4	0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.00159 Гн	0.159 нФ	10.0 нФ	9999996.9 Гц	193416	-	-	-		
		Похибка розрахунку початкового значення	0.99 %	1.03 %	1.01 %	0.016 %	-		-	-	-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	1.75e-11 %	5.99e-11 %	5.99e-11 %	9.95e-10 %	0 Гц		634	1114	1.98 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	2.13e-08 %	4.99e-08 %	4.99e-08 %	1.07e-07 %	0 Гц		31	160	4.35 c		
	5	Похибка розрахунку початкового значення	1.21 %	1.45 %	1.43 %	4.38 %	-		-	-	-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.039 %	0.0085 %	0.0085 %	0.055 %	0.1 Гц		686	1209	1.94 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.039 %	0.0085 %	0.0085 %	0.055 %	0.1 Гц		35	180	4.63 c		
	10	Похибка розрахунку початкового значення	0.96 %	1.09 %	1.10 %	7.51 %	-		-	-	-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.026 %	0.0051 %	0.0052 %	0.29 %	0.6 Гц		669	1181	1.92 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.026 %	0.0051 %	0.0052 %	0.29 %	0.6 Гц		41	210	4.95 c		
	10^5	0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.0159 Гн	0.0159 нФ	10.0 нФ		9999999.7 Гц	45971	-	-	-
			Похибка розрахунку початкового значення	0.56 %	1.37 %	1.35 %	0.0016 %		-		-	-	-
Похибка апроксимації, метод fminsearch			2.61e-10 %	2.15e-10 %	2.15e-10 %	9.47e-10 %	0 Гц	2527	4186		1.32 c		
Похибка апроксимації, метод lsqnonlin			3.99e-09 %	2.96e-09 %	2.96e-09 %	1.60e-08 %	0 Гц	180	905		5.10 c		
5		Похибка розрахунку початкового значення	0.12 %	2.87 %	2.79 %	1.86 %	-	-	-		-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.14 %	0.00061 %	0.00061 %	0.015 %	0 Гц	3799	6285		1.83 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.14 %	0.00052 %	0.00052 %	0.014 %	0 Гц	337	1690		9.23 c		
10		Похибка розрахунку початкового значення	0.014 %	1.43 %	1.41 %	0.36 %	-	-	-		-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.57 %	0.33 %	0.33 %	0.086 %	0.1 Гц	2109	3541		1.11 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.57 %	0.33 %	0.33 %	0.085 %	0.1 Гц	190	955		5.29 c		
10^6		0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.159 Гн	0.00159 нФ	10.0 нФ	10000000 Гц	27959		-	-	-
			Похибка розрахунку початкового значення	1.39 %	1.56 %	1.59 %	0.00016 %	-			-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch		5.93e-09 %	4.65e-09 %	4.65e-09 %	1.56e-08 %	0 Гц	10550		17244	3.14 c		
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin		2.29e-04 %	7.14e-04 %	7.14e-04 %	1.21e-04 %	0 Гц	1149		5750	14.17 c		
	5	Похибка розрахунку початкового значення	1.97 %	1.95 %	1.99 %	1.74 %	-	-		-	-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.63 %	0.079 %	0.079 %	0.034 %	0 Гц	11933		19381	3.44 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.63 %	0.081 %	0.081 %	0.033 %	0 Гц	756		3785	10.18 c		
	10	Похибка розрахунку початкового значення	1.37 %	1.58 %	1.61 %	9.43 %	-	-		-	-		
		Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.045 %	0.064 %	0.064 %	0.18 %	0 Гц	10202		16647	3.03 c		
		Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.042 %	0.075 %	0.075 %	0.18 %	0 Гц	663		3320	8.88 c		

На рисунках 1.7, 1.8 відображено результати виконання програми Experiment_1R_10MHz, відповідно графіки фактичних та емпіричних даних для $Q=10^4$ на ділянках послідовного та паралельного резонансу при максимальному значенні похибки 10%.

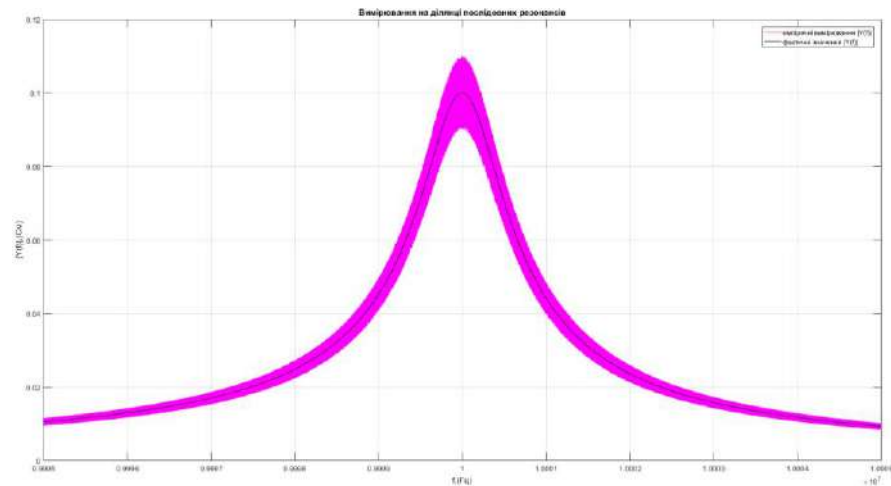


Рисунок 1.7 – Графіки фактичних та емпіричних даних на ділянці послідовного резонансу (програма Experiment_1R_10MHz $Q=10^4$, похибка 10%)

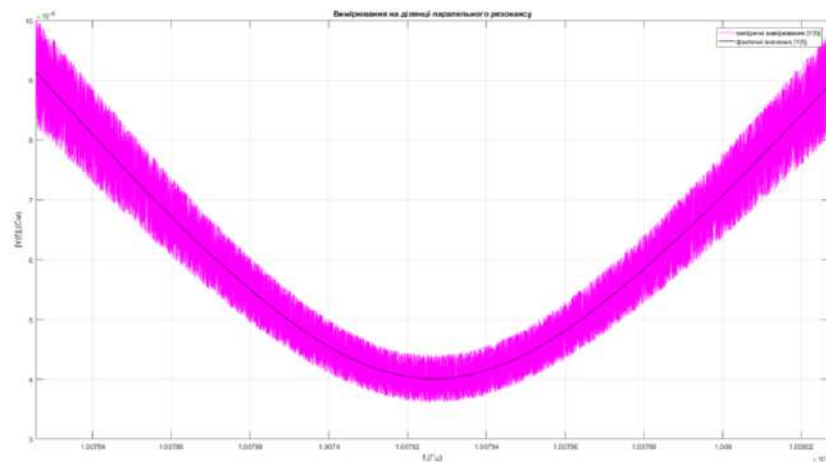


Рисунок 1.8 – Графіки фактичних та емпіричних даних на ділянці паралельного резонансу (програма Experiment_1R_10MHz $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 1.9 відображено результат виконання програм Fminsearch_1R та Lsqnonlin_1R для $Q=10^4$ – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних (з відсіканням перехідного процесу та зворотнім

зсувом на величину групової затримки – далі в роботі відфільтровані дані будуть представлятися у цьому форматі) на ділянці послідовного резонансу. Також далі в роботі всі графіки будуть наведені для результатів модулювання при максимальному значенні похибки 10%.

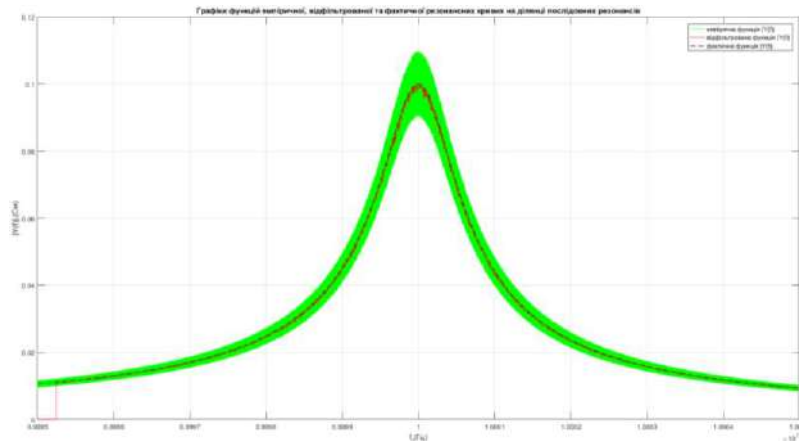


Рисунок 1.9 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовного резонансу ($Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 1.10 відображено результат виконання програми `fminsearch_1R` для $Q=10^4$ – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних.

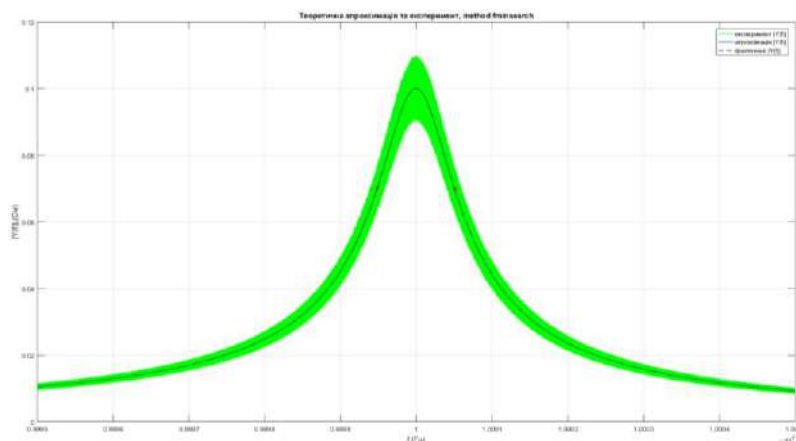


Рисунок 1.10 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці послідовного резонансу (метод `fminsearch`, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 1.11 відображено результат виконання програми Fminsearch_1R у полі Command Window для $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window Page 1

>> Fminsearch_1R
-----
Фактичні, закладені при модульванні, значення параметрів двох контурів:
rfact =
    10
lfact =
    1.591549430918953e-03
cfact =
    1.591549430918953e-13
cofact =
    9.999999999999999e-12
fofact =
    9.999996900000000e+06
-----
Нормована довжина вектору інтервалу часоти- кількість відпиків на інтервалі
вмірвання:
h =
    193416
-----
Нормований відлік групової затримки фільтра КИХ-ФНЧ:
gdelay =
    812
-----
r =
    1.009574488157905e+01
q =
    9.797202410062102e+03
L =
    1.574201726357712e-03
C =
    1.609086859022896e-13
CO =
    9.249083349786450e-12
-----
Відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів R,L,C від
фактичних:
deviation_r =
    9.574488157905403e-01
deviation_L =
    1.089988824124855e+00
deviation_C =
    1.101909105884125e+00
deviation_CO =
    7.509166502135500e+00
-----
OUTPUT =
struct with fields:

    iterations: 669
    funcCount: 1181
    algorithm: 'Nelder-Mead simplex direct search'
    message: 'Optimization terminated.'
-----
MATLAB Command Window Page 2
-----
Вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при апроксимації/оптимізації:
r =
    9.997373293212876e+00
L =
    1.591631173638093e-03
C =
    1.591467486452431e-13
CO =
    1.002933913223258e-11
-----
Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від фактичних:
deviation_r =
    2.626706787124400e-02
deviation_L =
    5.136046518461175e-03
deviation_C =
    5.148722680592410e-03
deviation_CO =
    2.933913223258200e-01
-----
Вихідне значення резонансної частоти:
f0 =
    9.999997500000000e+06
-----
Відхилення у Гц вихідного значення резонансної частоти від фактичної:
deviation_f0 =
    5.99999996274710e-01
-----
Elapsed time is 1.917685 seconds.
>>

```

Рисунок 1.11 – Результат виконання програми Fminsearch_1R у полі Command Window (метод fminsearch, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 1.12 відображено результат виконання програми Lsqnonlin_1R у полі Command Window для $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window Page 1

>> Lsqnonlin_1R
-----
Фактичні, закладені при кодуванні, значення параметрів двох контурів:
rfact =
    10
Lfact =
    1.591549430919953e-03
Crfact =
    1.591549430919953e-13
Crfact =
    9.999999999999999e-12
Lfact =
    9.999999999999999e-06
-----
Нормована довжина вектору інтервалу частоти: кількість відліків на інтервалі
вимірювання:
h =
    193116
-----
Нормований відлік групової затримки фільтра КТХ-ФНЧ:
grdelay =
    812
-----
r =
    1.009574488157985e+01
C =
    9.797202410082102e+03
L =
    1.574201726357712e-03
C =
    1.609086859022896e-13
C0 =
    9.249083349786450e-12
-----
Відхилення у відсотках розрахункових початкових значень параметрів R,L,C від
фактичних:
deviation_r =
    9.574468137905403e-01
deviation_L =
    1.089988424124885e+00
deviation_C =
    1.101909195884125e+00
deviation_C0 =
    7.509166992135580e+00
-----
Local minimum possible.

lsqnonlin stopped because the final change in the sum of squares relative to
its initial value is less than the selected value of the function tolerance.

<stopping criteria details>

MATLAB Command Window Page 2

OUTPUT =
  struct with fields:

    FirstOrderStop: 2.320725479710203e-06
    iterations: 41
    FuncCount: 210
    iterations: 0
    algorithm: 'trust-region-reflective'
    escapeSize: 5.332492896838062e-08
    message: 'Local minimum possible..'

-----
Вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при апроксимації/оптимізації:
r =
    9.997373279951590e+00
L =
    1.591631115640396e-03
C =
    1.591467644437896e-13
C0 =
    1.002933671540231e-11
-----
Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від фактичних:
deviation_r =
    2.626720648409803e-02
deviation_L =
    5.132402412733050e-03
deviation_C =
    5.145979346446924e-03
deviation_C0 =
    2.933871540202316e-01
-----
Вихідне значення резонансної частоти:
f0 =
    9.999975000000000e+06
-----
Відхилення у Гц вихідного значення резонансної частоти від фактичної:
deviation_f0 =
    3.99999996274711e-01
-----
Elapsed time is 4.951155 seconds.
>>

```

Рисунок 1.12 – Результат виконання програми Lsqnonlin_1R у полі Command Window (метод lsqnonlin, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 1.13 відображено результат виконання програми Lsqnonlin_1R для $Q=10^4$ – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних.

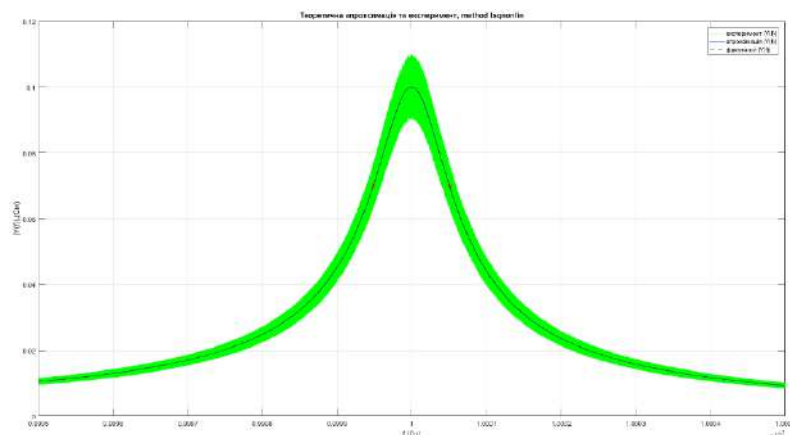


Рисунок 1.13 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці послідовного резонансу (метод lsqnonlin, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 1.14 відображено результат виконання програми Fminsearch_1R для $Q=10^5$ – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних.

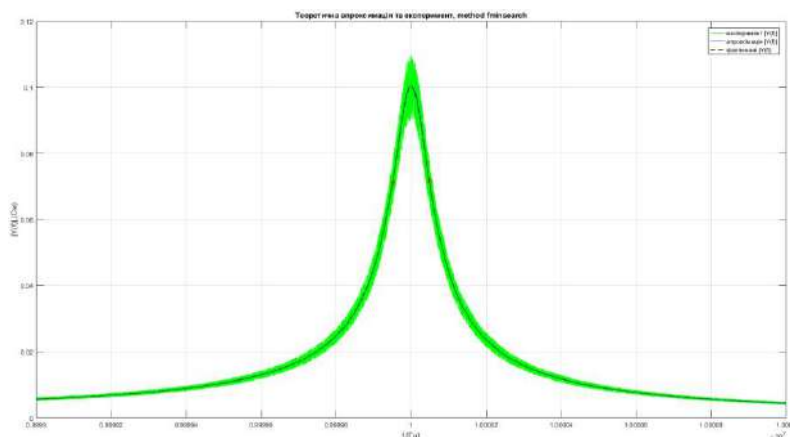


Рисунок 1.14 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці послідовного резонансу (метод fminsearch, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 1.15 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_1R` для $Q=10^5$ – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних.

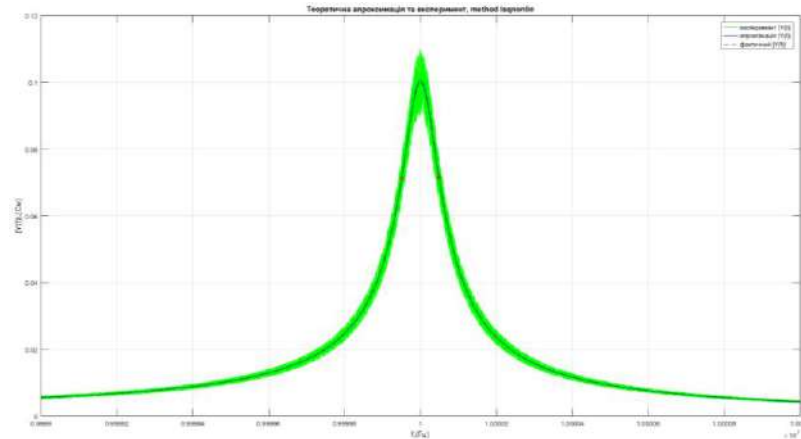


Рисунок 1.15 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці послідовного резонансу (метод `lsqnonlin`, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 1.16 відображено результат виконання програми `fminsearch_1R` для $Q=10^6$ – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних.

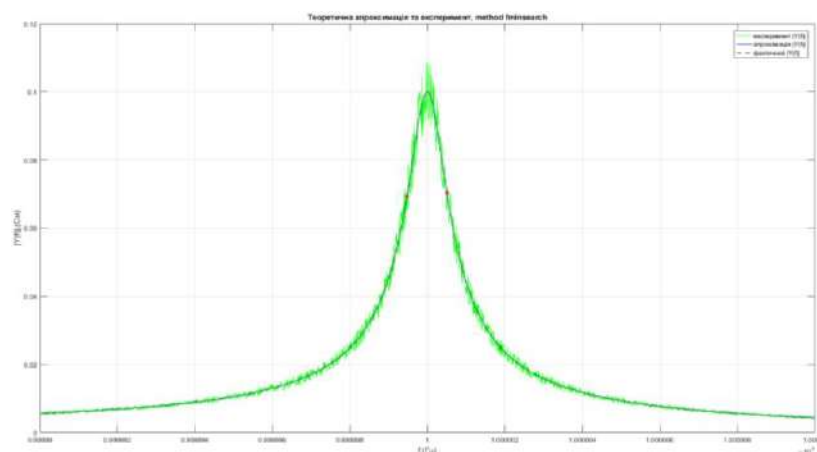


Рисунок 1.16 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці послідовного резонансу (метод `fminsearch`, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 1.17 відображено результат виконання програми Lsqnonlin_1R для $Q=10^6$ – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних.

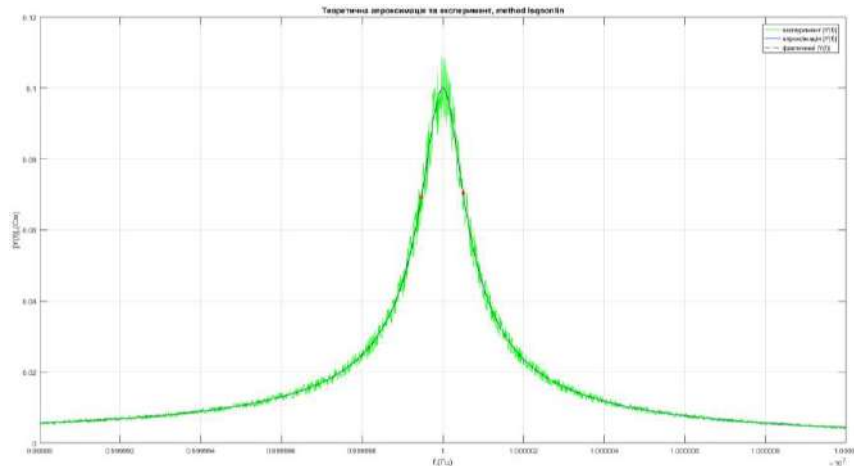


Рисунок 1.17 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці послідовного резонансу (метод lsqnonlin, $Q=10^6$, похибка 10%)

З отриманих результатів (табл. 1.1) випливає, що при апроксимації одно-резонансних кривих за точністю обчислення при ненульовій похибці вимірювань функції fminsearch і lsqnonlin мають практично однаковий ідеальний результат з похибкою менше 1% для значень R, L, C, та відхиленням менше 1 Гц для резонансної частоти, при цьому за кількістю ітерацій та звертань до цільової функції метод fminsearch значно перевищує lsqnonlin, але за часом виконання навпаки, метод lsqnonlin перевищує fminsearch. При порівнянні результату при похибці 10% для $Q=10^5$ та $Q=10^6$ спостерігаємо начебто парадоксальну ситуацію, коли при більшій похибці вимірювання та швидкості зміни функції провідності для $Q=10^6$ маємо кращу похибку апроксимації і відповідно суттєво більші значення кількості ітерацій, звертань до цільової функції, часу виконання для обох методів. Це можна пояснити тим, що обидва методи дуже чутливі не тільки до середньої точності розрахування початкових умов, а і до співвідношення між ними, так

як виконується обробка кривих з дуже високою добротністю і відповідно швидкістю зміни значень функції від частоти в області резонансу. Також, як і очікувалось спостерігається загальна закономірність, що зі збільшенням значення добротності Q збільшуються середній час виконання обох програм, кількість ітерацій та звертань до цільової функції, похибка апроксимації, що пояснюється тим, що із зростанням добротності Q , збільшується швидкість зміни значень функції від частоти в області резонансу і при цьому зменшується відносна кількість відліків на смугу перепуску резонансної кривої, так для значення добротності $Q=10^4$ кількість відліків на смугу перепуску за рівнем 0.707 дорівнює $(f_0/10^4)/\text{step}=(10^7/10^4)/0.1=10000$, відповідно для значень добротності $Q=10^5$ та $Q=10^6$ маємо значення 1000 та 100 відліків.

2 АПРОКСИМАЦІЇ ДВОХ-РЕЗОНАНСНИХ КРИВИХ

Еквівалентна схема двох-резонансного контуру зображена на рисунку 2.1.

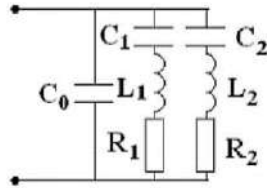


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема двох-резонансного контуру

По аналогії з одно-резонансним контуром вираз для провідності еквівалентного двох-резонансного контуру має вигляд:

$$Y(\omega) = j\omega C_0 + \frac{1}{[R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})]} + \frac{1}{[R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})]},$$

$$G(\omega) = \frac{R_1}{[R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2]} + \frac{R_2}{[R_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2]},$$

$$B(\omega) = \omega C_0 - \frac{(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})}{[R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2]} - \frac{(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}{[R_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2]},$$

де $G(\omega)$ – активна частина провідності $Y(\omega)$;

$B(\omega)$ – реактивна частина провідності $Y(\omega)$.

Відповідно модуль провідності $Y(w)$ дорівнює:

$$|Y(w)| = \sqrt{G^2(w) + B^2(w)}.$$

Як і у випадку одно-контурної схеми, у двох-контурній еквівалентній схемі також маємо два типу резонансу:

- перший послідовний резонанс, утворений елементами L_1, C_1, R_1 з максимальним значенням $|Y(w)|$ на частоті резонансу $W_{01} = 1/\sqrt{L_1 C_1}$;
- другий послідовний резонанс, утворений елементами L_2, C_2, R_2 з максимальним значенням $|Y(w)|$ на частоті резонансу $W_{02} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$.

Отримаємо вирази для частот $W_{партах}$, $W_{пармін}$ для паралельного резонансу, утвореного елементами $L_1, C_1, L_2, C_2, C_0, R_1, R_2$. Еквівалентна схема активних і реактивних провідностей зображена на рисунку 2.2.

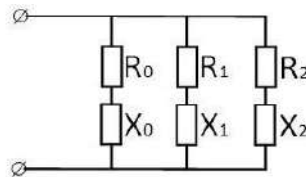


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема активних і реактивних провідностей двох-резонансного контуру

$$Y(w) = \frac{1}{(R_0 + jX_0)} + \frac{1}{(R_1 + jX_1)} + \frac{1}{(R_2 + jX_2)},$$

$$Y(w) = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2) + (R_0 + jX_0)(R_2 + jX_2) + (R_0 + jX_0)(R_1 + jX_1)}{(R_0 + jX_0)(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}.$$

Так як на частоті $\Gamma_{\text{пар}}$ $jX_1 \gg R_1, jX_2 \gg R_2, R_0=0$:

$$Y(w) = \frac{-X_1X_2 - X_0X_2 - X_0X_1}{(R_0 + jX_0)(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}.$$

Вочевидь $|Y| \rightarrow \min$ при $X_1X_2 + X_0X_2 + X_0X_1 = 0$.

$$X_0 = -\frac{1}{wC_0}, \quad X_1 = wL_1 - \frac{1}{wC_1}, \quad X_2 = wL_2 - \frac{1}{wC_2},$$

$$X_1X_2 + X_0(X_2 + X_1) = 0$$

$$\left(wL_1 - \frac{1}{wC_1}\right)\left(wL_2 - \frac{1}{wC_2}\right) = \frac{1}{wC_0}\left(wL_1 + wL_2 - \frac{1}{wC_1} - \frac{1}{wC_2}\right),$$

після перетворення маємо:

$$w^4L_1L_2C_1C_2 - w^2\left(L_1C_1 + L_2C_2 + (L_1 + L_2)\frac{C_1C_2}{C_0}\right) + \frac{(C_1 + C_2)}{C_0} + 1 = 0,$$

приймаємо $X = w^2$, отримали квадратне рівняння $ax^2 + bx + c = 0$, де:

$$a = L_1L_2C_1C_2, \quad b = -\left(L_1C_1 + L_2C_2 + (L_1 + L_2)\frac{C_1C_2}{C_0}\right),$$

$$c = \frac{(C_1 + C_2)}{C_0} + 1,$$

$$X_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

$$W_{\text{парmax}} = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}},$$

$$W_{\text{парmin}} = \sqrt{\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}}.$$

У наведених викладках $R_0 + jX_0$, $R_1 + jX_1$, $R_2 + jX_2$ – комплексні імпеданси відповідно вхідної ємності C_0 , першого та другого контурів.

Значення частоти $W_{\text{парmax}}$ ($f_{\text{парmax}}$) використовується при уточненні інтервалу вимірювання.

Як зазначалося вище, методи апроксимації високодобротних резонансних кривих чутливі до похибки розрахування початкових значень. Для двох-резонансної схеми цей фактор набуває ще більшого значення, особливо при апроксимації близько-розташованих резонансних контурів з великим взаємовпливом контурів одного на іншого. В даній роботі близько-розташовані контури, які досліджуються, мають відстань між резонансними частотами, яка дорівнює смузі пропуску за рівнем 0.707 для модуля провідності та за рівнем 0.5 для активної складової провідності (при дослідженні трьох-резонансних кривих у розділі 3). Відповідно, віддалено-розташовані контури мають відстань між резонансними частотами, яка дорівнює $10 \cdot F_{0.707}$ для модуля провідності та $10 \cdot F_{0.5}$ для активної складової провідності. Враховуючи зазначений фактор, процедура розрахунку початкових значень виділена в окрему об'ємну програму `Initial_conditions_2R`, яка виконується в 4-й етапі. На першому етапі, по аналогії с одно-резонансним контуром, за допомогою описаної вище програми `Filter_FIR_LPF` розраховується функція відфільтрованих емпіричних даних `yabsf2` з відсіканням перехідного процесу та зворотним зсувом вліво по осі нормованих частот на нормоване значення групової затримки фільтра. На другому етапі здійснюється пошук максимумів

резонансів завдяки формуванню спеціальної лінійно-апроксимованої функції `yabsf2LINE` з адаптивним кроком лінеаризації (рис. 2.3).

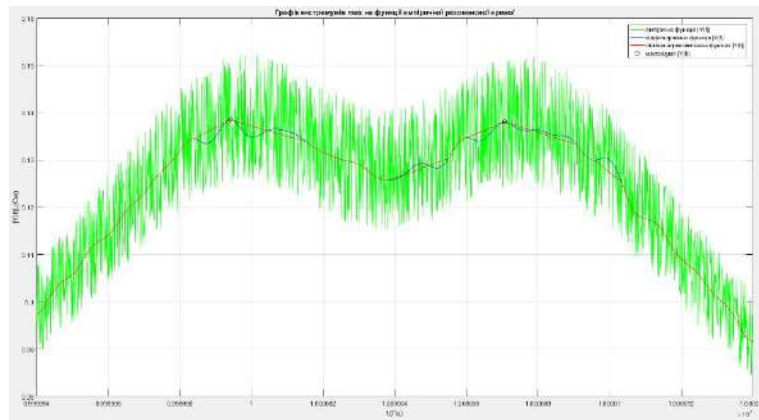


Рисунок 2.3 – Формування спеціальної лінійно-апроксимованої функції з адаптивним кроком лінеаризації

У процесі формування функції `yabsf2LINE` розраховується середнє значення на інтервалі нормованої частоти функції `yabsf2` з поступовим збільшенням кроку m доти різниця по модулю між середніми значеннями на поточному та попередньому інтервалах не перевищить значення порогу `crop`, помноженого на поточне середнє значення – за цієї умови приймається рішення про зростання або спадання функції `yabsf2` та фіксації поточного інтервалу лінеаризації. Зазначений алгоритм дозволяє ефективно відсікати шум похибки та формувати функцію `yabsf2LINE` тільки з наявними максимумами, які відповідають резонансам. Початкове значення `crop` у програмі за замовченням дорівнює 0.035 – це значення приймається з урахуванням відфільтрованої 10%-ої помилки, а як відзначалось вище, рівень придушення помилки складає 10 dB. Мінімальна кількість відліків при знаходженні середнього значення `yabsf2` розраховується по формулі $m = \text{round}((f/Q_{\text{max}})/(20 \cdot \text{step})) = (10^7/10^6)/20 \cdot 0.1 = 5$ – це значення забезпечує ефективну обробку резонансних кривих у всьому діапазоні добротності Q . Пошук екстремумів max функції `yabsf2LINE` відбувається за допомогою

стандартної функції пакету MatLab `findpeaks`. Для забезпечення пошуку близько-розташованих максимумів функції `yabsf2` у програмі передбачено інтерактивний режим вводу коректованого значення `crop` та рівня відсікання нижчих максимумів помилки (рис. 2.4).

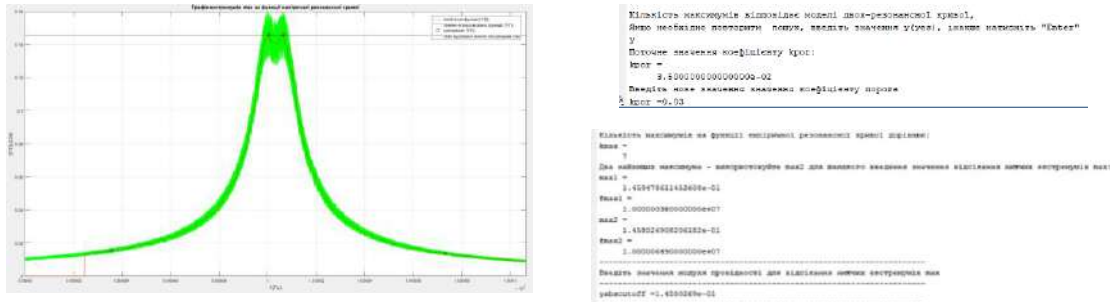


Рисунок 2.4 – Інтерактивний режим вводу коректованого значення `crop` та рівня відсікання нижчих максимумів помилки

Після підтвердження дослідником коректності знаходження максимальних екстремумів функції `yabsf2LINE` на третьому етапі здійснюється розрахунок початкових значень параметрів резонансних кривих. При цьому, як і для одно-резонансних кривих для збільшення точності частота максимуму кривої уточнюється по емпіричним даним (`yabsxpr`), а значення максимуму та смуга пропуску контуру за рівнем 0.707 розраховуються по фільтрованим даним (`yabsf2`). Для зменшення негативного взаємовпливу близько-розташованих резонансів при обчисленні початкових умов додано спеціальні коригуючі коефіцієнти для опору R та добротності Q , які враховують вказаний взаємовплив (формули для коригуючих коефіцієнтів отримано логіко-експериментальним шляхом при аналізі форми апроксимованих кривих):

$$y1 = yabsmax1 / (1 + (((fr2 - frmin1) / (fr2 - fr1))^2) * (yabsmin1 / yabsmax1) * (yabsmax2 / \sqrt{yabsmax1 * yabsmax2}));$$

$$r1 = 1 / y1;$$

$$\begin{aligned}
q1 &= (fr1/raz1) * (1 + (((fr2 - frmin1) / (fr2 - fr1)) * (yabsmin1 / yabsmax1) \\
& * (yabsmax2 / \sqrt{yabsmax1 * yabsmax2})))^2); \\
y2 &= yabsmax2 / (1 + (((frmin1 - fr1) / (fr2 - fr1))^2) * (yabsmin1 / yabsmax2) \\
& * (yabsmax1 / \sqrt{yabsmax1 * yabsmax2}))); \\
r2 &= 1 / y2; \\
q2 &= (fr2 / raz2) * (1 + (((frmin1 - fr1) / (fr2 - fr1)) * (yabsmin1 / yabsmax2) \\
& * (yabsmax1 / \sqrt{yabsmax1 * yabsmax2})))^2);
\end{aligned}$$

де $fr1 < fr2$ – частоти послідовних резонансів;

$fmin1$ – частота min між max резонансів;

$fr1 < fmin1 < fr2$, $yabsmax1$, $yabsmax2$, $yabsmin1$ – відповідні значення модуля провідності;

$raz1$, $raz2$ – відповідні смуги пропуску на рівні 0,707 для резонансних кривих.

Пошук початкових значень параметрів для лівого та правого контурів здійснюється подібно одноконтурній схемі з тією різницею, що для запобігання впливу сусіднього контуру, спочатку визначається крайня зовнішня половина смуги пропуску контуру на рівні 0.707 від max значення резонансу, потім множенням на 2 розраховується повна смуга пропуску контуру на рівні 0.707, і далі використовуються відомі класичні формули для визначення параметрів L, C, R контуру при послідовному резонансі:

$$\rho = W_0 \cdot L = 1 / W_0 \cdot C = Q \cdot R, \quad Q = W_0 / W_{0.707}, \quad R = 1 / |Y(W_0)|, \quad |Y(W_0)| = |Y(w)|_{\max},$$

де ρ – характеристичний опір резонансного контуру.

На четвертому етапі здійснюється уточнення отриманих початкових значень за допомогою вирішення системи нелінійних рівнянь, які складені по попередньо розрахованим значенням модуля провідності в характерних 7-ти точках резонансних кривих: $wr1$, $yabsmax1$, $wr2$, $yabsmax2$, $wmin1$, $yabsmin1$, $wr1L$, $yabswr1L$, $wr2R$, $yabswr2R$, $wr1R05$, $yabswr1R05$, $wr2L05$, $yabswr2L05$. Опис точок наведено в коментарях в програмі. Для двох-резонансних кривих вирішується система з 7 рівнянь для 6-ти змінних $[r1 \ L1 \ C1 \ r2 \ L2 \ C2]$ за

допомогою стандартної функції з пакету MatLab `fsolve`. Програма `fsolve` для пошуку рішення використовує алгоритм мінімізації Левенберга-Марквардта. Значення паразитної ємності C_0 уточнюється в основній програмі апроксимації.

Блок програм апроксимації модуля провідності двох-резонансного контуру містить наступні програми (додаток Б):

- `Experiment_2R_10MHz` – програма розрахунку фактичних та експериментальних даних виміру з заданою похибкою. На відміну від одно-резонансних кривих, вихідними даними програми є відповідні файли даних для подальшого розрахунку у програмах формування фільтру ФНЧ, розрахунку початкових значень та програмах апроксимації/оптимізації. Також на відміну від одно-резонансних кривих, у програмі задається відповідно більше вхідних параметрів: f_{01} , Q_1 , R_1 , f_{02} , Q_2 , R_2 , C_0 ;

- `Filter_FIR_LPF` – розглянута вище програма формування параметрів КІХ-фільтру ФНЧ (наведена в додатку А). Як і для одно-резонансних кривих, якщо дослідження виконуються в діапазоні частот $f_{01}(f_{02}) \pm 1\%$, то при зміні частоти постійно звертатися до виконання програми `Filter_FIR_LPF` немає потреби – розраховані на початку вихідні параметри без змін використовуються в наступній програмі розрахунку початкових значень;

- `Initial_conditions_2R` – розглянута вище програма розрахунку початкових значень. Вихідними даними програми є відповідний файл для програм апроксимації/оптимізації;

- `Clarification_2R` – підпрограма вирішення системи нелінійних рівнянь для програми `Initial_conditions_2R`;

- `Sysequat_2R` – підпрограма, яка формує систему нелінійних рівнянь для обчислення в підпрограмі `Clarification_2R`;

- `Fminsearch_2R` – програма апроксимації/оптимізації з використанням функції мінімізації з пакету MatLab `fminsearch`. На відміну від одно-

резонансних кривих програма не розраховує початкових значень – цю функцію виконує програма `Initial_conditions_2R`;

– `Funfim_2R` – підпрограма, яка формує цільову функцію у вигляді суми квадратів різниць між емпіричними вимірами і теоретичними значеннями для обчислення функції `fminsearch` у програмі `Fminsearch_2R`;

– `Lsqnonlin_2R` – програма апроксимації/оптимізації з використанням функції мінімізації з пакету `MatLab lsqnonlin`. На відміну від одно-резонансних кривих програма не розраховує початкових значень – цю функцію виконує програма `Initial_conditions_2R`;

– `Funlsq_2R` – підпрограма, яка формує цільову функцію у вигляді суми різниць між емпіричними вимірами і теоретичними значеннями для обчислення функції `lsqnonlin` у програмі `Lsqnonlin_2R`.

У таблицях 2.1, 2.2 наведені результати модулювання двох-резонансних кривих при значенні добротності $Q=10^4$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10% відповідно для випадків близько-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} та віддалено-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} . У таблицях також наведені параметри процесу обчислення, а саме: кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій `Iterations` та кількість звертань до цільової функції `FuncCount`, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 2.1 – Апроксимація двох-резонансних кривих, близько-розташовані резонанси ($q = 10^4$, $f_{01}=9999950$ Гц, $f_{02}= 10001054$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів									Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	C0	f01	f02				
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.00159 Гн	0.159 пФ	15 Ом	0.00239 Гн	0.106 пФ	10.0 пФ	-	-	255421	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.99 %	1.03 %	1.02 %	0.97 %	0.99 %	0.98 %	0.027 %	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.042 %	0.14 %	0.14 %	0.065 %	0.21 %	0.21 %	0.36 %	0.1 Гц	0.2 Гц		2144	3409	7.29 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	7.15e-10 %	1.13e-9 %	1.13e-9 %	7.76e-11 %	1.64e-9 %	1.65e-9 %	2.35e-9 %	0 Гц	0 Гц		73	592	19.92 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	1.28 %	2.52 %	2.46 %	0.32 %	2.02 %	2.06 %	4.81 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.54 %	1.78 %	1.75 %	0.82 %	2.60 %	2.67 %	4.11 %	1.9 Гц	3.4 Гц	1697	2737	5.80 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.019 %	0.055 %	0.055 %	0.023 %	0.15 %	0.15 %	0.28 %	0 Гц	0.4 Гц	457	3664	112.32 с	
10	Похибка розрахунку початкового значення	0.36 %	0.62 %	0.63 %	2.19 %	2.33 %	2.28 %	3.09 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.26 %	1.23 %	1.24 %	0.81 %	1.82 %	1.79 %	2.52 %	1.5 Гц	3.3 Гц	1677	2720	5.77 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.097 %	0.052 %	0.052 %	0.24 %	0.042 %	0.042 %	0.14 %	0.2 Гц	0.9 Гц	238	1912	60.81 с	

Таблиця 2.2 – Апроксимація двох-резонансних кривих, віддалено-розташовані резонанси ($q = 10^4$, $f_{01}=9999981$ Гц, $f_{02}= 10010032$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів									Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	C0	f01	f02				
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.00159 Гн	0.159 пФ	15 Ом	0.00239 Гн	0.106 пФ	10.0 пФ	-	-	340251	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	1.00 %	1.02 %	1.01 %	0.99 %	1.02 %	1.01 %	0.027 %	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.33 %	1.01 %	1.00 %	0.035 %	0.047 %	0.047 %	2.11 %	0.4 Гц	0.7 Гц		1874	2960	8.32 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	2.47e-11 %	1.67e-11 %	1.67e-11 %	3.86e-12 %	4.46e-12 %	4.45e-12 %	1.25e-10 %	0 Гц	0 Гц		38	312	13.36 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.44 %	1.11 %	1.10 %	1.38 %	0.058 %	0.058 %	1.26 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.33 %	1.11 %	1.10 %	0.039 %	0.034 %	0.034 %	2.06 %	1.0 Гц	0.6 Гц	951	1666	4.74 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.036 %	0.0029 %	0.0030 %	1.98e-4 %	0.021 %	0.021 %	0.26 %	0.6 Гц	0.1 Гц	30	248	11.55 с	
10	Похибка розрахунку початкового значення	1.43 %	0.87 %	0.86 %	1.27 %	0.025 %	0.025 %	3.32 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.35 %	0.87 %	0.86 %	0.012 %	0.011 %	0.011 %	1.63 %	0.4 Гц	1.2 Гц	589	1128	3.23 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.064 %	0.0098 %	0.0098 %	0.039 %	0.020 %	0.020 %	0.19 %	0 Гц	0.6 Гц	26	216	10.08 с	

На рисунках 2.5, 2.6 відображено результат виконання програми Experiment_2R_10MHz, відповідно графіки фактичних та емпіричних даних для $Q=10^4$ на ділянках близько-розташованих послідовних та відповідного паралельного резонансу.

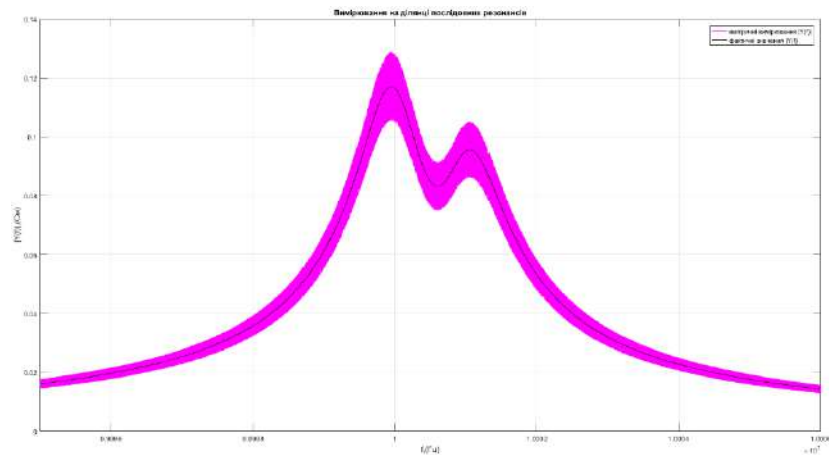


Рисунок 2.5 – Графіки фактичних та емпіричних даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Experiment_2R_10MHz, $Q=10^4$, похибка 10%)

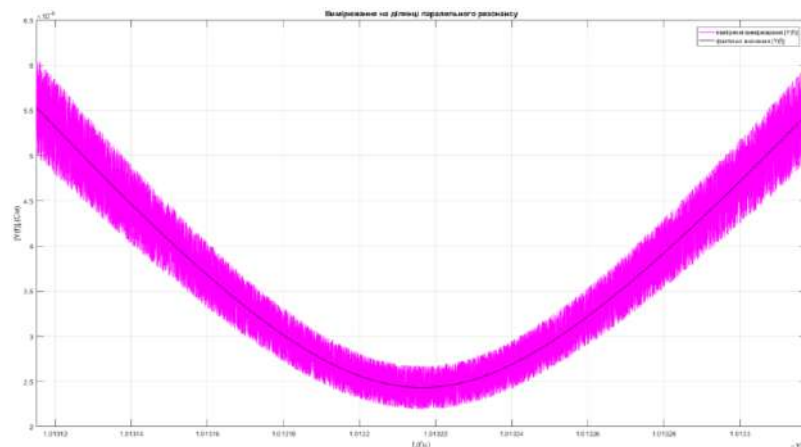


Рисунок 2.6 – Графіки фактичних та емпіричних даних на ділянці паралельного резонансу (близько-розташовані послідовні резонанси) (програма Experiment_2R_10MHz, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.7 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R у полі Command Window для близько-розташованих резонансів з $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window                                     Page 1
>> Initial_conditions_2R
-----
Вказівки, записані при модуляції, значення параметрів двох контурів:
r1fact =
    10
L1fact =
    1.591549430918953e-03
C1fact =
    1.591549430918953e-13
r2fact =
    10
L2fact =
    2.387085437930647e-03
C2fact =
    1.060926861299843e-13
C3fact =
    9.999999999999999e-12
-----
Вказівки до функції вектору лінійного частоти - кількість відліків на бітградус
колірипарамет:
n =
    255421
-----
Вказівки до функції групової затримки фільтра ВКХ-ОНЧ:
grdDelay =
    812
-----
m =
    5
-----
умаж =
    1.176541660799581e-03
    9.499663801077068e-02
Дваж =
    9.999958999999999e+06
    1.000105230000000e+07
Кількість максимумів на функції шпигункової резонансної кривої порівняє:
kmax =
    2
-----
Кількість максимумів відлікує модалі двох-резонансної кривої,
Якщо необхідно повторити пошук, введіть значення у(yes), інакше натисніть "Enter"
-----
Уточнені значення власновихів 1-го та 2-го резонансів,
re1 =
    9.999951699999999e+06
увалмак1 =
    1.160801955707071e-03
re2 =
    1.000106750000000e+07
увалмак2 =
    9.412273852382866e-02
-----
9.564313491269207e+00
9.326920191620127e+03
1.419757895471346e-03
1.784145077397598e-13
1.411608194388436e+01
1.112781171369672e+04
2.499756536057979e-03
1.013094211093837e-13
1.030885316164463e-11
-----
Початкові значення параметрів R,L,C від
функції:
r1ion =
    4.356865087307926e+00
L1ion =
    1.079398051422230e+01
C1ion =
    1.210114136181373e+01
r2ion =
    5.892787040770930e+00
L2ion =
    4.720027881596778e+00
C2ion =
    4.508571893004764e+00
C3ion =
    3.088531616446333e+00
-----
msg: Trust-region-dogleg algorithm of FSOLVE cannot handle non-square system
; Levenberg-Marquardt algorithm instead.
fsolve (line 298)
Clarification_2R (line 7)
Initial_conditions_2R (line 476)
ion solved, fsolve stalled.
-----
'w stopped because the relative size of the current step is less than the
std value of the step size tolerance and the vector of function values
is zero as measured by the selected value of the function tolerance.
-----
MATLAB Command Window                                     Page 3
-----
iterations: 1272
funcCount: 9546
atepnlze: 4.353841583066038e-11
cgiterations: []
firstorderopt: 7.26118403122617e-10
algorithm: 'levenberg-marquardt'
message: 'Equation solved, fsolve stalled.'
-----
Уточнені початкові значення параметрів R,L,C двох контурів:
r1 =
    1.003518116915983e+01
L1 =
    1.581632302797248e-03
C1 =
    1.601531691334835e-13
r2 =
    1.532860416461042e+01
L2 =
    2.44276795421196e-03
C2 =
    1.036744301025140e-13
-----
Відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів R,L,C від
фактичних:
deviation_r1 =
    3.618116915983016e-01
deviation_L1 =
    6.231115370371576e-01
deviation_C1 =
    6.272039197750430e-01
deviation_r2 =
    2.190684430736118e+00
deviation_L2 =
    2.332658760511719e+00
deviation_C2 =
    2.279380522610819e+00
deviation_C3 =
    3.088531616446333e+00
-----
>>

```

Рисунок 2.7 – Результат виконання програми Initial_conditions_2R у полі Command Window (близько-розташовані резонанси з $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.8 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

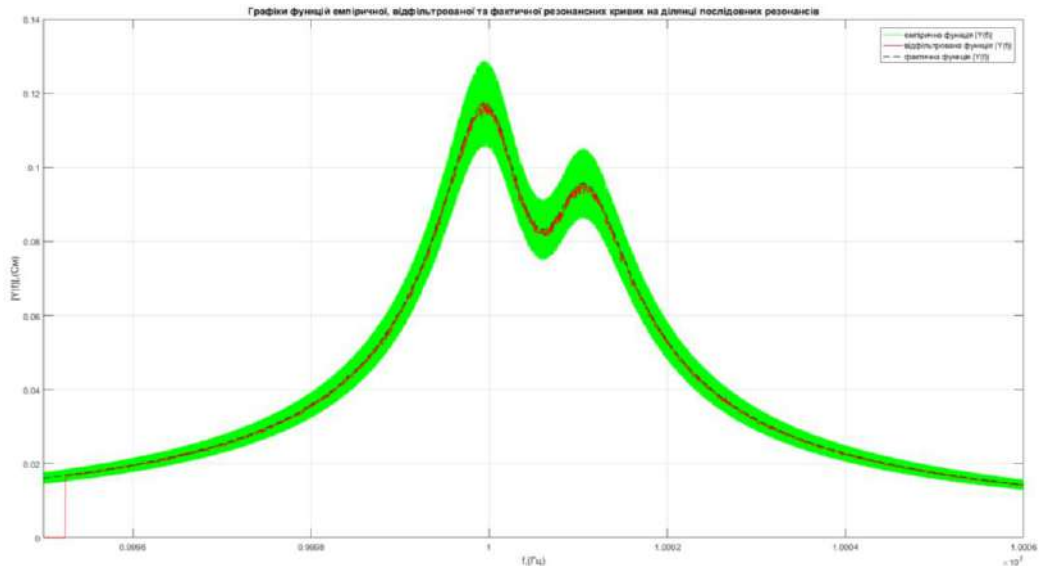


Рисунок 2.8 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.9 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

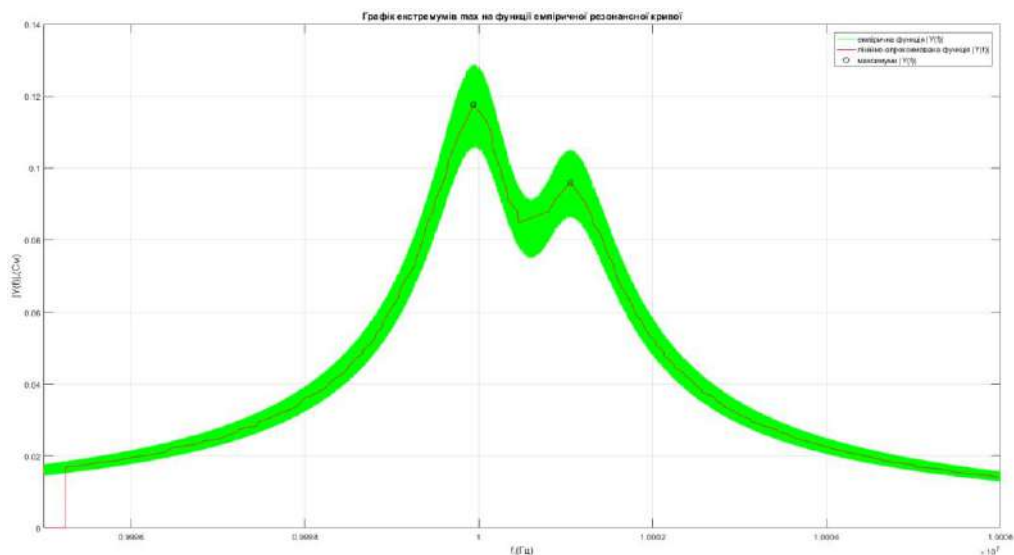


Рисунок 2.9 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.10 відображено результат виконання програми Fminsearch_2R у полі Command Window для близько-розташованих резонансів з $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window Page 1

>> Fminsearch_2R
-----
Фактичні, закладені при модульванні, значення параметрів двох контурів:
r1fact =
    10
L1fact =
    1.591549430918953e-03
C1fact =
    1.591549430918953e-13
r2fact =
    15
L2fact =
    2.387085437834647e-03
C2fact =
    1.060926861259843e-13
COfact =
    9.999999999999999e-12
f01fact =
    9.999949900000000e+06
f02fact =
    10001054
-----
Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на інтервалі
випробування:
h =
    255421
-----
OUTPUT =
struct with fields:

    Iterations: 1677
    FuncCount: 2720
    algorithm: 'Nelder-Mead simplex direct search'
    message: 'Optimization terminated.'
-----
вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при апроксимації/оптимізації:
C0 =
    9.748364277614999e-12
r1 =
    9.974089540116452e+00
r2 =
    1.512161241522258e+01
L1 =
    1.572059507336005e-03
L2 =
    2.4304702276607839e-03
C1 =
    1.611280529122177e-13
C2 =
    1.041988248268182e-13
-----
відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від фактичних:
deviation_r1 =

    2.591045988354801e-01
deviation_L1 =
    1.224588014944361e+00
deviation_C1 =
    1.239741463250144e+00
deviation_r2 =
    8.107494348171818e-01
deviation_L2 =
    1.817481606881533e+00
deviation_C2 =
    1.785100715535803e+00
deviation_CO =
    2.516357223849997e+00
-----
Вихідні значення резонансних частот:
f01 =
    9.999951400000000e+06
f02 =
    1.000105730000000e+07
-----
Відхилення у Гц вихідних значень резонансних частот від фактичних:
deviation_f01 =
    1.500000000000000e+00
deviation_f02 =
    3.300000000745058e+00
-----
Elapsed time is 5.769644 seconds.
>>

```

MATLAB Command Window

Page 2

Рисунок 2.10 – Результат виконання програми Fminsearch_2R у полі Command Window (метод fminsearch, близько-розташовані резонанси з $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.11 відображено результат виконання програми `Fminsearch_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

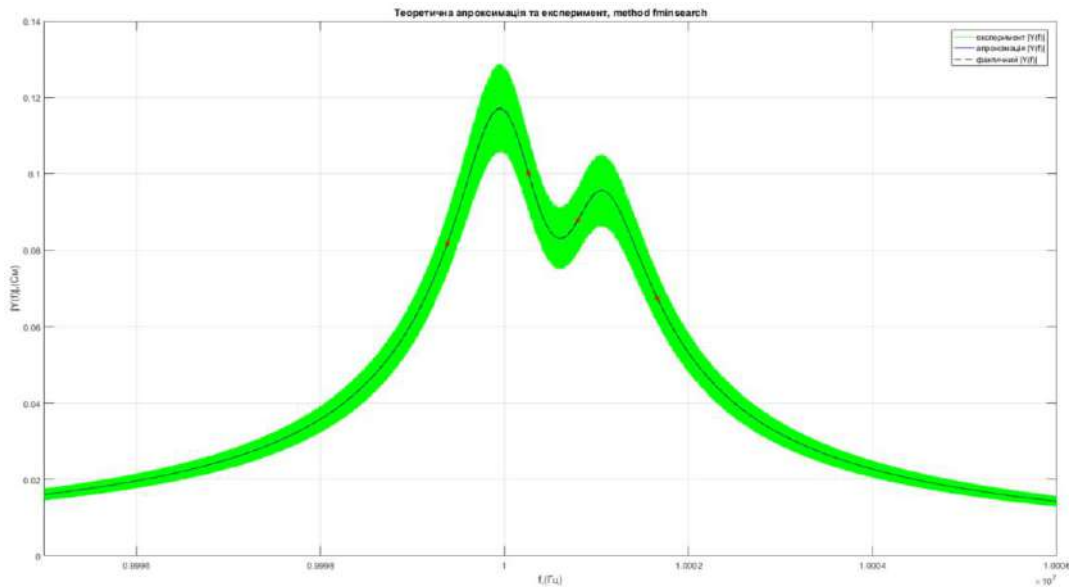


Рисунок 2.11 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.12 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

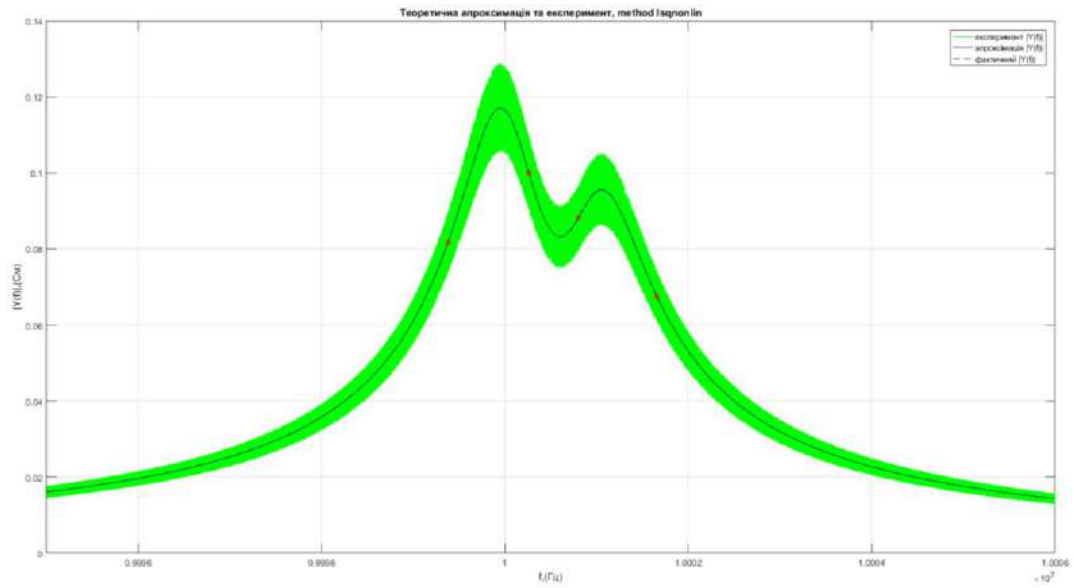


Рисунок 2.12 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод `lsqnonlin`, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.13 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_2R` у полі `Command Window` для близько-розташованих резонансів з $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window Page 1

>> Lsqnonlin_2R
-----
Фактичні, накладені при модуляванні, значення параметрів двох контурів:
r1fact =
    10
L1fact =
    1.591549430918953e-03
C1fact =
    1.591549430918953e-13
r2fact =
    15
L2fact =
    2.387085437834647e-03
C2fact =
    1.06092686129843e-13
f01fact =
    9.999999999999999e-12
f02fact =
    9.999999900000000e+06
f0001054
-----
Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на інтервалі
вимірювання:
h =
    255421
-----
Local minimum possible.

lsqnonlin stopped because the final change in the sum of squares relative to
its initial value is less than the selected value of the function tolerance.

<stopping criteria details>

OUTPUT =
struct with fields:

    firstorderopt: 3.432336027629641e-02
    iterations: 238
    funcCount: 1912
    cyIterations: 0
    algorithm: 'trust-region-reflective'
    stepsize: 1.035472931616657e-05
    message: 'Local minimum possible..'
-----
Вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при апроксимації/оптимізації:
C0 =
    1.001381185071896e-11
r1 =
    1.000965734938731e+01
r2 =
    1.503657461520458e+01
L1 =
    1.590728620973707e-03
L2 =
    2.386094285697327e-03
C1 =
    1.592370613038985e-13
C2 =
    1.061367351234619e-13
-----
Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від фактичних:
deviation_r1 =
    9.657349387306446e-02
deviation_L1 =
    5.157300987959079e-02
deviation_C1 =
    5.159639431100427e-02
deviation_r2 =
    2.438307680305396e-01
deviation_L2 =
    4.152143537092812e-02
deviation_C2 =
    4.151935338234216e-02
deviation_C0 =
    1.381185071896107e-01
-----
Вихідні значення резонансних частот:
f01 =
    9.999950100000000e+06
f02 =
    1.000105490000000e+07
-----
Відхилення у Гц вихідних значень резонансних частот від фактичних:
deviation_f01 =
    1.999999992549419e-01
deviation_f02 =
    9.000000003725290e-01
-----
Elapsed time is 60.813112 seconds.
>>

```

Рисунок 2.13 – Результат виконання програми Lsqnonlin_2R у полі Command Window (метод lsqnonlin, близько-розташовані резонанси з $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.14 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

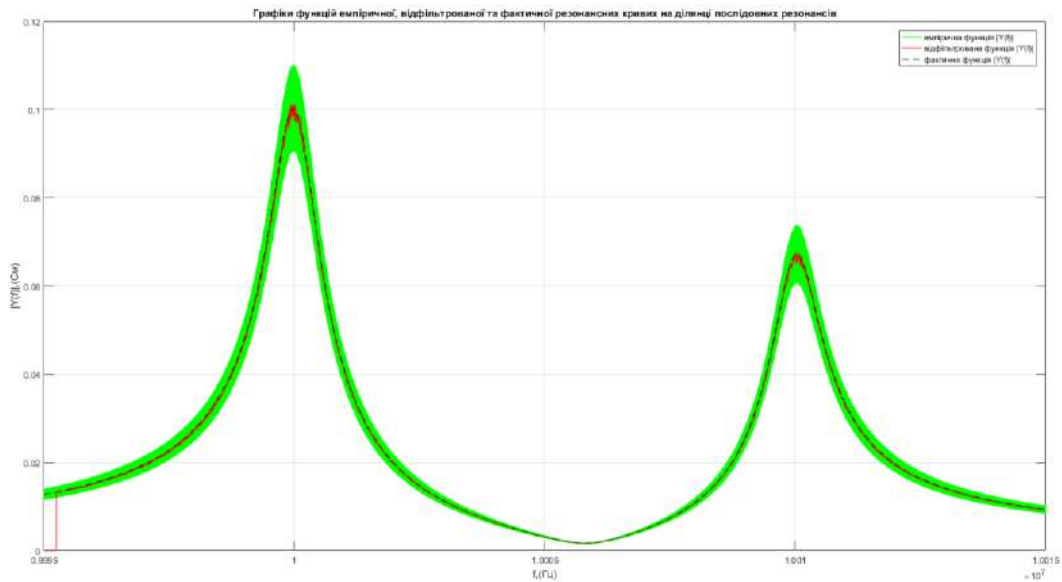


Рисунок 2.14 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.15 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

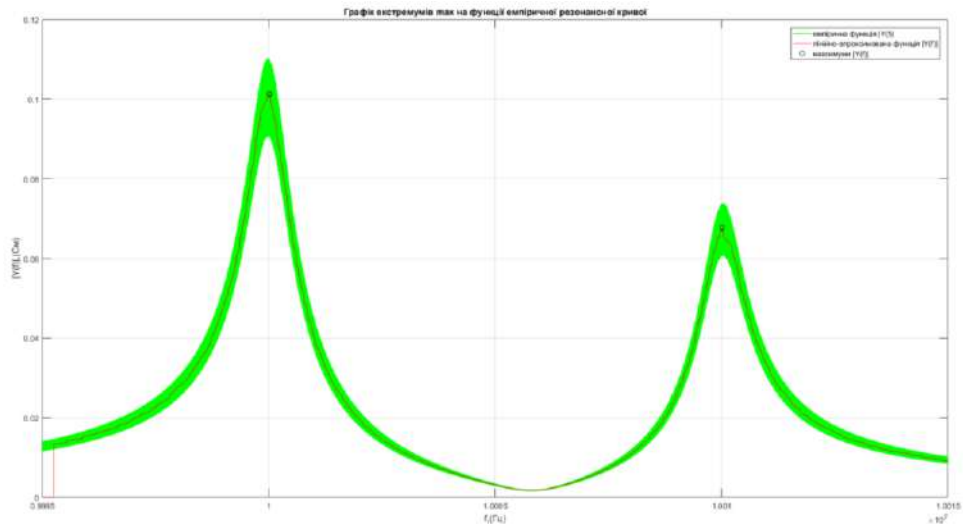


Рисунок 2.15 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.16 відображено результат виконання програми fminsearch_2R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

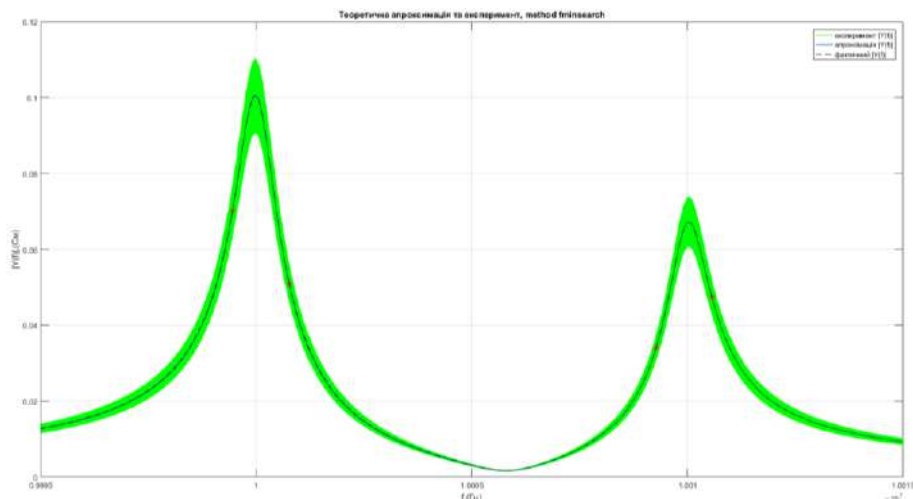


Рисунок 2.16 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод fminsearch, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 2.17 відображено результат виконання програми Lsqnonlin_2R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

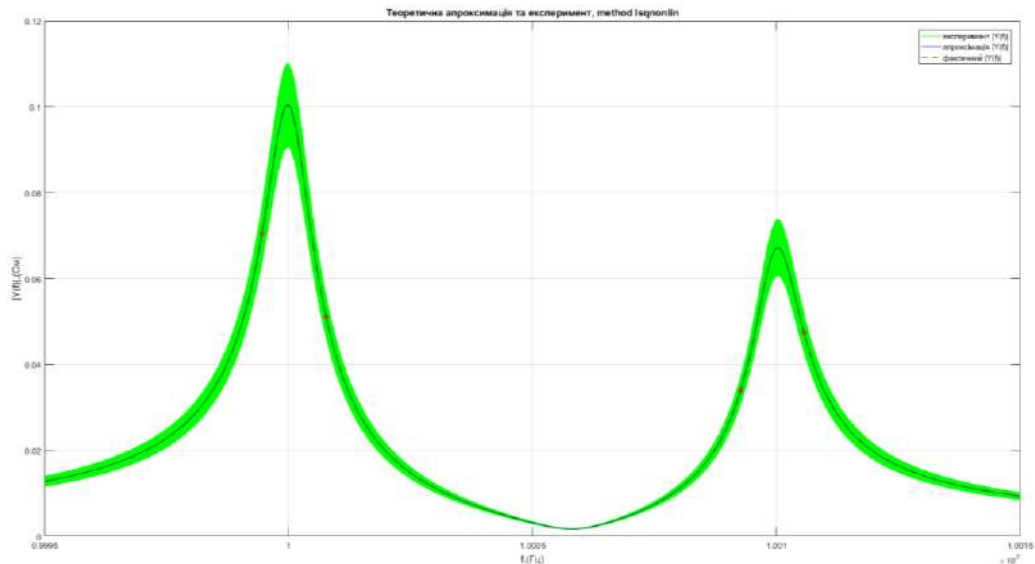


Рисунок 2.17 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод lsqnonlin, $Q=10^4$, похибка 10%)

У таблицях 2.3, 2.4 наведені результати модулювання двох-резонансних кривих при значенні добротності $Q=10^5$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10% відповідно для випадків близько-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} та віддалено-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} . У таблицях також наведені параметри процесу обчислення, а саме: кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій Iterations та кількість звертань до цільової функції FuncCount, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 2.3 – Апроксимація двох-резонансних кривих, близько-розташовані резонанси ($q = 10^5$, $f_{01}=9999995$ Гц, $f_{02}= 10000105$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів									Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	C0	f01	f02				
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.0159 Гн	0.0159 пФ	15 Ом	0.0239 Гн	0.0106 пФ	10.0 пФ	-	-	52221	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.54 %	1.22 %	1.20 %	0.55 %	1.14 %	1.13 %	0.0027 %	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.65 %	1.22 %	1.20 %	1.05 %	0.90 %	0.89 %	8.67 %	0 Гц	0.2 Гц		1567	2585	1.00 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.0016 %	0.0053 %	0.0053 %	0.0025 %	0.0082 %	0.0082 %	0.0067 %	0 Гц	0 Гц		534	4280	28.86 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.36 %	0.96 %	0.96 %	0.21 %	1.59 %	1.56 %	4.03 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.68 %	0.97 %	0.96 %	1.05 %	1.61 %	1.58 %	0.28 %	0 Гц	0.2 Гц	1002	1763	0.72 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.063 %	0.73 %	0.74 %	0.35 %	1.02 %	1.01 %	0.79 %	0 Гц	0 Гц	594	4760	31.07 с	
10	Похибка розрахунку початкового значення	0.47 %	7.39 %	6.88 %	1.25 %	2.19 %	2.24 %	7.23 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	1.25 %	8.20 %	7.58 %	3.89 %	6.85 %	7.36 %	44.03 %	0.1 Гц	0.8 Гц	11259	16823	5.75 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.40 %	0.66 %	0.65 %	0.11 %	0.78 %	0.79 %	0.44 %	0 Гц	0.2 Гц	2258	18072	128.40	

Таблиця 2.4 – Апроксимація двох-резонансних кривих, віддалено-розташовані резонанси ($q = 10^5$, $f_{01}=9999998$ Гц, $f_{02}= 10001003$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів									Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	C0	f01	f02				
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.0159 Гн	0.0159 пФ	15 Ом	0.0239 Гн	0.0106 пФ	10.0 пФ	-	-	60701	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.56 %	1.40 %	1.38 %	0.54 %	1.39 %	1.37 %	0.0027 %	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.33 %	1.02 %	1.01 %	0.12 %	0.44 %	0.44 %	0.25 %	0 Гц	0.1 Гц		6910	10394	4.19 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	4.41e-09 %	2.73e-09 %	2.75e-09 %	2.06e-08 %	2.10e-08 %	2.10e-08 %	4.77e-08 %	0 Гц	0 Гц		256	2056	14.71 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.37 %	0.68 %	0.67 %	0.92 %	1.73 %	1.70 %	3.24 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.33 %	0.56 %	0.56 %	0.53 %	1.34 %	1.33 %	7.73 %	0.1 Гц	0.1 Гц	1377	2299	0.99 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.12 %	0.0018 %	0.0018 %	0.032 %	0.048 %	0.048 %	0.28 %	0 Гц	0 Гц	317	2544	19.03 с	
10	Похибка розрахунку початкового значення	0.78 %	1.00 %	0.99 %	2.01 %	2.02 %	1.99 %	3.76 %	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.32 %	0.50 %	0.50 %	0.18 %	0.30 %	0.30 %	1.32 %	0.1 Гц	0 Гц	7951	11951	4.67 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.14 %	0.056 %	0.056 %	0.25 %	0.020 %	0.020 %	1.20 %	0.1 Гц	0.1 Гц	388	3112	22.28 с	

На рисунку 2.18 відображено результат виконання програми `Initial_conditions_2R` – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

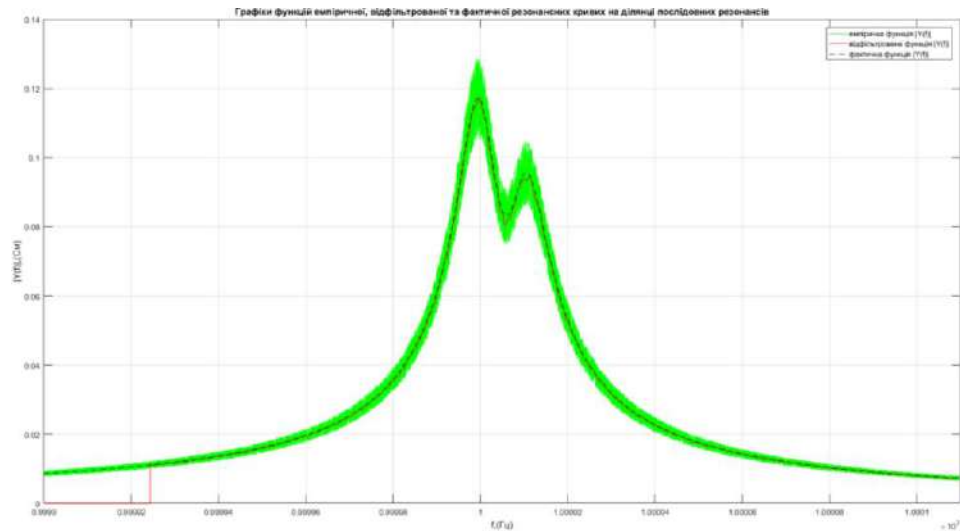


Рисунок 2.18 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.19 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

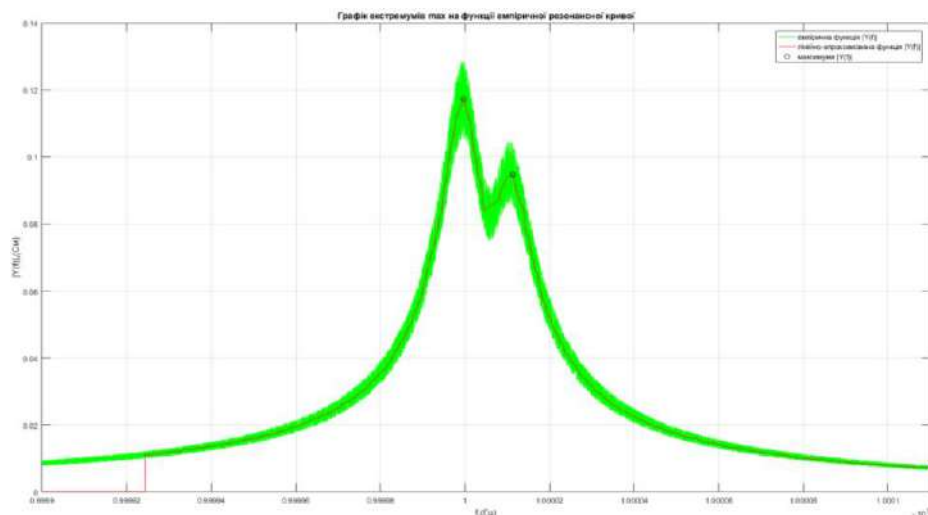


Рисунок 2.19 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.20 відображено результат виконання програми `Fminsearch_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

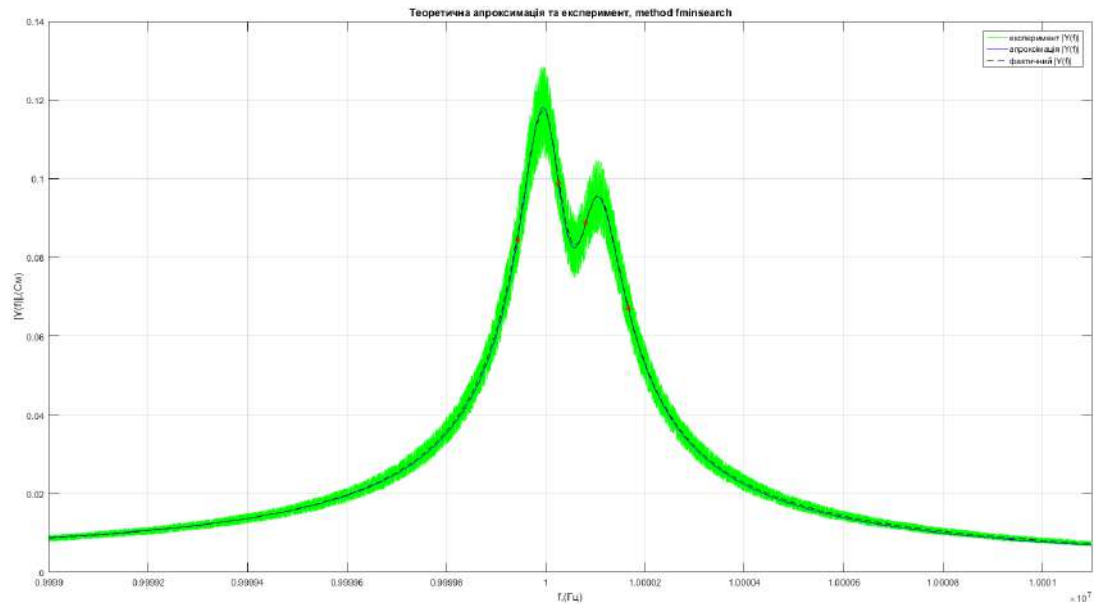


Рисунок 2.20 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.21 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

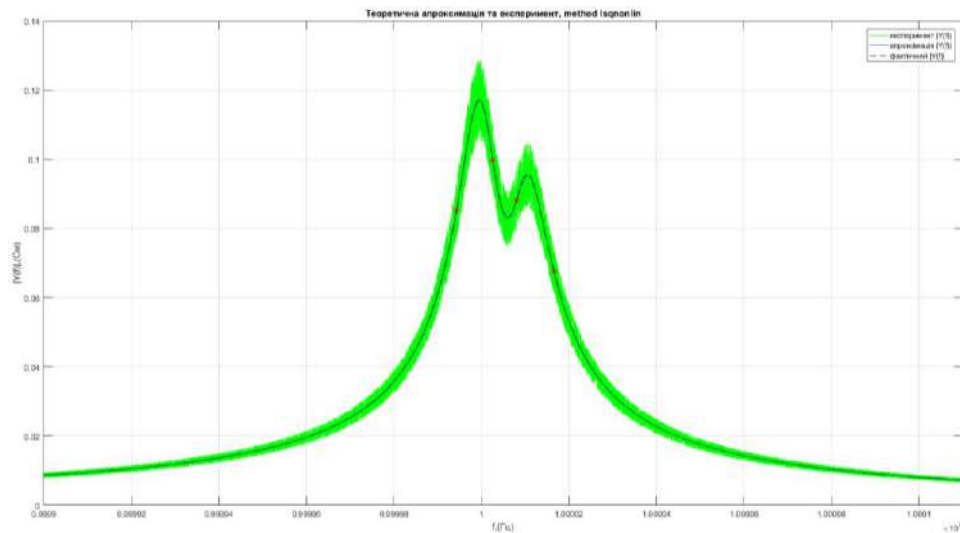


Рисунок 2.21 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод lsqnonlin, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.22 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

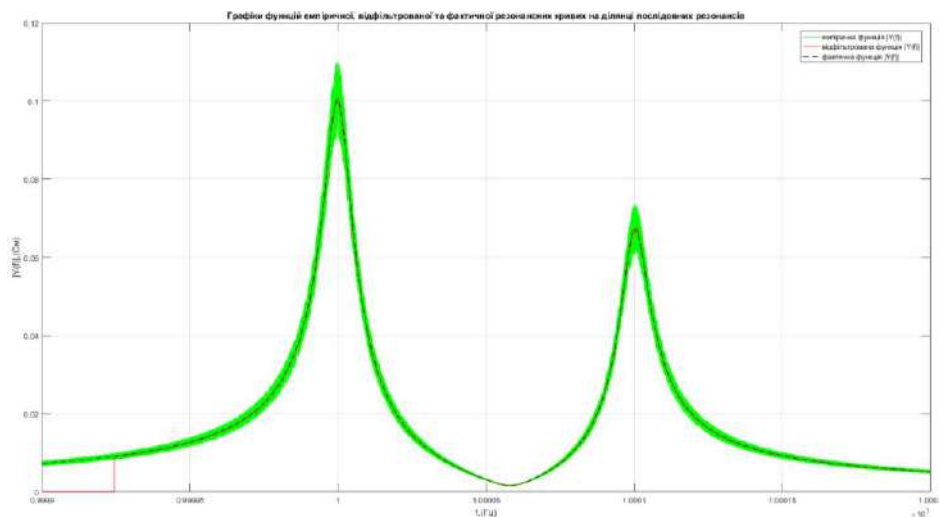


Рисунок 2.22 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.23 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

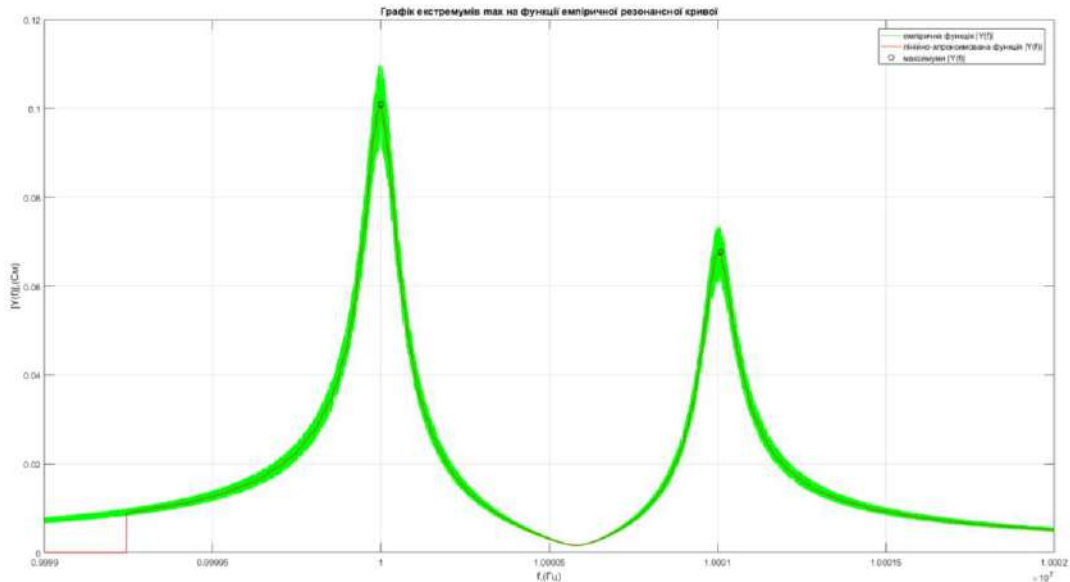


Рисунок 2.23 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.24 відображено результат виконання програми Fminsearch_2R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

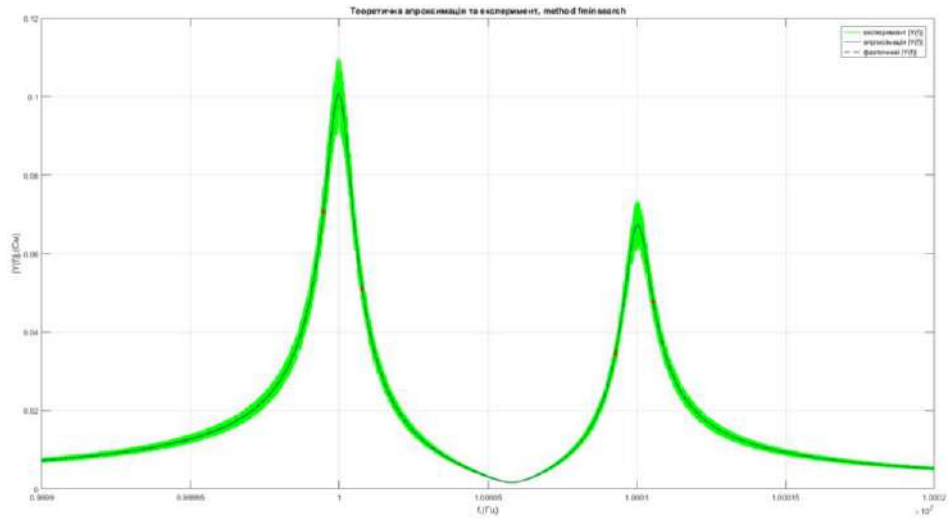


Рисунок 2.24 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 2.25 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

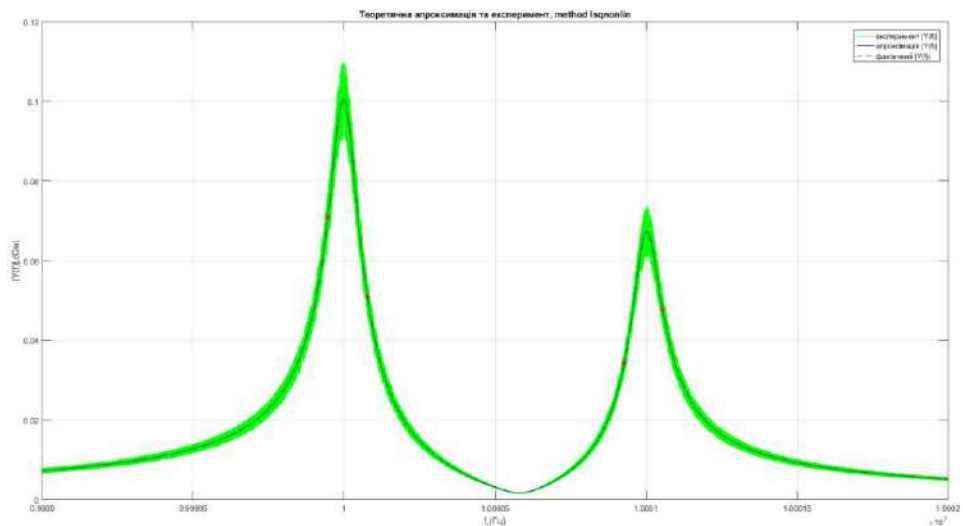


Рисунок 2.25 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `lsqnonlin`, $Q=10^5$, похибка 10%)

У таблицях 2.5, 2.6 наведені результати модулювання двох-резонансних кривих при значенні добротності $Q=10^6$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10% відповідно для випадків близько-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} та віддалено-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} . У таблицях також наведені параметри процесу обчислення, а саме: кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій Iterations та кількість звертань до цільової функції FuncCount, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 2.5 – Апроксимація двох-резонансних кривих, близько розташовані резонанси ($q = 10^6$, $f_{01}=9999999.5$ Гц, $f_{02}=10000010.5$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів									Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	C0	f01	f02				
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.159 Гн	0.00159 пФ	15 Ом	0.239 Гн	0.00106 пФ	10.0 пФ	-	-	33304	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	1.10 %	1.31 %	1.32 %	3.56 %	2.21 %	2.16 %	0.00027 %	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.43 %	1.31 %	1.32 %	0.59 %	2.21 %	2.16 %	0.29 %	0 Гц	0.1 Гц		563	1127	0.45 c
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.031 %	0.10 %	0.10 %	0.047 %	0.16 %	0.16 %	0.021 %	0 Гц	0 Гц		4298	34392	156.95 c
5	Похибка розрахунку початкового значення	1.06 %	0.20 %	0.20 %	4.18 %	0.92 %	0.92 %	2.21 %	-	-	33304	-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.40 %	0.20 %	0.20 %	0.16 %	0.89 %	0.89 %	0.010 %	0 Гц	0.1 Гц		1079	1882	0.59 c
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.31 %	0.71 %	0.72 %	0.55 %	1.02 %	1.01 %	0.069 %	0 Гц	0.1 Гц		995	7968	36.84 c
10	Похибка розрахунку початкового значення	1.85 %	0.30 %	0.30 %	2.57 %	2.58 %	2.65 %	2.29 %	-	-	33304	-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.87 %	0.30 %	0.30 %	1.06 %	2.56 %	2.63 %	3.82 %	0.1 Гц	0.2 Гц		770	1465	0.55
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.14 %	0.49 %	0.49 %	1.61 %	0.99 %	0.99 %	0.59 %	0.1 Гц	0.2 Гц		1866	14936	74.03 c

Таблиця 2.6 – Апроксимація двох-резонансних кривих, віддалено розташовані резонанси ($q = 10^6$, $f_{01}=9999999.7$ Гц, $f_{02}= 10000100.3$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів									Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	C0	f01	f02				
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.159 Гн	0.00159 пФ	15 Ом	0.239 Гн	0.00106 пФ	10.0 пФ	-	-	33682	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	1.36 %	0.29 %	0.29 %	1.43 %	0.37 %	0.37 %	0.00027 %	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.098 %	0.29 %	0.29 %	0.13 %	0.38 %	0.38 %	0.060 %	0 Гц	0 Гц		1170	2042	0.62 c
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	5.26e-05 %	3.62e-04 %	3.62e-04 %	0.0026 %	0.0080 %	0.0080 %	0.0020 %	0 Гц	0 Гц		894	7160	27.18 c
5	Похибка розрахунку початкового значення	1.11 %	0.39 %	0.39 %	0.71 %	1.31 %	1.29 %	4.30 %	-	-	33682	-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.15 %	0.38 %	0.38 %	0.64 %	1.25 %	1.24 %	0.43 %	0 Гц	0 Гц		1477	2492	0.73 c
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.36 %	0.23 %	0.23 %	0.24 %	0.043 %	0.043 %	0.21 %	0 Гц	0 Гц		1797	14384	61.15 c
10	Похибка розрахунку початкового значення	1.71 %	2.12 %	2.16 %	0.91 %	0.16 %	0.16 %	1.70 %	-	-	33682	-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.45 %	2.12 %	2.16 %	0.69 %	0.15 %	0.15 %	0.65 %	0 Гц	0.1 Гц		862	1575	0.51 c
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.12 %	0.42 %	0.42 %	0.76 %	0.070 %	0.070 %	0.20 %	0.1 Гц	0 Гц		1162	9304	42.06 c

На рисунку 2.26 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

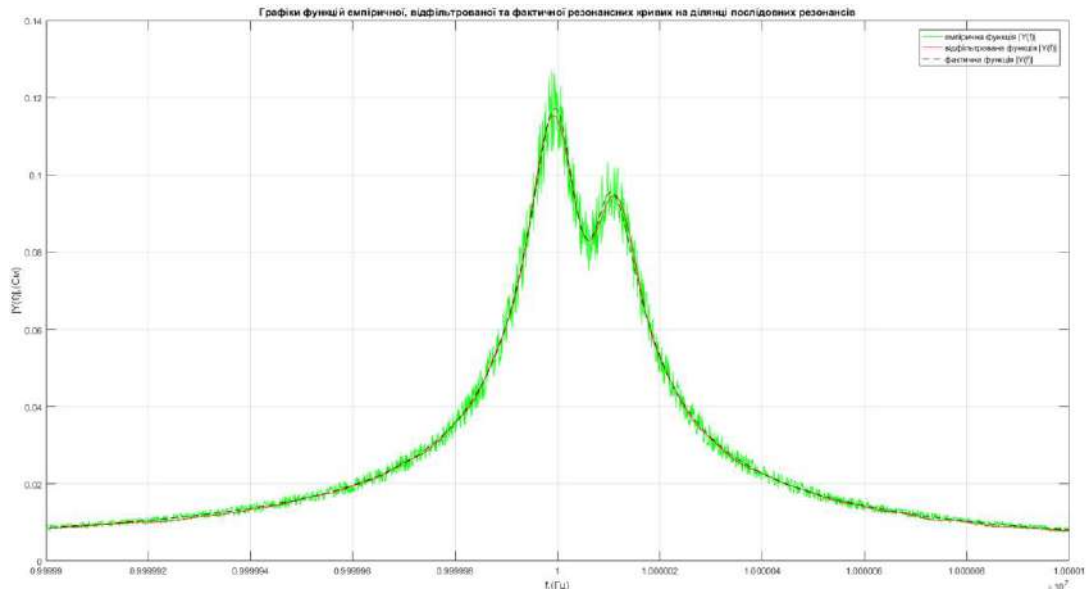


Рисунок 2.26 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.27 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

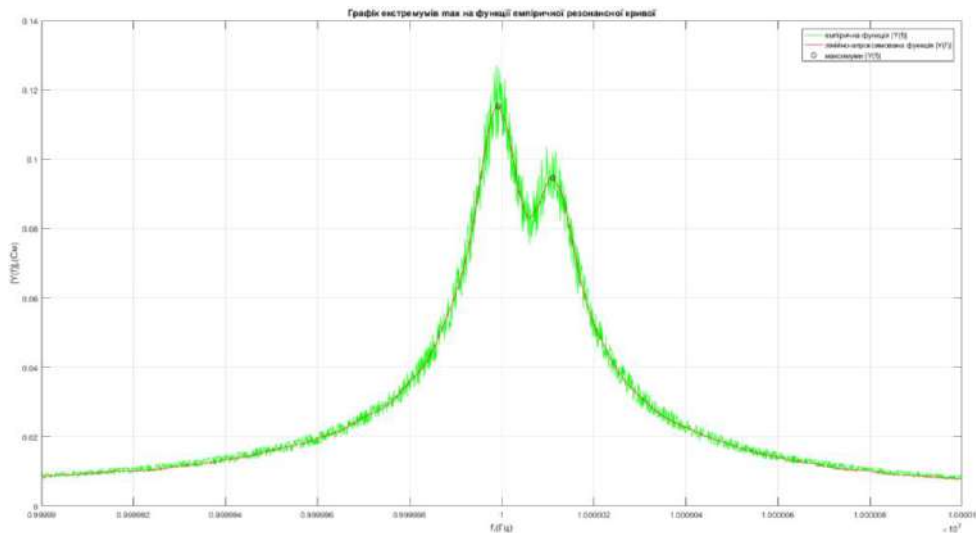


Рисунок 2.27 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів тах на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.28 відображено результат виконання програми Fminsearch_2R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

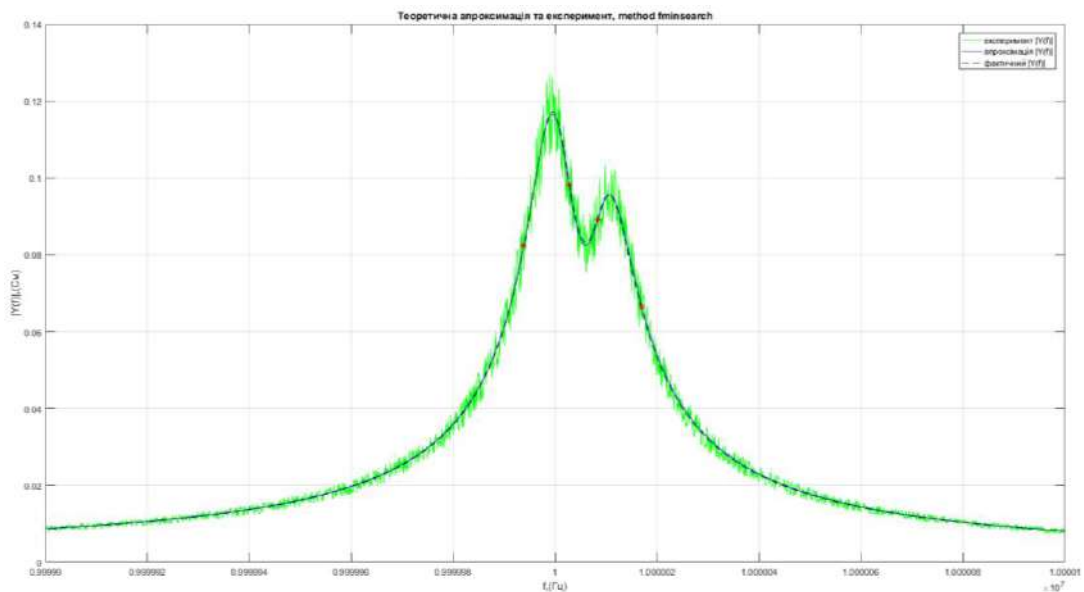


Рисунок 2.28 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод fminsearch, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.29 відображено результат виконання програми Lsqnonlin_2R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

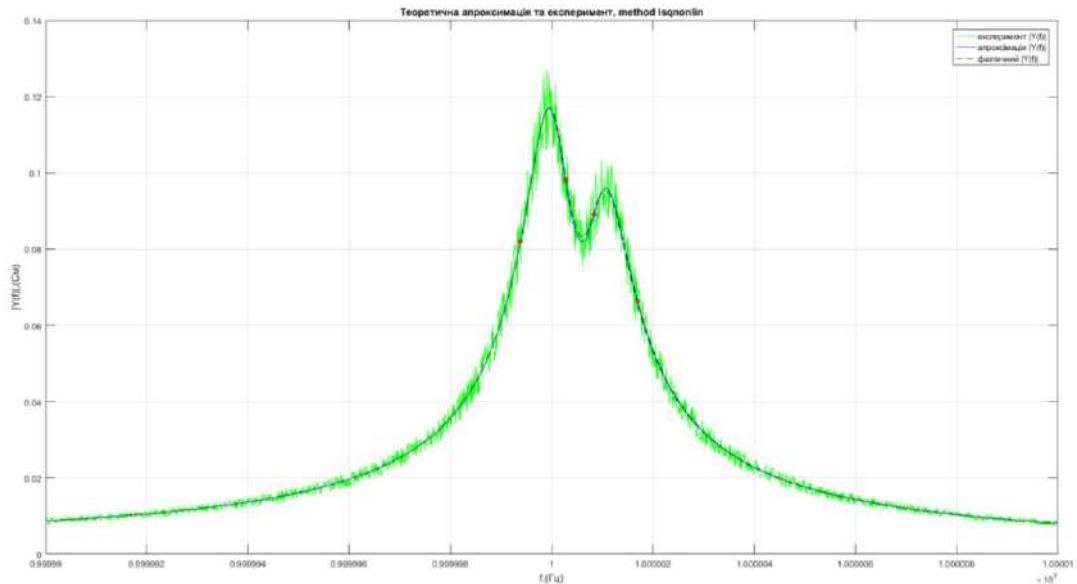


Рисунок 2.29 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод Lsqnonlin, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.30 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

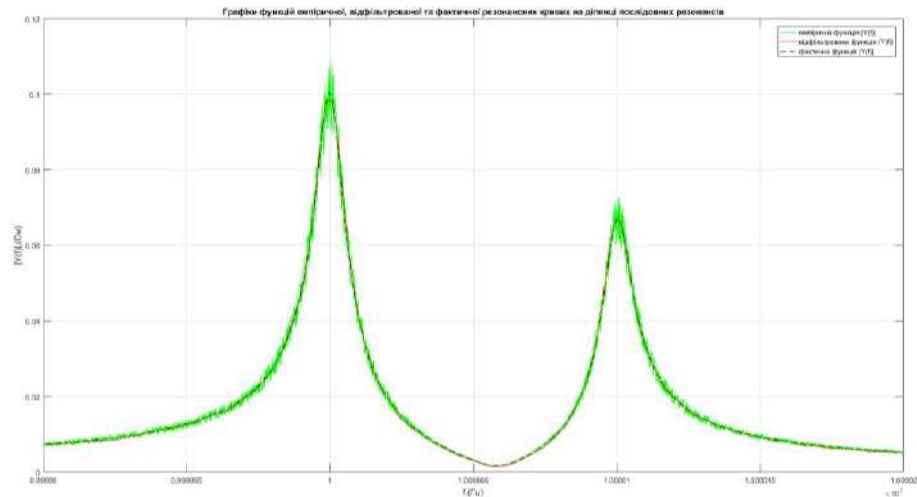


Рисунок 2.30 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.31 відображено результат виконання програми Initial_conditions_2R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

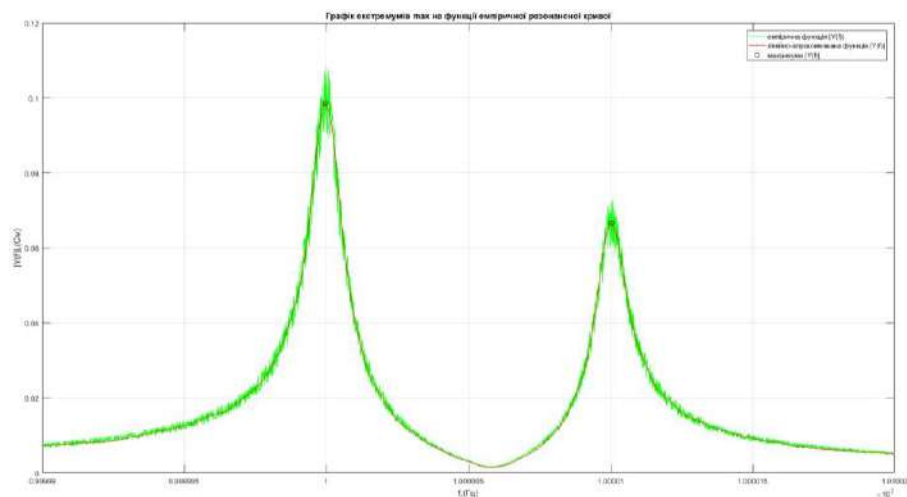


Рисунок 2.31 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_2R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.32 відображено результат виконання програми `Fminsearch_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

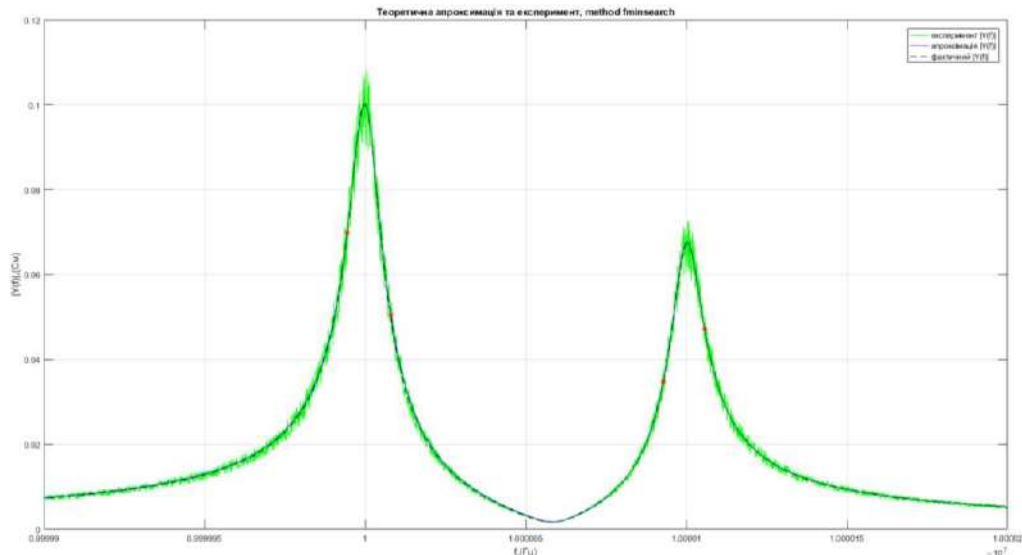


Рисунок 2.32 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 2.33 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_2R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

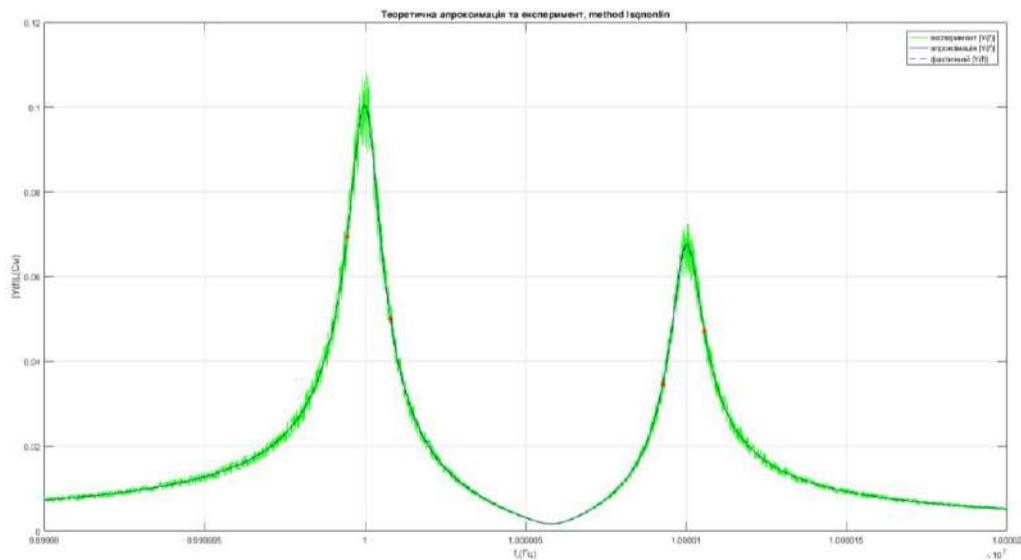


Рисунок 2.33 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод lsqnonlin, $Q=10^6$, похибка 10%)

З отриманих результатів (табл. 2.1-2.6) випливає, що при апроксимації двох-резонансних кривих, як і очікувалось, за точністю обчислення при ненульовій похибці вимірювань, кількості ітерацій, звертань до цільової функції, часом виконання програми оптимізації функції `fminsearch` і `lsqnonlin` мають суттєво кращий результат для віддалено-розташованих резонансів в порівнянні з близько-розташованими резонансами для певного значення добротності контурів Q . При порівнянні обох функцій знову, як і для одно-резонансної апроксимації, спостерігаємо закономірність: за кількістю ітерацій та звертань до цільової функції метод `fminsearch` значно перевищує `lsqnonlin`, але за часом виконання навпаки, метод `lsqnonlin` значно перевищує `fminsearch`. Але при у середньому, та особливо при несприятливих співвідношеннях розрахованих початкових значень для близько-розташованих резонансів метод `lsqnonlin` за точністю апроксимації має беззаперечну перевагу з результатом похибки апроксимації у межах 1%. Особливо наглядно це видно по результатам апроксимації для випадку похибки вимірювання 10% близько-розташованих резонансів, $Q=10^5$, табл. 4:

час виконання програми методу `lsqnonlin` складає 128.40 с порівняно з 5.75 с для методу `fminsearch`, але найгірша похибка вимірювання для методу `lsqnonlin` дорівнює 0.79%, а для методу `fminsearch` – 44.03%. Також спостерігається висока точність розрахунку початкових значень, похибка яких не дуже залежить від похибки вимірювань та не перевищує 10%, це є результатом складної обробки емпіричних даних у програмі розрахунку початкових значень `Initial_conditions_2R`. Також, як і для одно-резонансної апроксимації, спостерігається загальна закономірність, що зі збільшенням значення добротності Q збільшуються середній час виконання обох програм, кількість ітерацій та звертань до цільової функції, похибка апроксимації, що пояснюється тим, що із зростанням добротності Q , збільшується швидкість зміни значень функції від частоти в області резонансу і при цьому зменшується відносна кількість відліків на смугу перепуску резонансної кривої, так для значення добротності $Q=10^4$ кількість відліків на смугу перепуску за рівнем 0.707 дорівнює $(f_0/10^4)/\text{step}=(10^7/10^4)/0.1=10000$, відповідно для значень добротності $Q=10^5$ та $Q=10^6$ маємо значення 1000 та 100 відліків.

3 АПРОКСИМАЦІЇ ТРЬОХ-РЕЗОНАНСНИХ КРИВИХ

Еквівалентна схема трьох-резонансного контуру зображена на рисунку 3.1.

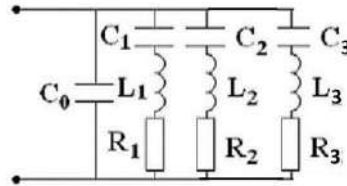


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема трьох-резонансного контуру

У порівнянні з одно-резонансними та двох-резонансними кривими для трьох-резонансних кривих у даній роботі виконується апроксимація не для модуля провідності, а для активної складової провідності.

Враховуючи вищенаведені викладки, очевидно, що вираз для загальної активної складової провідності триконтурної еквівалентної схеми має вигляд:

$$G(\omega) = \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} + \frac{R_3}{R_3^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)^2}$$

При реалізації алгоритму апроксимації трьох-резонансної кривої, на відміну від розглянутих вище одно-контурної та двох-контурної схем, не враховується паралельний резонанс, так як паразитна ємність C_0 не входить до виразу загальної активної складової провідності.

Принципи обробки емпіричних даних реалізації алгоритму апроксимації трьох-резонансної кривої аналогічні двох-резонансній апроксимації.

Як і в розглянутій вище двох-резонансній апроксимації для апроксимації трьох-резонансної кривої використовується подібна за принципом роботи 4-х етапна програма для розрахунку початкових умов Initial_conditions_3R. Відмінність від попередньої програми на другому етапі полягає в тому, що виконується пошук не 2-х, а відповідно 3-х максимумів емпіричної активної провідності. На третьому етапі пошук початкових значень параметрів для крайніх лівого та правого контурів здійснюється подібно двох-контурній схемі, тобто для запобігання впливу сусіднього контуру спочатку визначається крайня зовнішня половина смуги пропуску контуру на рівні 0.5 (відмінність від рівня 0.707 для модуля провідності) від максимуму значення резонансу, потім множенням на 2 розраховується повна смуга пропуску контуру на рівні 0.5, і далі використовуються відомі класичні формули для визначення параметрів L, C, R контуру при послідовному резонансі:

$$\rho = W_0 \cdot L = 1 / W_0 \cdot C = Q \cdot R, \quad Q = W_0 / W_{0.5}, \quad R = 1 / G(W_0), \quad G(W_0) = G(w)_{\max},$$

де ρ – характеристичний опір резонансного контуру.

Коригуючі коефіцієнти для зменшення взаємовпливу контурів один на інший для опору R та добротності Q лівого та правого контуру для програми Initial_conditions_3R дорівнюють:

$$\begin{aligned} g_1 &= g_{\max 1} / (1 + (((fr_2 - fr_{\min 1}) / (fr_2 - fr_1))^2) * (g_{\min 1} / g_{\max 1}) \\ &* (g_{\max 2} / \sqrt{g_{\max 1} * g_{\max 2}})); \\ r_1 &= 1 / g_1; \\ q_1 &= (fr_1 / r_{az 1}) * (1 + (((fr_2 - fr_{\min 1}) / (fr_2 - fr_1)) * (g_{\min 1} / g_{\max 1}) \\ &* (g_{\max 2} / \sqrt{g_{\max 1} * g_{\max 2}}))^2); \\ g_3 &= g_{\max 3} / (1 + (((fr_{\min 2} - fr_2) / (fr_3 - fr_2))^2) * (g_{\min 2} / g_{\max 3}) \\ &* (g_{\max 2} / \sqrt{g_{\max 2} * g_{\max 3}})); \\ r_3 &= 1 / g_3; \\ q_3 &= (fr_3 / r_{az 3}) * (1 + (((fr_{\min 2} - fr_2) / (fr_3 - fr_2)) * (g_{\min 2} / g_{\max 3}) \\ &* (g_{\max 2} / \sqrt{g_{\max 2} * g_{\max 3}}))^2); \end{aligned}$$

де $(fr1 < fr2 < fr3$ – частоти max послідовних резонансів;

$fmin1$ – частота min між max резонансів $fr1$ та $fr2$;

$fmin2$ – частота min між max резонансів $fr2$ та $fr3$;

$gmax1, gmax2, gmax3, gmin1, gmin2$ – відповідні значення ax та min провідності;

$raz1, raz3$ – відповідні смуги пропуску на рівні 0,5 для резонансних кривих.

Після визначення початкових значень елементів для крайніх контурів $L1, C1, L3, C3, R1, R3$ експериментальну криву активної складової провідності G_2 для окремого центрального другого контуру обчислюємо як різницю між отриманою загальною емпіричною кривою G та кривими G_1, G_3 крайніх першого та третього контурів, розрахованих при отриманих початкових значеннях $L1, C1, L3, C3, R1, R3$, тобто:

$$G_2(\omega) = G(\omega) - G_1(\omega) - G_3(\omega);$$

$$G_2(\omega) = G(\omega) - \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} - \frac{R_3}{R_3^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)^2}.$$

Для отриманої емпіричної кривої центрального контуру $G_2(\omega)$ розраховуємо початкові значення параметрів $L2, C2, R2$ як для одиночного контуру по аналогії з одно-контурною схемою, тобто обчислюємо смугу пропуску на рівні 0,5 і далі використовуємо відомі класичні формули при послідовному резонансі:

$$\rho_2 = W_{02} \cdot L_2 = 1 / W_{02} \cdot C_2 = Q_2 \cdot R_2, \quad Q_2 = W_{02} / W_{0.5}, \quad R_2 = 1 / G_2(W_{02}), \quad G_2(W_{02}) = G_2(\omega)_{\max},$$

де ρ_2 – характеристичний опір другого резонансного контуру.

Як і в попередній програмі а четвертому етапі здійснюється уточнення отриманих початкових значень за допомогою вирішення системи нелінійних рівнянь, які складені по попередньо розрахованим значенням модуля провідності в характерних 11-ти точках резонансних кривих: $wr1$, $gmax1$, $wr2$, $gmax2$, $wr3$, $gmax3$, $wmin1$, $gmin1$, $wmin2$, $gmin2$, $wr1L$, $gwr1L$, $wr1R$, $gwr1R$, $wr2L$, $gwr2L$, $wr2R$, $gwr2R$, $wr3L$, $gwr3L$, $wr3R$, $gwr3R$. Опис точок наведено в коментарях в програмі. Для двох-резонансних кривих вирішується система з 11 рівнянь для 9-ти змінних $[r1 \ L1 \ C1 \ r2 \ L2 \ C2 \ r3 \ L3 \ C3]$ за допомогою стандартної функції з пакету MatLab `fsolve`. Програма `fsolve` для пошуку рішення використовує алгоритм мінімізації Левенберга-Марквардта.

Блок програм апроксимації модуля провідності трьох-резонансної контуру містить наступні програми (додаток В):

- `Experiment_3R_10MHz` – програма розрахунку фактичних та експериментальних даних виміру з заданою похибкою. Вихідними даними програми є відповідні файли даних для подальшого розрахунку у програмах формування фільтру ФНЧ, розрахунку початкових значень та програмах апроксимації/оптимізації. Також на відміну від двох-резонансних кривих, у програмі задається відповідно більше вхідних параметрів: f_{01} , Q_1 , R_1 , f_{02} , Q_2 , R_2 , f_{03} , Q_3 , R_3 ;

- `Filter_FIR_LPF` – розглянута вище програма формування параметрів КІХ-фільтру ФНЧ (наведена в додатку А). Як і для двох-резонансних кривих, якщо дослідження виконуються в діапазоні частот $f_{01}(f_{02}, f_{03}) \pm 1\%$, то при зміні частоти постійно звертатися до виконання програми `Filter_FIR_LPF` немає потреби – розраховані на початку вихідні параметри без змін використовуються в наступній програмі розрахунку початкових значень;

- `Initial_conditions_3R` – розглянута вище програма розрахунку початкових значень. Вихідними даними програми є відповідний файл для програм апроксимації/оптимізації;

- Clarification_3R – підпрограма вирішення системи нелінійних рівнянь для програми Initial_conditions_3R;
- Sysequat_3R – підпрограма, яка формує систему нелінійних рівнянь для обчислення в підпрограмі Clarification_3R;
- Fminsearch_3R – програма апроксимації/оптимізації з використанням функції мінімізації з пакету MatLab fminsearch;
- Funfim_3R – підпрограма, яка формує цільову функцію у вигляді суми квадратів різниць між емпіричними вимірами і теоретичними значеннями для обчислення функції fminsearch у програмі Fminsearch_3R;
- Lsqnonlin_3R – програма апроксимації/оптимізації з використанням функції мінімізації з пакету MatLab lsqnonlin.
- Funlsq_3R – підпрограма, яка формує цільову функцію у вигляді суми різниць між емпіричними вимірами і теоретичними значеннями для обчислення функції lsqnonlin у програмі Lsqnonlin_3R.

У таблицях 3.1, 3.2 наведені результати модулювання трьох-резонансних кривих при значенні добротності $Q=10^4$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10% відповідно для випадків близько-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} , f_{03} та віддалено-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} , f_{03} . У таблицях також наведені параметри процесу обчислення, а саме : кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій Iterations та кількість звертань до цільової функції FuncCount, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 3.1 – Апроксимація трьох-резонансних кривих, близько-розташовані резонанси ($q = 10^4$, $f_{01}=10000033$ Гц, $f_{02}= 10000962$ Гц, $f_{03}=10001915$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів											Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time	
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	r3	L3	C3	f01	f02					f03
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.00159 Гн	0.159 пФ	15 Ом	0.00239 Гн	0.106 пФ	20 Ом	0.00318 Гн	0.0796 пФ	-	-	-	120011	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.98 %	1.02 %	1.01 %	0.98 %	1.02 %	1.01 %	0.98 %	1.01 %	1.00 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.094 %	0.35 %	0.35 %	0.098 %	0.41 %	0.41 %	0.064 %	0.16 %	0.16 %	0.70 Гц	1.30 Гц	0.90 Гц		2350	3646	1.06 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	1.64e-06 %	3.82e-06 %	3.82e-06 %	2.56e-06 %	1.06e-05 %	1.06e-05 %	3.16e-06 %	6.67e-06 %	6.67e-06 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		176	1770	26.14 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.60 %	2.58 %	2.51 %	0.78 %	0.20 %	0.20 %	2.33 %	0.61 %	0.61 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.049 %	1.93 %	1.89 %	0.25 %	1.44 %	1.42 %	0.97 %	4.53 %	4.74 %	3.9 Гц	9.3 Гц	16.1 Гц	6775	9910	2.58 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.041 %	0.057 %	0.057 %	0.036 %	0.019 %	0.019 %	0.069 %	0.10 %	0.10 %	0.1 Гц	0.1 Гц	0 Гц	364	3650	56.01 с	
10	Похибка розрахунку початкового значення	1.06 %	1.02 %	1.03 %	2.08 %	7.59 %	7.06 %	2.35 %	3.08 %	3.18 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	1.21 %	2.19 %	2.24 %	1.48 %	7.70 %	7.15 %	2.19 %	4.97 %	5.23 %	2.9 Гц	3.8 Гц	12.0 Гц	3345	5038	1.40 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.36 %	0.36 %	0.36 %	0.018 %	1.27 %	1.25 %	0.42 %	0.97 %	0.98 %	0 Гц	1.1 Гц	3.2 Гц	576	5770	86.55 с	

Таблиця 3.2 – Апроксимація трьох-резонансних кривих, віддалено-розташовані резонанси ($q = 10^4$, $f_{01}=10000000$ Гц, $f_{02}= 10010000$ Гц, $f_{03}=1.0020000$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів											Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time	
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	r3	L3	C3	f01	f02					f03
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.00159 Гн	0.159 пФ	15 Ом	0.00239 Гн	0.106 пФ	20 Ом	0.00318 Гн	0.0796 пФ	-	-	-	300101	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.99 %	1.02 %	1.01 %	0.99 %	1.02 %	1.01 %	0.99 %	1.02 %	1.01 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	4.8e-05 %	0.20 %	0.20 %	0.011 %	0.23 %	0.23 %	2.2e-04 %	1.17 %	1.16 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		2779	4233	4.42 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	2.1e-12 %	1.3e-12 %	1.3e-12 %	1.8e-10 %	6.1e-11 %	6.1e-11 %	8.0e-13 %	5.0e-12 %	5.0e-12 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		76	770	28.47 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.77 %	1.07 %	1.06 %	1.35 %	0.70 %	0.70 %	1.52 %	1.20 %	1.18 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.038 %	0.20 %	0.20 %	0.011 %	0.47 %	0.47 %	0.063 %	0.77 %	0.76 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.1 Гц	3044	4626	4.77 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.036 %	0.018 %	0.018 %	0.006 %	0.021 %	0.021 %	0.076 %	0.003 %	0.0029 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.1 Гц	46	470	19.43 с	
10	Похибка розрахунку початкового значення	2.81 %	0.94 %	0.94 %	0.23 %	2.58 %	2.51 %	1.85 %	0.65 %	0.65 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.057 %	0.95 %	0.94 %	0.14 %	2.17 %	2.12 %	0.048 %	1.56 %	1.53 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.7 Гц	2973	4487	4.69 с	
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.044 %	0.037 %	0.037 %	0.11 %	0.058 %	0.057 %	0.022 %	0.0095 %	0.0095 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.7 Гц	110	1110	42.78 с	

На рисунку 3.2 відображено результат виконання програми Experiment_3R_10MHz – графіки фактичних та емпіричних даних для $Q=10^4$ на ділянках близько-розташованих послідовних резонансів.

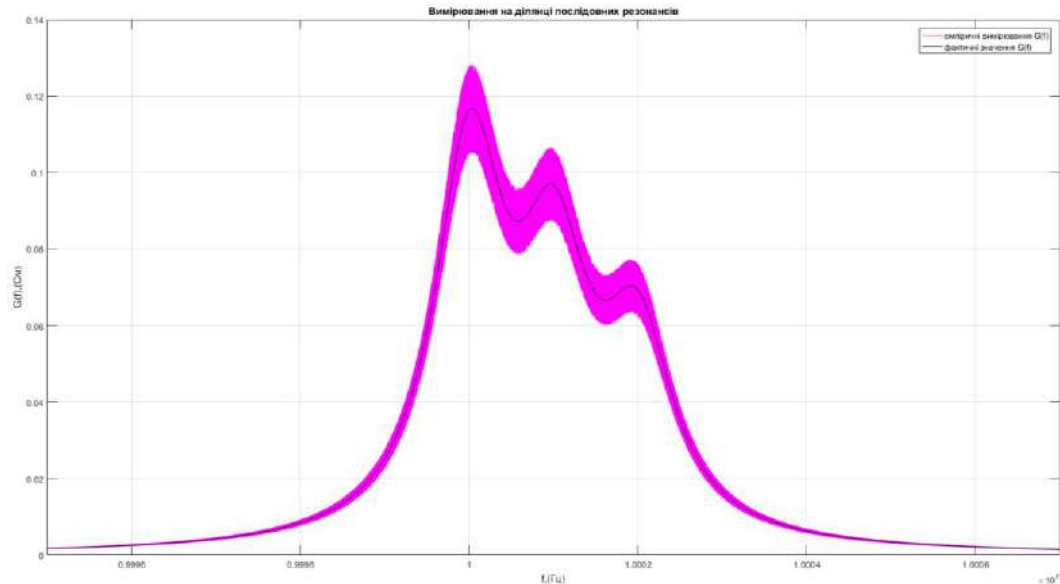


Рисунок 3.2 – Графіки фактичних та емпіричних даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Experiment_3R_10MHz, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.3 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R у полі Command Window для близько-розташованих резонансів з $Q=10^4$ при похибці 10%.



Рисунок 3.3 – Результат виконання програми Initial_conditions_3R у полі Command Window (близько-розташовані резонанси з $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.4 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

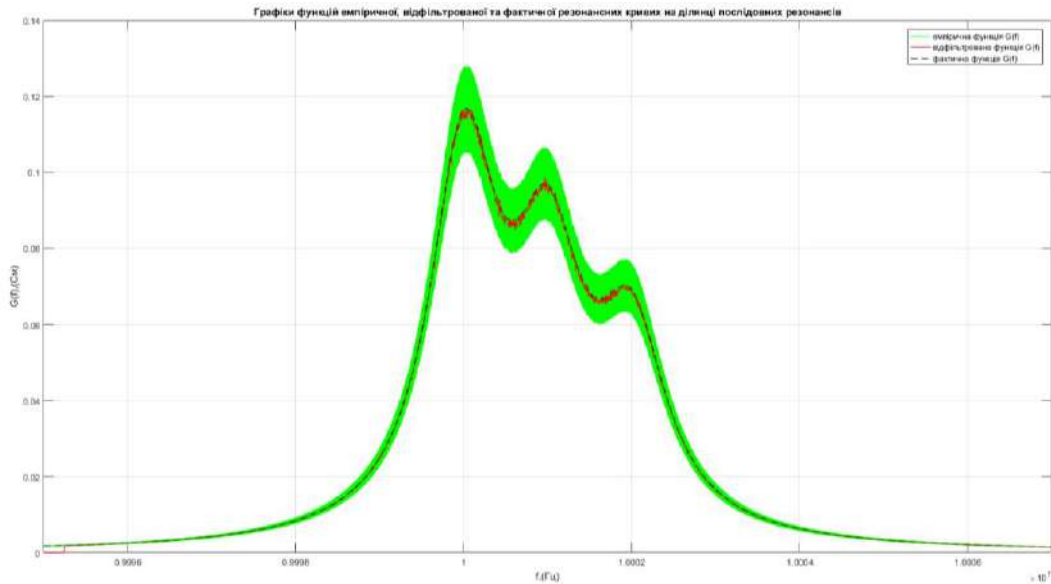


Рисунок 3.4 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.5 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів до коригування коефіцієнта K_{prog} .

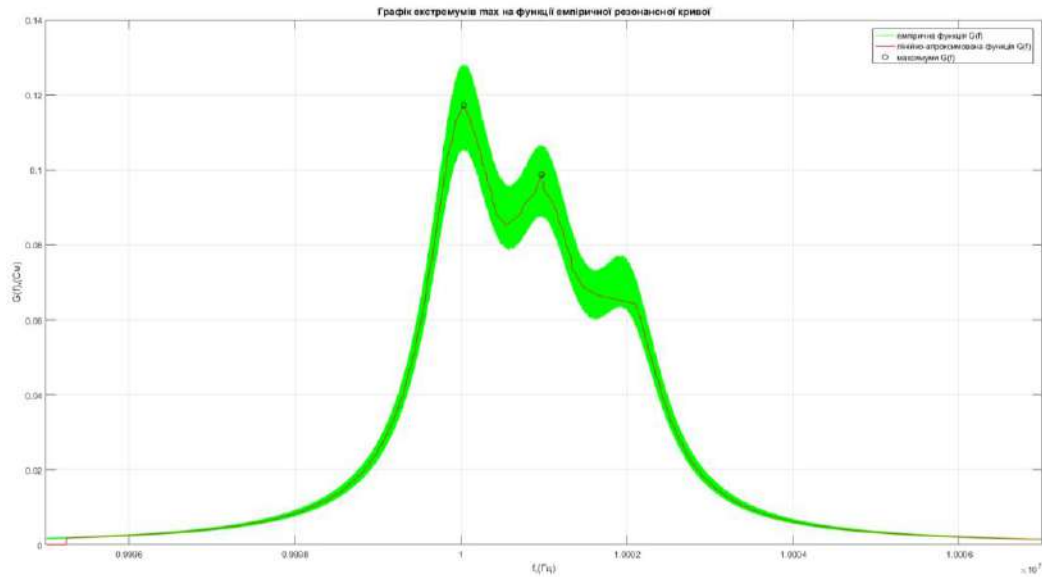


Рисунок 3.5 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів до коригування коефіцієнта K_{prog} (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.6 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max з лінією відсікання нижчих екстремумів для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів після коригування коефіцієнта K_{prog} .

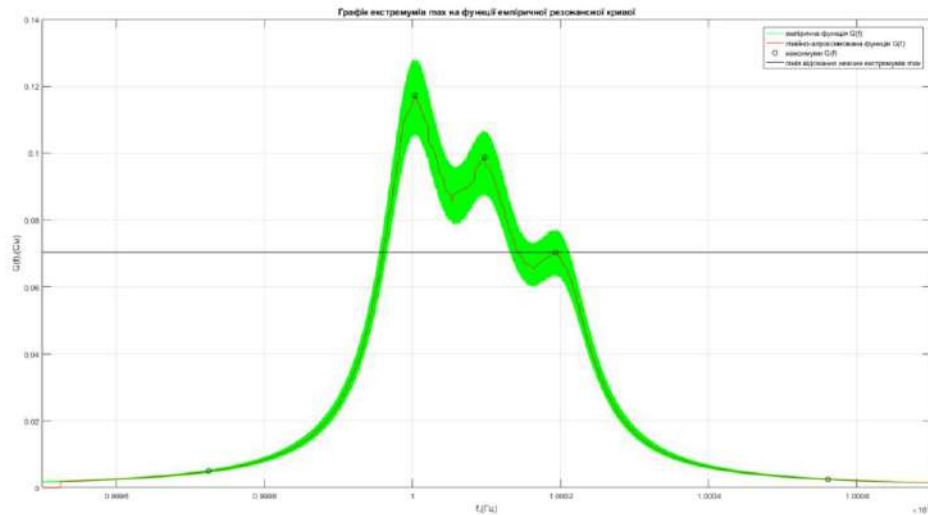


Рисунок 3.6 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів ток з лінією відсікання нижчих екстремумів на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів після коригування коефіцієнта K_{por} (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.7 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

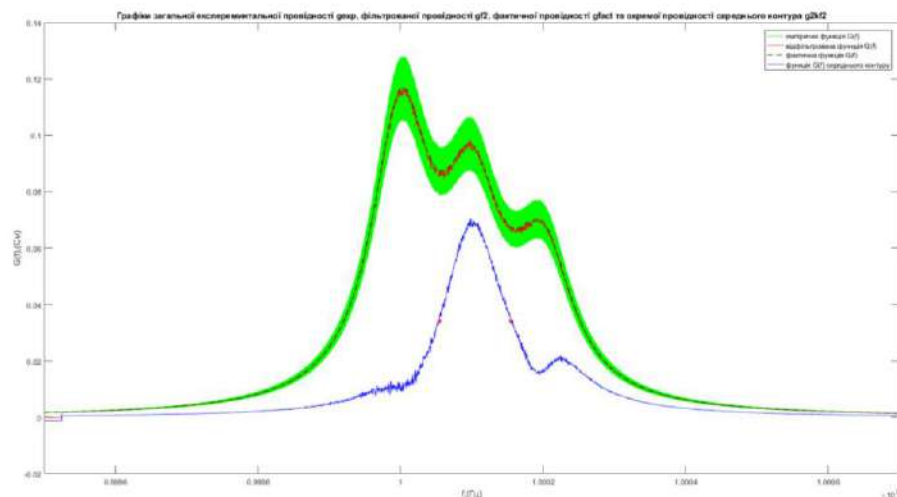


Рисунок 3.7 – Графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.8 відображено результат виконання програми `Fminsearch_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

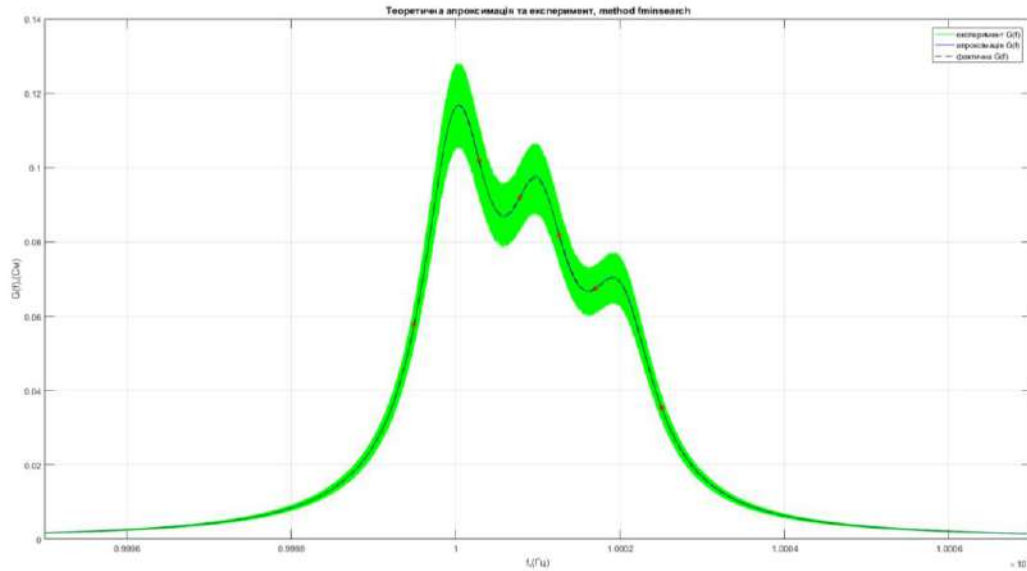


Рисунок 3.8 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.9 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

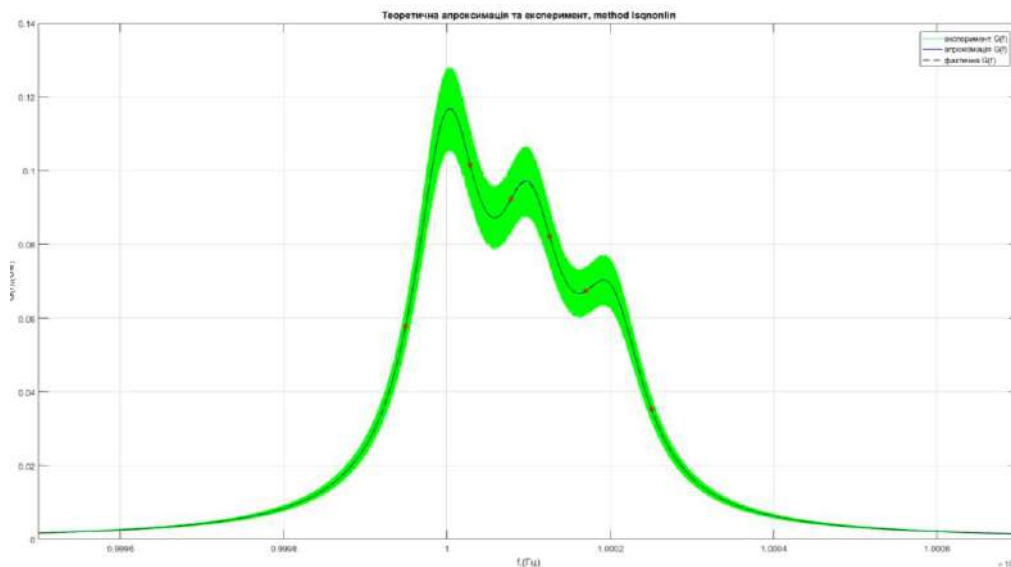


Рисунок 3.9 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод lsqnonlin, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.10 відображено результат виконання програми Fminsearch_3R у полі Command Window для близько-розташованих резонансів з $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window Page 1

>> fminsearch_3R
-----
Фактичні, знайдені при моделюванні, значення параметрів диск контурів:
r1fact =
    10
l1fact =
    1.591549430918953e-03
c1fact =
    1.591549430918953e-13
r2fact =
    18
l2fact =
    2.387688437838647e-03
c2fact =
    1.060926861259843e-13
r3fact =
    20
l3fact =
    3.182462369364034e-03
c3fact =
    7.956155923410086e-14
f01fact =
    1.00003260000000e+07
f02fact =
    1.000096190000000e+07
f03fact =
    1.000191820000000e+07
-----
Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на інтервалі
випробування:
A =
    129011
-----
OUTPUT =
struct with fields:

    iterations: 3345
    funcCount: 5038
    algorithm: 'Multi-Start simplex direct search'
    message: 'Optimization terminated.'
-----
Вихідні значення параметрів диск контурів, отримані при оптимізації/оптимізації:
r1 =
    9.879274819846021e+09
l1 =
    1.555670377788579e-03
c1 =
    1.627208509943184e-13
r2 =
    1.522264422211811e+01
l2 =
    2.570188758246118e-03
c2 =
    9.851153717648658e-14

MATLAB Command Window Page 2

r3 =
    1.958215682319967e+01
l3 =
    3.024446197230842e-03
c3 =
    8.371856648751539e-14
-----
Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від фактичних:
deviation_r1 =
    1.7675731801539788e+00
deviation_l1 =
    2.121518541571021e+00
deviation_c1 =
    2.240526613926036e+00
deviation_r2 =
    2.484378147454078e+00
deviation_l2 =
    7.695718185932189e+00
deviation_c2 =
    7.145779660108959e+00
deviation_r3 =
    2.189215864081672e+00
deviation_l3 =
    4.95217300111191e+00
deviation_c3 =
    5.224888607844925e+00
-----
Вихідні значення резонансних частот:
f01 =
    1.00003550000000e+07
f02 =
    1.00009657000000e+07
f03 =
    1.00019022000000e+07
-----
Відхилення у % вихідних значень резонансних частот від фактичних:
deviation_f01 =
    2.90560060372529e+00
deviation_f02 =
    3.79999999882413e+00
deviation_f03 =
    12
-----
Elapsed time is 1.356516 seconds.
>>

```

Рисунок 3.10 – Результат виконання програми fminsearch_3R у полі Command Window (метод fminsearch, близько-розташовані резонанси з $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.11 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` у полі `Command Window` для близько-розташованих резонансів з $Q=10^4$ при похибці 10%.

```

MATLAB Command Window Page 1
>> Lsqnonlin_3R
-----
Чисельні, зазначені при модуляванні, значення параметрів двох конкурсів:
r1fact =
    10
r2fact =
    1.591549430518953e-03
r3fact =
    1.591549430518953e-13
r1fact =
    15
r2fact =
    2.389585437834647e-03
r3fact =
    1.060926861259843e-13
r1fact =
    20
r2fact =
    3.182462369364030e-03
r3fact =
    7.956055923610086e-14
r01fact =
    1.000003260000000e+07
r02fact =
    1.000096190000000e+07
r03fact =
    1.000195200000000e+07
-----
Визначена довжина вектору дисперсій частот - кількість відліків на інтервалі
розширення:
b =
    120011
-----
Local minima possible.
lsqnonlin stopped because the final change in the sum of squares relative to
its initial value is less than the selected value of the function tolerance.
-----
<diagnosing criteria details>
-----
OUTPUT =
struct with fields:
    f0orderopt: 6.435524266686885e+01
    iterations: 576
    funcCount: 3770
    optiterations: 0
    algorithm: 'trust-region-reflective'
    message: 'Local minima possible..'
-----
Вихідні значення параметрів двох конкурсів, скреплені при шаркокоманді/розширенні:
r1 =
    9.96430926593733e+00
    1.585888235570384e-03
    1.591235675796012e-13
    1.439731231190013e+01
    2.417119851128301e-03
    1.047657460395083e-13
    1.991682477823240e+01
    5.1511736605573293e-03
    8.033723915214841e-14
-----
Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R, L, C від фактичних:
deviation_r1 =
    3.069797370262657e-01
deviation_r2 =
    3.597033043520693e-01
deviation_r3 =
    2.967611433607289e-01
deviation_L1 =
    1.791192565579978e-02
deviation_L2 =
    1.286582871917594e+00
deviation_C1 =
    1.231736629984889e+00
deviation_C2 =
    4.184761488179899e-01
deviation_C3 =
    9.68474250990959e-01
deviation_f01 =
    9.749432824566908e-01
-----
Вихідні значення резонансних частот:
f01 =
    1.000003260000000e+07
f02 =
    10000963
f03 =
    1.000191200000000e+07
-----
Відхилення у % від фактичних значень резонансних частот від фактичних:
deviation_f01 =
    0
deviation_f02 =
    1.089989898627471e+00

```

Рисунок 3.11 – Результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` у полі `Command Window` (метод `lsqnonlin`, близько-розташовані резонанси з $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.12 відображено результат виконання програми `Initial_conditions_3R` – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів `max` для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

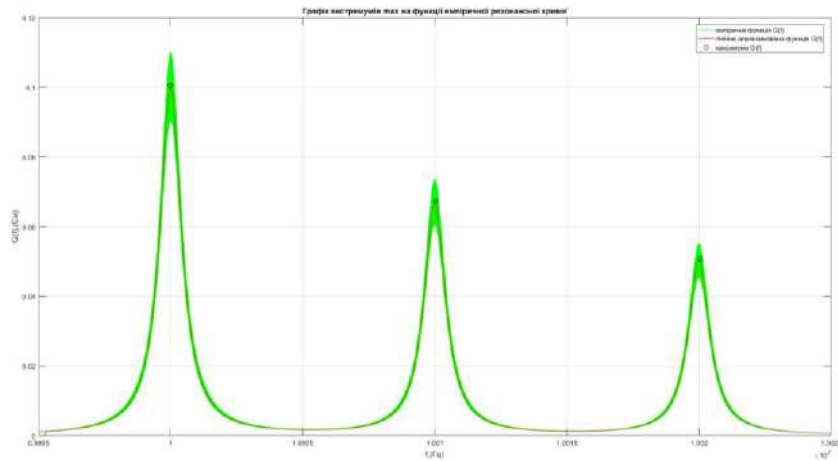


Рисунок 3.12 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів тах на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.13 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

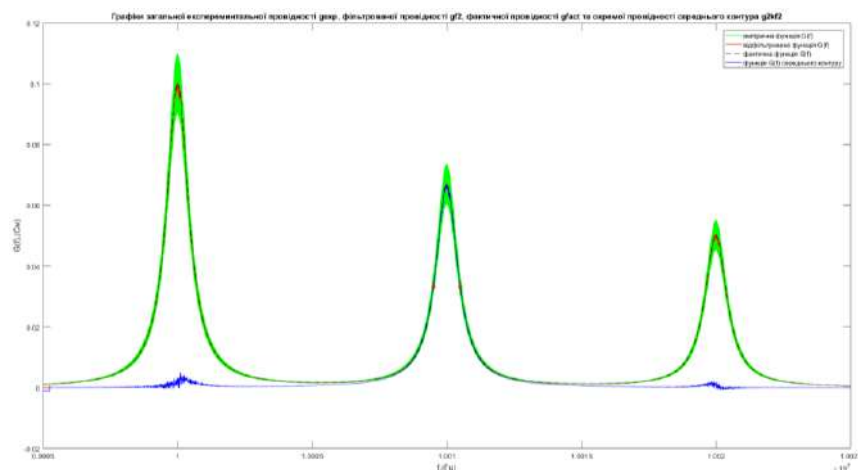


Рисунок 3.13 – Графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.14 відображено результат виконання програми `Fminsearch_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

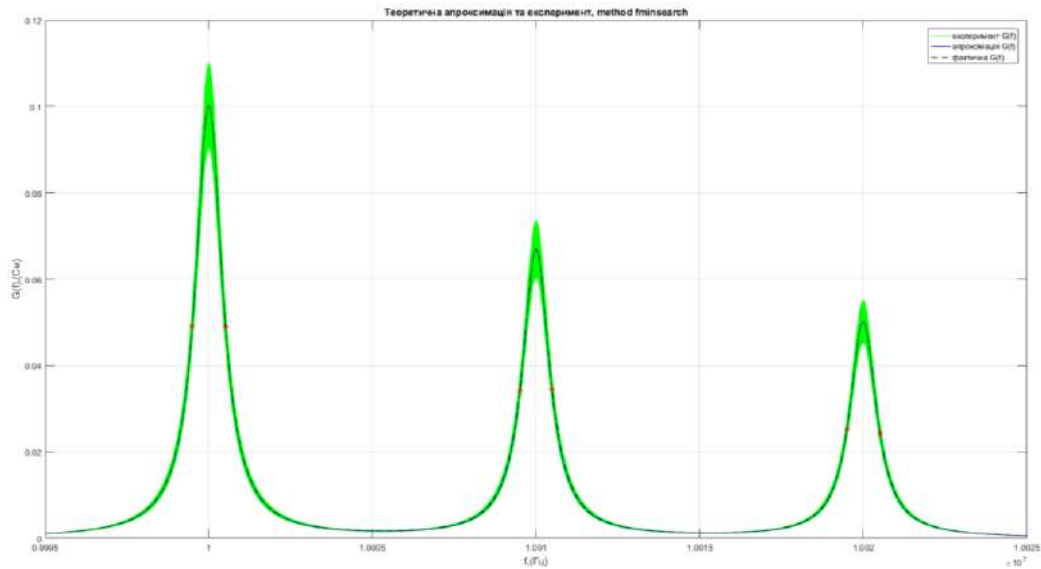


Рисунок 3.14 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^4$, похибка 10%)

На рисунку 3.15 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^4$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

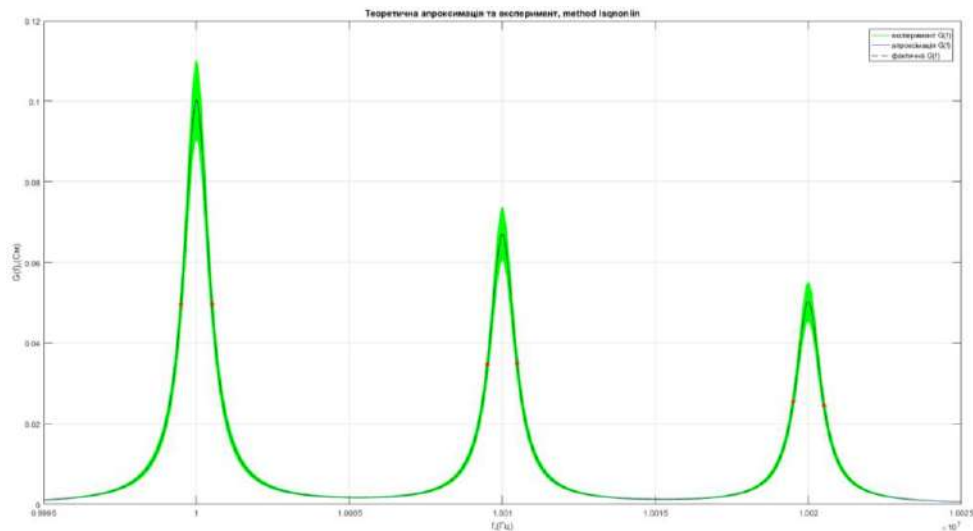


Рисунок 3.15 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод lsqnonlin, $Q=10^4$, похибка 10%)

У таблицях 3.3, 3.4 наведені результати модулювання трьох-резонансних кривих при значенні добротності $Q=10^5$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10% відповідно для випадків близько-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} , f_{03} та віддалено-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} , f_{03} . У таблицях також наведені параметри процесу обчислення, а саме : кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій Iterations та кількість звертань до цільової функції FuncCount, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 3.3 – Апроксимація трьох-резонансних кривих, близько-розташовані резонанси ($q = 10^5$, $f_{01}=10000009$ Гц, $f_{02}= 10000104$ Гц, $f_{03}=10000197$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів											Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time	
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	r3	L3	C3	f01	f02					f03
0	Фактичне значення (модулювання)	20 Ом	0.0318 Гн	0.00796 пФ	15 Ом	0.0239 Гн	0.0106 пФ	10 Ом	0.0159 Гн	0.0159 пФ	-	-	-	42001	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.62 %	1.14 %	1.13 %	0.72 %	1.06 %	1.05 %	0.43 %	0.93 %	0.92 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.66 %	1.05 %	1.04 %	0.63 %	1.06 %	1.05 %	0.26 %	0.95 %	0.94 %	0.3 Гц	0.1 Гц	0.1 Гц		1584	2620	0.52 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.0053 %	0.011 %	0.011 %	0.0044 %	0.018 %	0.018 %	0.0029 %	0.0068 %	0.0068 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		657	6580	35.70 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.17 %	2.15 %	2.10 %	1.69 %	2.54 %	2.48 %	0.86 %	0.041 %	0.041 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.23 %	2.16 %	2.13 %	0.19 %	2.60 %	2.53 %	0.28 %	0.072 %	0.072 %	0.4 Гц	0.4 Гц	0.1 Гц		1727	2843	0.61 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.077 %	0.076 %	0.076 %	0.14 %	0.26 %	0.26 %	0.17 %	0.040 %	0.040 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0 Гц		1201	12020	68.66 с
10	Похибка розрахунку початкового значення	2.67 %	15.37 %	13.32 %	4.23 %	15.47 %	18.30 %	3.35 %	8.03 %	7.43 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	5.57 %	15.37 %	13.32 %	4.89 %	15.47 %	18.30 %	3.35 %	8.03 %	7.43 %	3.1 Гц	1.2 Гц	1.0 Гц		1017	1811	0.40 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	1.10 %	0.52 %	0.53 %	0.20 %	2.01 %	1.97 %	0.11 %	0.82 %	0.82 %	0.8 Гц	0.1 Гц	0.1 Гц		7562	75630	430.13 с

Таблиця 3.4 – Апроксимація трьох-резонансних кривих, віддалено розташовані резонанси ($q = 10^5$, $f_{01}=10000000$ Гц, $f_{02}= 10001000$ Гц, $f_{03}=10002000$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів											Кількість відліків виміру	Iterations	FuncCount	Time	
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	r3	L3	C3	f01	f02					f03
0	Фактичне значення (модулювання)	20 Ом	0.0318 Гн	0.00796 пФ	15 Ом	0.0239 Гн	0.0106 пФ	10 Ом	0.0159 Гн	0.0159 пФ	-	-	-	60001	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	0.31 %	0.95 %	0.94 %	0.31 %	0.94 %	0.93 %	0.31 %	0.95 %	0.94 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.015 %	0.44 %	0.45 %	0.01 %	0.89 %	0.87 %	0.0065 %	0.82 %	0.81 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		11366	16424	3.29 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	6.24e-07 %	1.08e-05 %	1.08e-05 %	5.46e-08 %	2.54e-07 %	2.54e-07 %	3.95e-08 %	1.85e-07 %	1.86e-07 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		229	2300	18.27 с
5	Похибка розрахунку початкового значення	0.46 %	0.73 %	0.72 %	0.33 %	0.83 %	0.83 %	0.80 %	1.14 %	1.13 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.15 %	0.39 %	0.39 %	0.057 %	0.56 %	0.56 %	0.18 %	0.82 %	0.81 %	0.1 Гц	0 Гц	0 Гц		10708	15449	3.17 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.15 %	0.11 %	0.11 %	0.044 %	0.10 %	0.10 %	0.18 %	0.071 %	0.071 %	0.1 Гц	0 Гц	0 Гц		286	2870	22.59 с
10	Похибка розрахунку початкового значення	1.07 %	0.97 %	0.96 %	0.97 %	1.78 %	1.75 %	0.22 %	1.00 %	0.99 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.15 %	0.98 %	0.97 %	0.083 %	1.78 %	1.75 %	0.28 %	1.00 %	0.99 %	0.1 Гц	0 Гц	0.1 Гц		1000	1821	0.49 с
	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.12 %	0.015 %	0.015 %	0.11 %	0.042 %	0.042 %	0.29 %	0.069 %	0.069 %	0.1 Гц	0 Гц	0.1 Гц		413	4140	32.73 с

На рисунку 3.16 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів тах для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

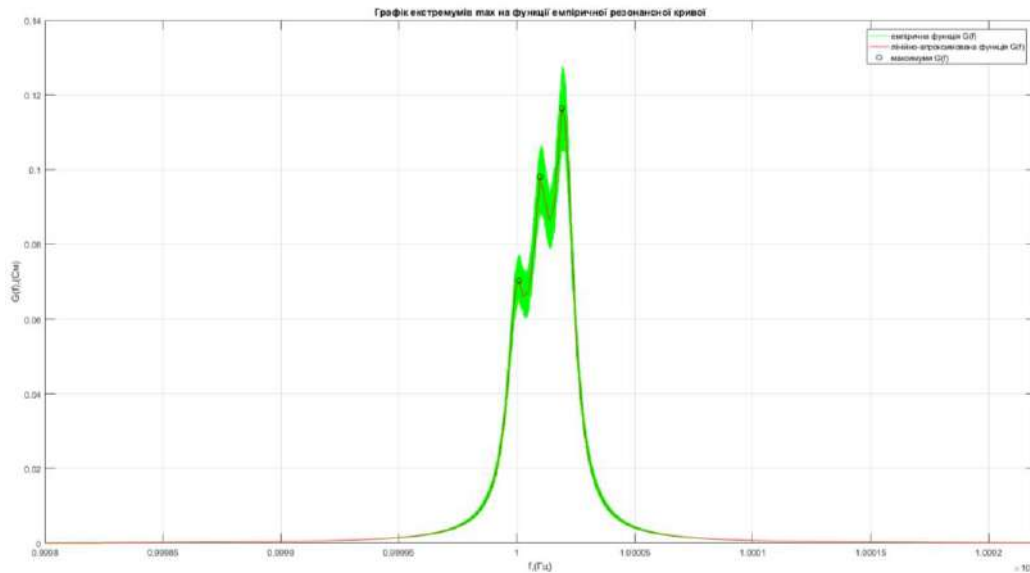


Рисунок 3.16 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів тах на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.17 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

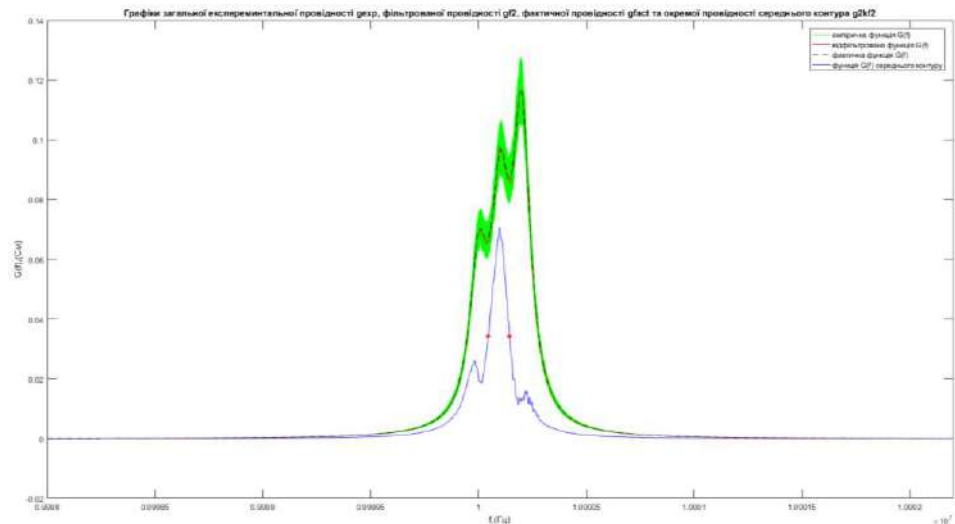


Рисунок 3.17 – Графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.18 відображено результат виконання програми Fminsearch_3R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

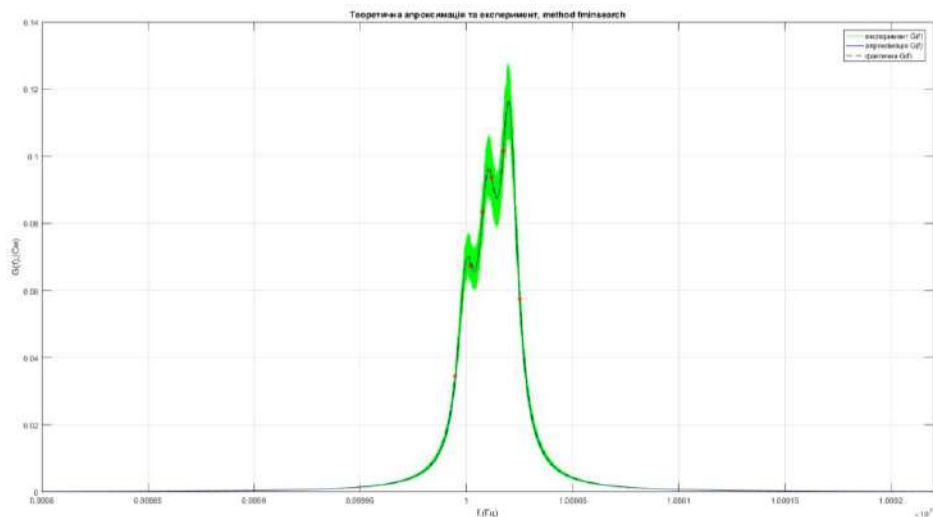


Рисунок 3.18 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод fminsearch, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.19 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

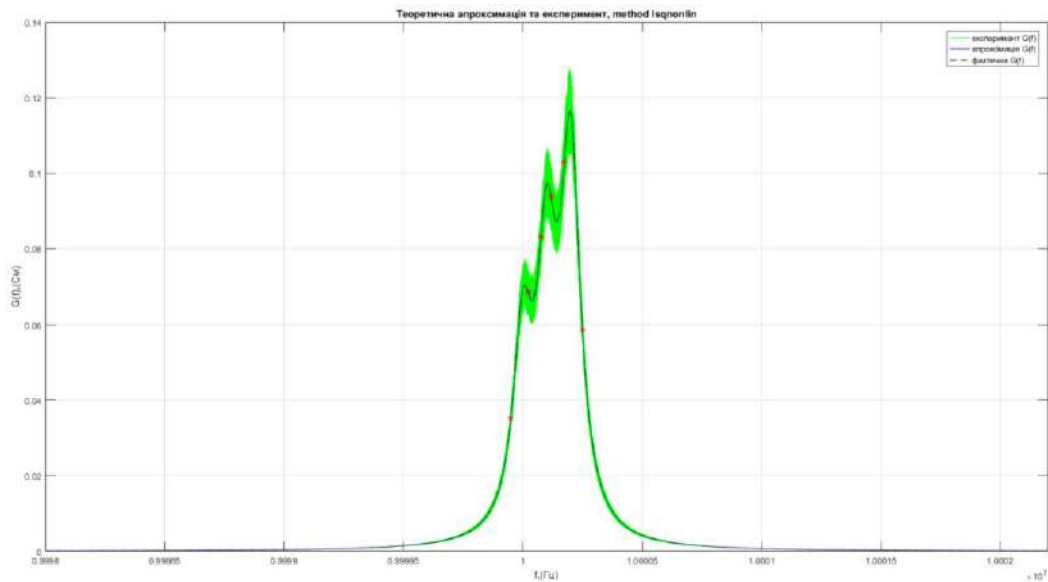


Рисунок 3.19 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод `lsqnonlin`, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.20 відображено результат виконання програми `Initial_conditions_3R` – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

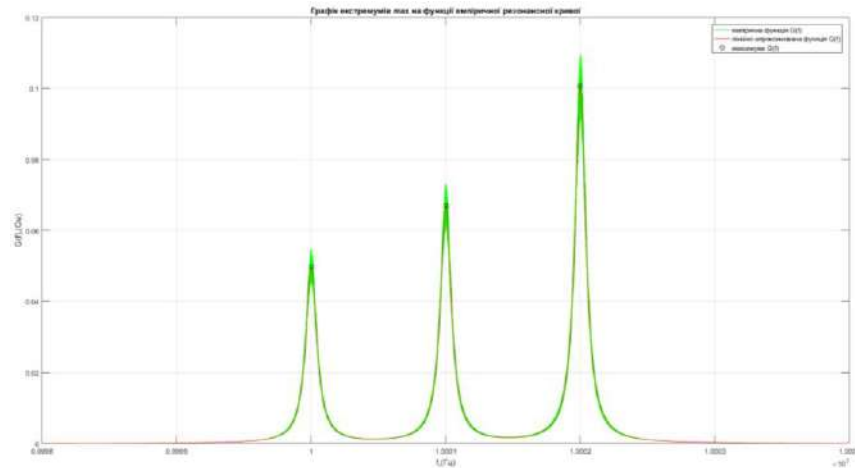


Рисунок 3.20 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів max на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.21 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

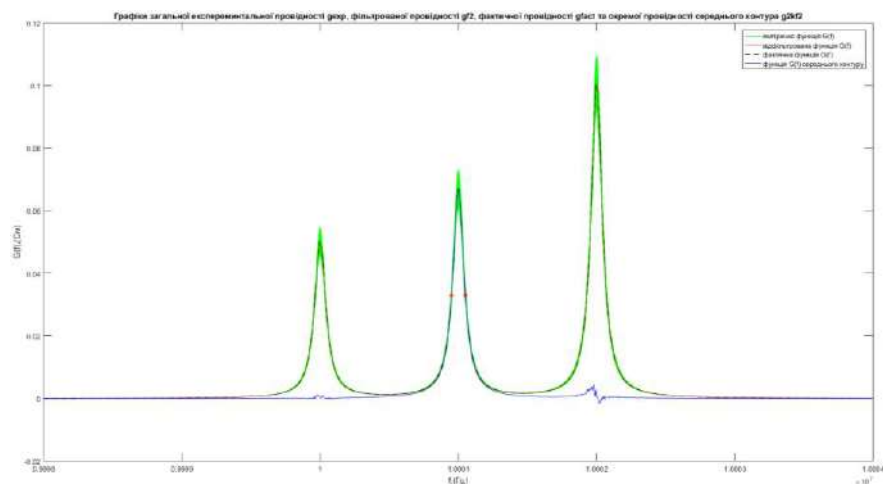


Рисунок 3.21 – Графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.22 відображено результат виконання програми `Fminsearch_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

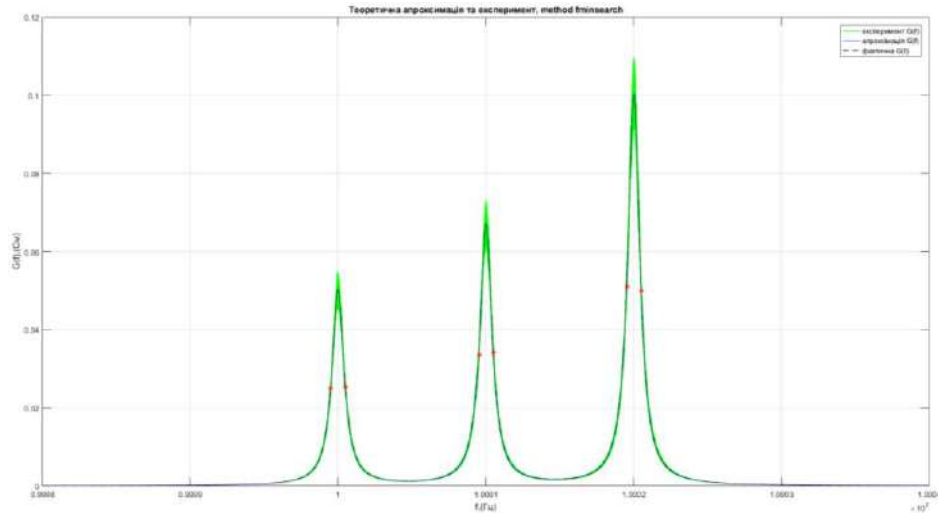


Рисунок 3.22 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.23 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^5$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

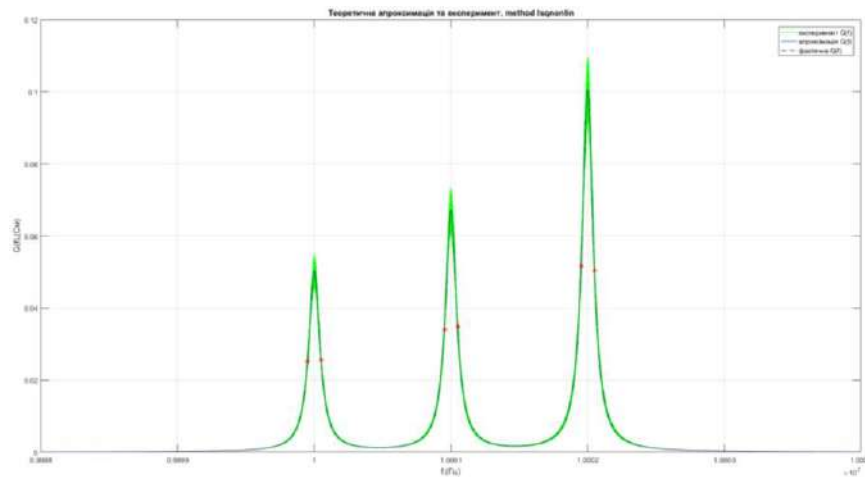


Рисунок 3.23 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод lsqnonlin, $Q=10^5$, похибка 10%)

У таблицях 3.5, 3.6 наведені результати модулювання трьох-резонансних кривих при значенні добротності $Q=10^6$ та похибках вимірювання 0%, 5%, 10% відповідно для випадків близько-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} , f_{03} та віддалено-розташованих резонансів f_{01} , f_{02} , f_{03} . У таблицях також наведені параметри процесу обчислення, а саме : кількість відліків нормованої частоти при вимірюванні та обчисленні, кількість ітерацій Iterations та кількість звертань до цільової функції FuncCount, а також загальний час виконання програм апроксимації/оптимізації.

Таблиця 3.5 – Апроксимація трьох-резонансних кривих, близько розташовані резонанси ($q = 10^6$, $f_{01}=10000000.3$ Гц, $f_{02}= 10000009.6$ Гц, $f_{03}= 10000019.2$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів											Кількість відділів виміру	Iterations	FuncCount	Time	
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	r3	L3	C3	f01	f02					f03
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.159 Гн	0.00159 пФ	15 Ом	0.239 Гн	0.00106 пФ	20 Ом	0.318 Гн	0.00080 пФ	-	-	-	40201	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	4.59 %	3.39 %	3.50 %	1.84 %	8.29 %	9.05 %	5.92 %	17.04 %	14.56 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	1.40 %	3.39 %	3.51 %	1.02 %	8.30 %	9.05 %	8.92 %	17.03 %	14.55 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.2 Гц		1169	2083	0.41 с
5	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	1.35 %	2.53 %	2.59 %	0.89 %	8.18 %	8.91 %	1.24 %	17.04 %	14.56 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.4 Гц	8112	81130	503.41 с	
	Похибка розрахунку початкового значення	4.31 %	6.82 %	7.32 %	7.56 %	3.28 %	3.18 %	9.00 %	8.07 %	7.45 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	1.36 %	6.85 %	7.36 %	1.86 %	3.33 %	3.22 %	1.04 %	7.89 %	7.31 %	0.2 Гц	0.3 Гц	0.2 Гц	2395	3824	0.67 с	
10	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	1.35 %	6.82 %	7.32 %	1.77 %	3.30 %	3.19 %	1.39 %	8.07 %	7.47 %	0.2 Гц	0.3 Гц	0.2 Гц	8	90	0.64 с	
	Похибка розрахунку початкового значення	5.85 %	1.03 %	1.04 %	1.29 %	20.24 %	25.37 %	10.20 %	35.97 %	26.45 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	3.23 %	1.03 %	1.05 %	0.78 %	20.23 %	25.37 %	13.98 %	35.98 %	26.46 %	0.1 Гц	0.2 Гц	0.5 Гц	678	1398	0.32 с	
10	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	2.67 %	1.03 %	1.04 %	2.52 %	20.23 %	25.36 %	4.53 %	35.97 %	26.45 %	0.1 Гц	0.1 Гц	0.7 Гц	24	250	1.1 с	

Таблиця 3.6 – Апроксимація трьох-резонансних кривих, віддалено розташовані резонанси ($q = 10^6$, $f_{01}=10000000$ Гц, $f_{02}= 10000100$ Гц, $f_{03}= 10000200$ Гц)

Похибка вимірів, %	Параметр виміру	Параметри контурів											Кількість відділів виміру	Iterations	FuncCount	Time	
		r1	L1	C1	r2	L2	C2	r3	L3	C3	f01	f02					f03
0	Фактичне значення (модулювання)	10 Ом	0.159 Гн	0.00159 пФ	15 Ом	0.239 Гн	0.00106 пФ	20 Ом	0.318 Гн	0.00080 пФ	-	-	-	42001	-	-	-
	Похибка розрахунку початкового значення	3.58 %	1.56 %	1.58 %	3.63 %	1.64 %	1.66 %	3.46 %	1.66 %	1.69 %	-	-	-		-	-	-
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.17 %	1.57 %	1.60 %	0.091 %	1.60 %	1.62 %	4.03 %	1.60 %	1.62 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц		1304	2252	0.54 с
5	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.0011 %	0.42 %	0.42 %	0.012 %	0.55 %	0.55 %	1.75 %	1.66 %	1.69 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц	6408	64090	460.83 с	
	Похибка розрахунку початкового значення	3.35 %	1.98 %	2.02 %	3.63 %	1.47 %	1.49 %	2.81 %	2.00 %	2.04 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.30 %	1.98 %	2.02 %	1.32 %	1.48 %	1.50 %	5.19 %	1.95 %	1.99 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц	1455	2451	0.49 с	
10	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.22 %	0.69 %	0.69 %	7.67e-04 %	0.45 %	0.45 %	1.70 %	2.00 %	2.04 %	0 Гц	0 Гц	0 Гц	7661	76620	577.18 с	
	Похибка розрахунку початкового значення	3.98 %	1.84 %	1.88 %	4.09 %	1.49 %	1.51 %	4.02 %	1.58 %	1.60 %	-	-	-	-	-	-	
	Похибка апроксимації, метод fminsearch	0.23 %	1.84 %	1.87 %	0.30 %	1.50 %	1.52 %	3.53 %	1.59 %	1.62 %	0.1 Гц	0 Гц	0 Гц	1198	2128	0.50 с	
10	Похибка апроксимації, метод lsqnonlin	0.23 %	0.70 %	0.70 %	0.59 %	0.48 %	0.48 %	2.67 %	1.57 %	1.60 %	0.1 Гц	0 Гц	0 Гц	6250	62510	463.84 с	

На рисунку 3.24 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних з $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

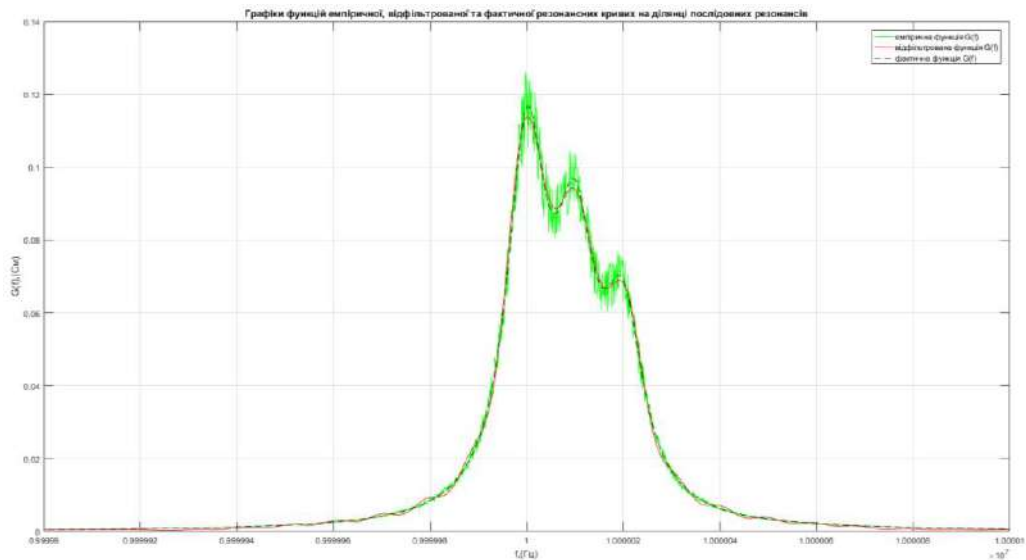


Рисунок 3.24 – Графіки емпіричних, фактичних та відфільтрованих даних на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^5$, похибка 10%)

На рисунку 3.25 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів \max з лінією відсікання нижчих екстремумів для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

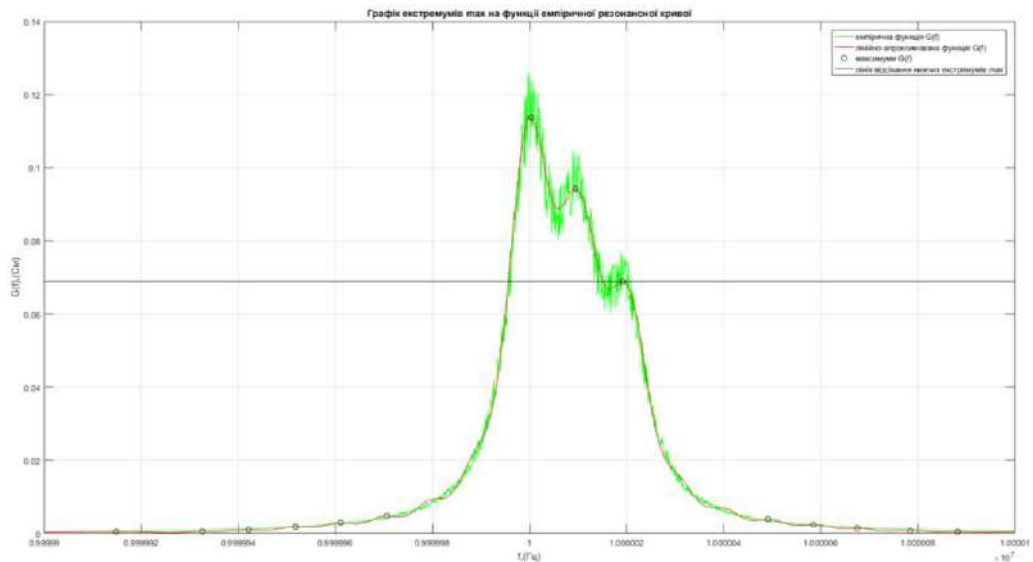


Рисунок 3.25 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів тах з лінією відсікання нижчих екстремумів на ділянці послідовних близько-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.26 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

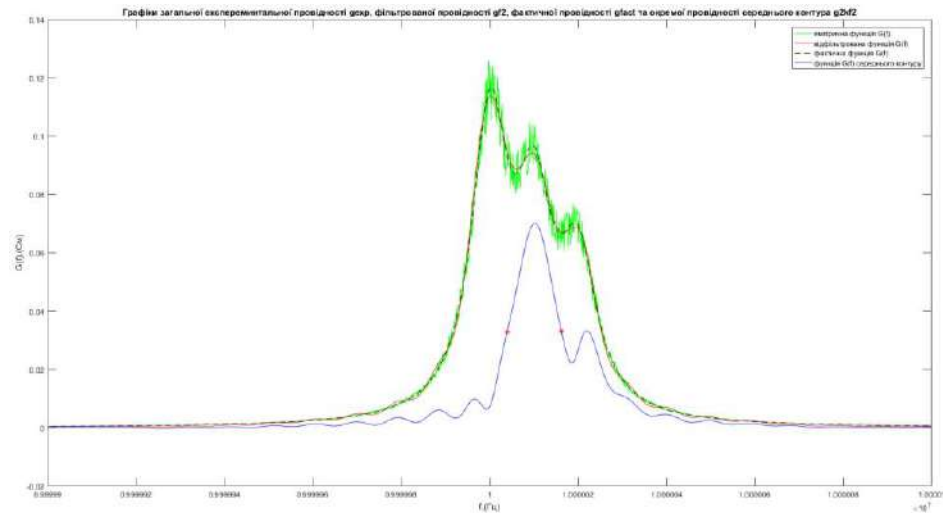


Рисунок 3.26 – Графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.27 відображено результат виконання програми Fminsearch_3R – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

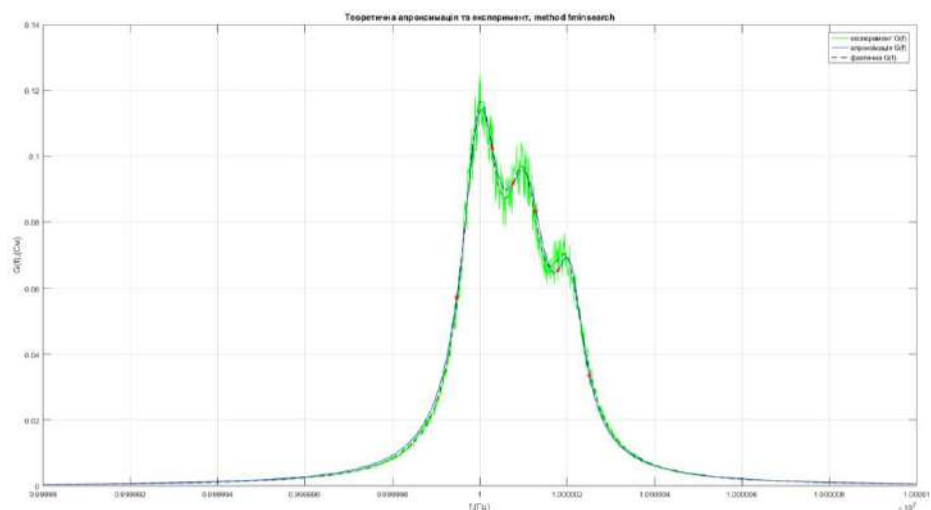


Рисунок 3.27 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод fminsearch, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.28 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів.

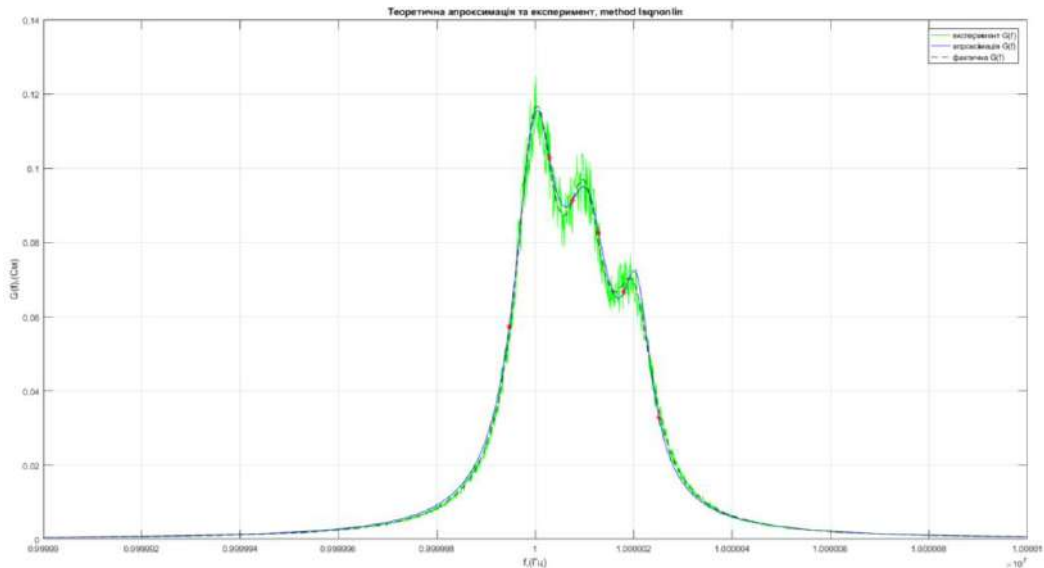


Рисунок 3.28 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці близько-розташованих послідовних резонансів (метод `lsqnonlin`, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.29 відображено результат виконання програми `Initial_conditions_3R` – графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів `max` з лінією відсікання нижчих екстремумів для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

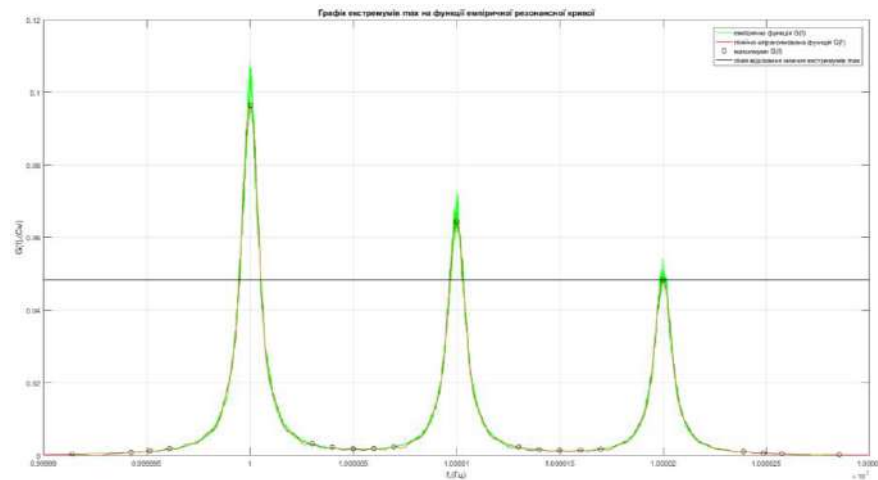


Рисунок 3.29 – Графіки емпіричних даних, лінійно-апроксимованої функції та знайдених екстремумів ток з лінією відсікання нижчих екстремумів на ділянці послідовних віддалено-розташованих резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.30 відображено результат виконання програми Initial_conditions_3R – графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

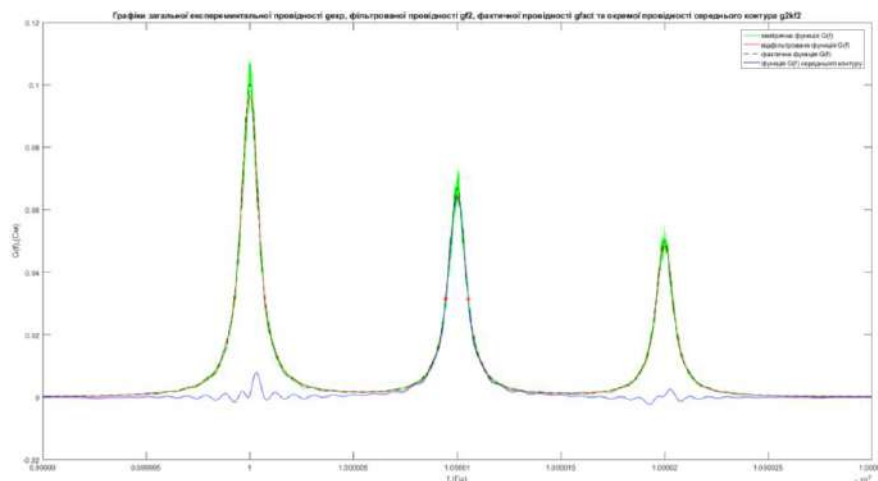


Рисунок 3.30 – Графіки емпіричних даних, відфільтрованої функції, фактичної функції, функції провідності середнього контуру на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (програма Initial_conditions_3R, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.31 відображено результат виконання програми `Fminsearch_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

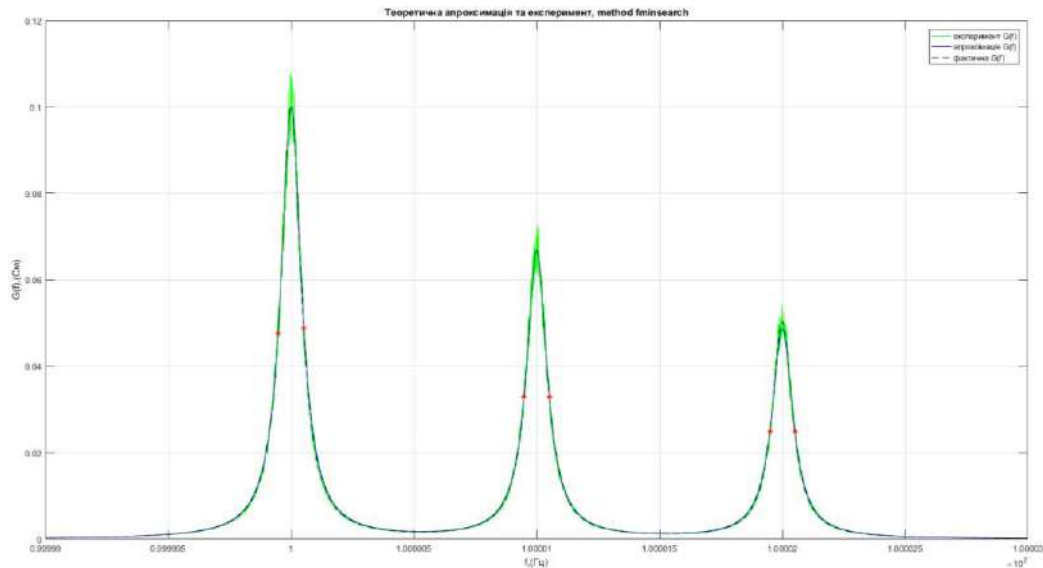


Рисунок 3.31 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `fminsearch`, $Q=10^6$, похибка 10%)

На рисунку 3.32 відображено результат виконання програми `Lsqnonlin_3R` – графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних для $Q=10^6$ на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів.

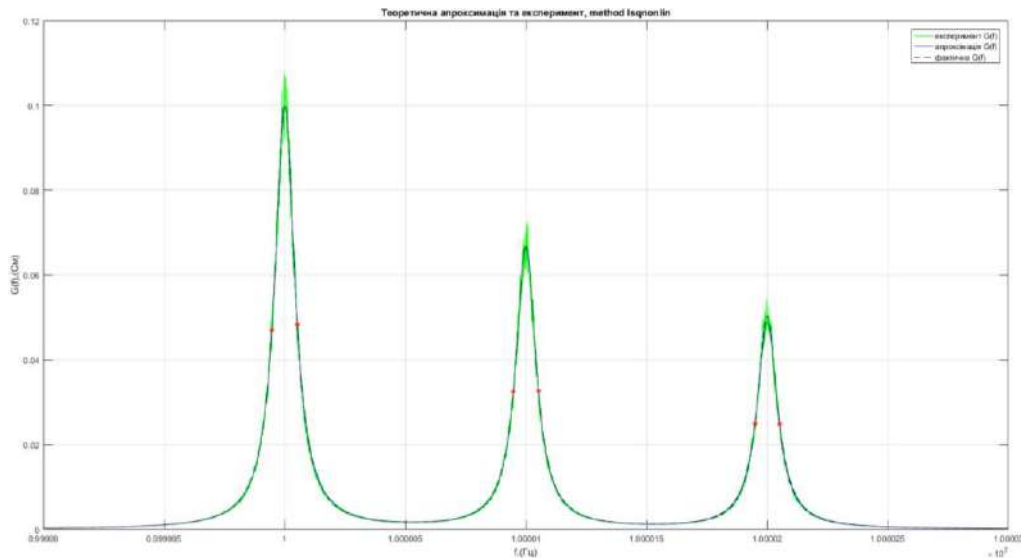


Рисунок 3.32 – Графіки емпіричних, фактичних та апроксимованих даних на ділянці віддалено-розташованих послідовних резонансів (метод `lsqnonlin`, $Q=10^6$, похибка 10%)

З отриманих результатів (табл. 3.1-3.6) випливає, що при апроксимації трьох-резонансних кривих, як і очікувалось, за точністю обчислення при ненульовій похибці вимірювань, кількості ітерацій, звертань до цільової функції, часом виконання програми оптимізації функції `fminsearch` і `lsqnonlin` мають суттєво кращий результат для віддалено-розташованих резонансів в порівнянні з близько-розташованими резонансами для певного значення добротності контурів Q . При порівнянні обох функцій знову, як і для двох-резонансної апроксимації для значень добротності контурів $Q=10^4$, $Q=10^5$, спостерігаємо закономірність: за кількістю ітерацій та звертань до цільової функції метод `fminsearch` значно перевищує `lsqnonlin`, але за часом виконання навпаки, метод `lsqnonlin` значно перевищує `fminsearch`. Але при у середньому, та особливо при несприятливих співвідношеннях розрахованих початкових значень для близько-розташованих резонансів метод `lsqnonlin` за точністю апроксимації має беззаперечну перевагу з результатом похибки апроксимації у межах 1%.

Для значення добротності $Q=10^6$ результати дещо відрізняються – для близько-розташованих контурів похибка апроксимації для обох методів приблизно однакова і знаходиться дуже близько до похибки розрахунку початкових значень, при цьому найгірше значення похибки як апроксимації так і розрахованих початкових умов дорівнює 36% для 10%-ої похибки вимірювання. Для віддалено-розташованих контурів з $Q=10^6$, точність апроксимації приблизно однакова і не перевищує кількох відсотків, але при цьому для методу `lsqnonlin` набагато більше (в десятки-сотні раз) кількість ітерацій, звертань до цільової функції, часу виконання програми. Це можна пояснити тим, що при добротності $Q=10^6$ трьох-резонансних кривих мають місце самі найскладніші умови для розрахунку початкових значень і апроксимації внаслідок дуже високої швидкості зміни провідності кривої в області резонансу та меншої відносної кількості відліків на смугу перепуску.

Для значень добротності контурів $Q=10^4$, $Q=10^5$ також спостерігається висока точність розрахунку початкових значень, похибка яких не дуже залежить від похибки вимірювань та не перевищує 10%, це є результатом складної обробки емпіричних даних у програмі розрахунку початкових значень `Initial_conditions_3R`. Також, як і для одно- та двох-резонансної апроксимації, спостерігається загальна закономірність, що зі збільшенням значення добротності Q збільшуються середній час виконання обох програм, кількість ітерацій та звертань до цільової функції, похибка апроксимації, що пояснюється тим, що, як вже відзначалося вище, із зростанням добротності Q , збільшується швидкість зміни значень функції від частоти в області резонансу і при цьому зменшується відносна кількість відліків на смугу перепуску резонансної кривої, так для значення добротності $Q=10^4$ кількість відліків на смугу перепуску за рівнем 0.707 дорівнює $(f_0/10^4)/\text{step}=(10^7/10^4)/0.1=10000$, відповідно для значень добротності $Q=10^5$ та $Q=10^6$ маємо значення 1000 та 100 відліків.

ВИСНОВКИ

Підсумовуючи детальні висновки, які були зроблені в кінці кожного розділу, на підставі отриманих статистичних даних, можна стверджувати, що розроблені методи аналізу емпіричних даних провідностей резонансних кривих на основі пакету MatLab дуже добре вирішують задачу апроксимації в широкому діапазоні великих значень добротності $Q=10^4 - 10^6$. Для одно-резонансних кривих перевагу можна віддати функції оптимізації `fminsearch`, так як при відмінній точності апроксимації $< 1\%$, часу на обчислення методу `fminsearch` витрачається менше порівняно з методом `lsqnonlin`. Для двох-резонансних кривих та трьох-резонансних кривих загальна перевага, незважаючи на більший час обчислення, безумовно на боці методу `lsqnonlin`, так як він забезпечує суттєву більшу точність апроксимації. Отриманий результат став можливим завдяки ретельному підходу до розрахунку початкових значень параметрів контурів, які, як вище відзначалось, є дуже критичними для точності апроксимації високодобротних резонансних схем. Застосовані при розрахунку початкових значень методи цифрової фільтрації, адаптивної лінійної апроксимації/інтерполяції, застосування коригуючих коефіцієнтів, вирішення системи нелінійних рівнянь дозволили забезпечити точність розрахунку в декілька відсотків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Лізунов С.І. Конспект лекцій з дисципліни «Методологія наукових досліджень» / С.І Лізунов, В.О. Костенко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 154 с.
2. Кислий В.М. Організація наукових досліджень: навч. посібник / В.М. Кислий. – Суми: Університетська книга, 2011. – 224 с.
3. Антонюк В. Методологія наукових досліджень: навчальний посібник / В. Антонюк, Л. Полонський, В. Аверченков, Ю. Малахов. – К:НТТУ «КП», 2015. – 276 с.
4. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 632 с.
5. Кетков Ю.Л. MatLab 6.x.: программирование численных методов / Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М.М. Шульц // СПб.: БВХ-Петербург, 2004, – 672 с.
6. Кондрашев В. MatLab как система программирования науднотехнических расчелов / В. Кондрашев. – М.: Мир, 2002. – 350 с.
7. Пугачева. С.И. Пьезокерамические преобразователи: справочник / С.И. Пугачева. – Л.: Судосроение, 1984. – 356 с.
8. Чернусь П.П. Численные методы и их применение в MatLab / П.П. Чернусь, П.П. Чернусь – БГТУ: СПб., 2018. – 90 с.
9. Северин В.П. Методы многомерной безусловной минимизации / В.П. Северин. – ХПИ, 2013. – 160 с.
10. Дьяконов В.П. MatLab. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
11. Васильев А.Н. MatLab. Самоучитель. практический подход. 2-е издание / А.Н. Васильев. – СПб.: Наука и Техника, 2015. – 448 с.
12. Макаренко А.А. Расчет цифровых фильтров методом автоматизированного проектирования / А.А. Макаренко, М.Ю. Плотников. – СПб.: НИУИТМО, 2014. – 50 с.

ДОДАТОК А

Лістинги програм для апроксимації одно-резонансних кривих

Experiment_1R_10MHz:

```

% Mathematical model of 1-resonance circuit experiments (f = 10 MGz)
% Математична модель експериментів 1-резонансної схеми (f = 10 МГц)
%-----
% **** СТАРТОВЕ ВВЕДЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ КОНТУРУ ****
C0 = 10*1e-12; %введення значення вхідної ємності ПКЕ
f0 = 10*1e6; %введення значення центральної частоти контуру
q = 1e6; %введення значення добротності контуру
r = 10; %введення значення активного опору контуру
step = 0.1; %введення значення кроку вимірювання, Гц
error = 10; %введення значення похибки вимірювання в %
%*****
%-----
% Розрахунок інтервалу вимірювання
if 5*(f0/q) > 1000,
    deltaf0 = 5*(f0/q);
else
    deltaf0 = 1000;
end
a = f0-deltaf0; %розрахунок значення fmin, Гц (початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = f0+deltaf0;; %розрахунок значення fmax, Гц (кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
%-----
% Розрахунок значень L,C
L = (q*r)/(2*pi*f0) %розрахунок індуктивності контуру L
C = 1/((2*pi*f0)^2*L) %розрахунок ємності контуру C
%-----
% Розрахунок верхньої частоти паралельного резонансу fpar
fpar = 1/(2*pi*sqrt(L*(C0*C/(C0+C))))
%-----
% Коригування кінцевого значення частоти інтервалу вимірювання
% з урахуванням верхньої частоти паралельного резонансу fpar
if 0.9999*fpar > b,
d1 = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*b; %розрахунок вектору першого піддіапазону
кутової частоти w
d2 = (2*pi*b)+step : 2*pi*step*10 : (2*pi*0.9999*fpar)-step; %розрахунок
вектору другого піддіапазону кутової частоти w
d3 = 2*pi*0.9999*fpar : 2*pi*step : 2*pi*1.0001*fpar; %розрахунок вектору
третього піддіапазону кутової частоти w
w = [d1,d2,d3]; %формування об'єднаного вектору інтервалу кутової частоти w
else
    if 1.0001*fpar > b,
        w = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*1.0001*fpar; %формування об'єднаного
вектору інтервалу кутової частоти w
    else
        w = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*b; %формування об'єднаного вектору
інтервалу кутової частоти w
    end
end
disp ('-----
');

```

```

disp ('Кількість відліків на інтервалі вимірювання:');
h = length(w) %нормована довжина вектору кутової частоти w - кількість
відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Розрахунок фактичного та експериментального векторів модуля провідності
yabsfact = sqrt((r./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2+(w*C0-((w*L-
1./(w*C))./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2); %обчислення фактичного модуля
провідності
pogr = (rand(1,length(yabsfact))-0.5)*2*(error/100); % формування вектору
похибки
yabsexp = yabsfact+(yabsfact.*pogr); %формування вектору емпіричних даних
%-----
% Графіки на ділянці послідовних резонансів
figure(1);
plot(f,yabsexp,'m-',f,yabsfact,'k-') %побудування графіків |Y(f)|
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпіричні вимірювання |Y(f)|','фактичні значення |Y(f)|')
%коментарі(легенда) на графіках
title('Вимірювання на ділянці послідовних резонансів') %найменування
заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([a,b]) %діапазон значень осі абцис X
%-----
% Графіки на ділянці паралельного резонансу
figure(2);
plot(f,yabsexp,'m-',f,yabsfact,'k-') %побудування графіків |Y(f)|
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпіричні вимірювання |Y(f)|','фактичні значення |Y(f)|')
%коментарі(легенда) на графіках
title('Вимірювання на ділянці паралельного резонансу') %найменування
заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([0.9999*fpar,1.0001*fpar]) %діапазон значень осі абцис X
%-----
-----
% Уточнення фактичного значення частоти послідовного резонансу
[yabsfactmax,fn] = findpeaks(yabsfact); %пошук екстремумів max yabsfact
disp ('-----
');
disp ('Кількість екстремумів max yabsfact:');
kmaxfact = length(yabsfactmax) % кількість екстремумів max yabsfact
f0 = f(fn(1))
disp ('-----
');
%-----
% Визначення максимуму вектору емпіричних даних yabsexp
maxyabsexp = max(yabsexp) %максимальне значення yabsexp
n = 1;
while yabsexp(n) ~= maxyabsexp,
    n = n+1;
end
fmaxexpn = n; %нормована частота max yabsexp
fmaxexp = f(n) %частота max yabsexp
%-----
-----
% Розрахунок фактичного та експериментального значень модуля провідності
% на частоті f*10 для подальшого розрахунку значення вхідної ємності C0

```

```

f10 = fmaxexp*10 % частота вимірювання для розрахунку при оптимізації
початкового значення C0
w10 = 2*pi*f10; %перехід від f10 до кутової частоти w10
yabsfact10 = sqrt((r/((r^2)+((w10*L)-(1/(w10*C)))^2))^2+((w10*C0)-((w10*L-
(1/(w10*C))))/((r^2)+((w10*L)-(1/(w10*C)))^2)))^2) %обчислення фактичного
модуля провідності для f*10
pogr10 = (rand-0.5)*2*(error/100); % формування значення похибки
yabsexp10 = yabsfact10+(yabsfact10*pogr10) %формування емпіричного значення
на частоті f10
%-----
-----
% Зберігання еміричних та фактичних даних в файлі filelexp1 для програми
апроксимації
s1 = fopen('fileexp1','wb');
a1 = fwrite(s1,a,'double');
a2 = fwrite(s1,b,'double');
a3 = fwrite(s1,step,'double');
a4 = fwrite(s1,r,'double');
a5 = fwrite(s1,L,'double');
a6 = fwrite(s1,C,'double');
a7 = fwrite(s1,C0,'double');
a8 = fwrite(s1,f0,'double');
a9 = fwrite(s1,h,'double');
a10 = fwrite(s1,yabsexp,'double');
a11 = fwrite(s1,w,'double');
a12 = fwrite(s1,f10,'double');
a13 = fwrite(s1,yabsexp10,'double');
a14 = fwrite(s1,fmaxexpn,'double');
a15 = fwrite(s1,yabsfact,'double');
fclose(s1);
%-----
-----
% Зберігання еміричних даних в файлі filelexp2 для програми розрахунку ФНЧ
s2 = fopen('fileexp2','wb');
a1 = fwrite(s2,step,'double');
a2 = fwrite(s2,fmaxexp,'double');
fclose(s2);

```

Filter_FIR_LPF:

```

% Calculation of coefficients and group delay of the filter FIR-LPF
% Розрахунок коефіцієнтів та групової затримки фільтра КІХ-ФНЧ
%-----
% Зчитування еміричних даних з файлу fileexp2
s2 = fopen('fileexp2','rb');
step = fread(s2,1,'double')
fmaxexp = fread(s2,1,'double')
%-----
% Визначення параметрів фільтра КІХ-ФНЧ
TRMIN = 2*fmaxexp/1e6 %оціночний розрахунок мінімального періоду в Гц
резонансної кривої, що відповідає Qmax=1e6
Fs = 1/step %розрахунок частоти дискретизації еквівалентного сигналу за
часом, інтерпретація 1Гц - 1с
fb = 2*(1/TRMIN) %розрахунок граничної частоти смуги пропуску
(bandwidth)еквівалентного сигналу за часом
fdb = 1.2*fb %розрахунок граничної частоти смуги затримки (delay
band)еквівалентного сигналу за часом
f=[fb fdb] %вектор граничних абсолютних частот
d1=0.01; %значення максимально допустимого відхилення АЧХ ФНЧ у смугі
пропуску (0,1dB)
d2=0.0001; %значення максимально допустимого відхилення АЧХ ФНЧ у смугі
затримки (80 dB)
ripple=[d1 d2]; %вектор максимально допустимих відхилень АЧХ ФНЧ

```

```

m=[1 0]; % вектор-стовпець значень ідеальної АЧХ ФНЧ на граничних частотах
вектору f
%-----
% Синтез фільтра КІХ-ФНЧ методом чебишевської апроксимації
[R,f0,m0]=firpmord(f,m,ripple,Fs); %Оцінка порядку R КІХ-фільтра для
функціїi firgr, обчислення параметрів f0, m0
disp ('-----');
disp ('Первісна оцінка порядку R КІХ-фільтра:');
R = R
disp ('Обчислення вектор-стовпця f0 нормованих частот f = f/(fs/2)в основній
смугі частот [0;1],');
disp ('що включає: ліву межу основної смуги частот f0 = 0; граничні частоти
СП і СЗ у порядку їх прямування зліва направо;');
disp ('праву межу основної полоси f0 = 1:');
f0 = f0
disp ('Вектор-стовпець m0 значень ідеальної АЧХ на частотах вектора f0:');
m0 = m0
[b1,err,opt]=firgr({'minorder',R},f0,m0,ripple); %розрахунок коефіцієнтів
фільтра КІХ-ФНЧ
disp ('-----');
disp ('Довжина вектору коефіцієнтів b1:');
h1 = length(b1) %довжина вектору коефіцієнтів b1
disp ('Розрахований порядок фільтра:');
N = opt.order %розрахований порядок фільтра
disp ('Максимальне відхилення АЧХ від ідеальної:');
error=max(abs(opt.error)) %максимальне відхилення АЧХ від ідеальної
[gd] = grpdelay(b1,[1]); %формування вектору групової затримки фільтра КІХ-
ФНЧ у нормованих відліках
disp ('-----');
disp ('Нормований відлік групової затримки фільтра КІХ-ФНЧ:');
grdilay = round(gd(1)) %ціле значення нормованого відліку групової затримки
фільтра КІХ-ФНЧ
fvtool(b1,[1]) %відображення характеристик фільтра у програмі GUI FVTool
%-----
% Зберігання даних в файлі fileFIR для програми initial_conditions
s4 = fopen('fileFIR','wb');
a1 = fwrite(s4,h1,'double');
a2 = fwrite(s4,b1,'double');
a3 = fwrite(s4,grdilay,'double');
fclose(s4);

```

Fminsearch_1R:

```

% Program for approximation of experimental experiments |Y|, 1 resonance,
method fminsearch
% Програма апроксимації експериментальних вимірювань |Y|, 1 резонанс, метод
fminsearch
tic % контроль часу виконання програми
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexpl
s1 = fopen('fileexpl','rb');
a = fread(s1,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s1,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s1,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');

```

```

rfact = fread(s1,1,'double')
Lfact = fread(s1,1,'double')
Cfact = fread(s1,1,'double')
C0fact = fread(s1,1,'double')
f0fact = fread(s1,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s1,1,'double') %нормована довжина вектору кутової частоти w -
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
[yabsexp,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
f10 = fread(s1,1,'double'); %частота вимірювання для розрахунку початкового
значення C0
yabsexp10 = fread(s1,1,'double'); %емпіричне значення модуля провідності на
частоті f10
fmaxexpn = fread(s1,1,'double'); %нормована частота максимуму вектору
емпіричних даних yabsexp
[yabsfact,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор фактичного модуля провідності
%-----
% Зчитування емпіричних даних з файлу fileFIR
s4 = fopen('fileFIR','rb');
h1 = fread(s4,1,'double'); %кількість коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
[b1,j] = fread(s4,h1,'double'); %вектор b1 коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
disp ('Нормований відлік групової затримки фільтра КІХ-ФНЧ:');
grdilay = fread(s4,1,'double') %нормований відлік групової затримки фільтра
КІХ-ФНЧ
disp ('-----
');
%-----
% Фільтрація емпіричних даних
yabsf = filter(b1,[1],yabsexp); %формування функції yabsf - фільтрація
yabsexp в КІХ-ФНЧ
%-----
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
k1 = 1:1:h; %вектор відліків нормованої частоти
yabsf1 = yabsf(k1)'; %початкове формування функції yabsf1
%-----
% Формування функції yabsf1 з відсіканням перехідного процесу ФНЧ для yabsf
n = 1;
while n <= 2*h1,
yabsf1(n) = 0;
n = n+1;
end
%-----
% Формування функції yabsf2 зі зсувом yabsf1 вліво на нормоване значення
групової затримки фільтра,
% тобто здійснення повної компенсації затримки yabsf по відношенню до yabsexp
yabsf2 = 0;
n = 1:1:(h-grdilay);
yabsf2(n)= yabsf1(n+grdilay);
n = (h-grdilay+1):1:h;
yabsf2(n)= yabsf2(h-grdilay);
%-----
% Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних кривих
figure(1);
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsf2,'r-',f,yabsfact,'k--') %побудування графіків
провідностей yabsexp,yabsfact, yabsf2
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X

```

```

ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпірична функція |Y(f)|', 'відфільтрована функція |Y(f)|', 'фактична функція |Y(f)|') %коментарі (легенда) на графіках
title('Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних кривих на ділянці послідовних резонансів') %найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000100]); %діапазон значень осі абсцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абсцис X
%-----
% Розрахунок початкових умов
yabsf2max = yabsf2(fmaxexpn); %максимальне значення резонансу на yabsf2
fr = f(fmaxexpn); %частота f резонансу
wr = w(fmaxexpn); %кутова частота w резонансу
r = 1/yabsf2max %опір контуру
p = yabsf2max/sqrt(2); %розрахунок значення yabsf2max*0.707
n = 1;
while (yabsf2(n)-p)<0,
n = n+1;
end;
kL = n; %нормована частота на рівні yabsf2max*0.707 на лівій частині контуру
fkL = f(n); %частота f на рівні yabsf2max*0.707 на лівій частині контуру
n = h;
while (yabsf2(n)-p)<0,
n = n-1;
end;
kR = n; %нормована частота на рівні yabsf2max*0.707 на правій частині контуру
fkR = f(n); %частота f на рівні yabsf2max*0.707 на правій частині контуру

raz = (fkR-fkL); %розрахунок смуги пропуску за рівнем yabsf2max*0.707
q = (fr/raz) %розрахунок значення добротності контуру q
L = q*r/wr %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C = 1/(wr*q*r) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%вхідна ємність ПКЕ C0
C0 = yabsexp10/(2*pi*f10) %розрахунок початкового значення вхідної ємності ПКЕ C0
%-----
disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів R,L,C від фактичних:');
deviation_r = abs((r/rfact)-1)*100
deviation_L = abs((L/Lfact)-1)*100
deviation_C = abs((C/Cfact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');
%-----
% Апроксимація/оптимізація методом найменших квадратів fminsearch
% Приведення змінних до нормованого значення
r = r*1; %нормоване значення r1
L = L*1e3; %нормоване значення L1
C = C*1e15; %нормоване значення C1
C0 = C0*1e12; %нормоване значення C0
VU = [r L C C0]; %вектор початкових нормованих значень
options=optimset('MaxFunEvals',100000,'MaxIter',100000,'TolX',1e-12,'TolFun',1e-10); %параметри оптимізації
[X,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] = fminsearch('Funfim_1R',VU,options,yabsexp',w');
%обчислення функції Funfim_1R
OUTPUT

```

```

disp ('-----');
disp ('вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при
апроксимації/оптимізації:');
r = X(1) %вихідне значення r
L = X(2)*1e-3 %вихідне значення L
C = X(3)*1e-15 %вихідне значення C
C0 = X(4)*1e-12 %вихідне значення C0
disp ('-----');
disp ('Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від
фактичних:');
deviation_r = abs((r/rfact)-1)*100
deviation_L = abs((L/Lfact)-1)*100
deviation_C = abs((C/Cfact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');

yabsapr = sqrt((r./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2+(w*C0-((w*L-
1./(w*C))./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2))).^2); %обчислення апроксимованої функції
yabsapr(w)

%-----
% Частоти послідовних резонансів
[yabsaprmax,fn] = findpeaks(yabsapr); %пошук екстремумів max yabsfact
disp ('-----');
disp ('Вихідне значення резонансної частоти:');
f0 = f(fn(1))
disp ('-----');
disp ('Відхилення у Гц вихідного значення резонансної частоти від фактичної:');
deviation_f0 = abs(f0-f0fact)
disp ('-----');

% графік на ділянці послідовних резонансів-----
figure(2);
%побудування графіків еміричних даних |Y(f)|, апроксимованої функції |Y(f)|,
фактичної функції |Y(f)|
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsapr,'b-',f,yabsfact,'k--
',f(kL),yabsapr(kL),'*r',f(kR),yabsapr(kR),'*r');
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('експеримент |Y(f)|','апроксимація |Y(f)|','фактичний |Y(f)|');
%коментарі(легенда) на графіках
title('Теоретична апроксимація та експеримент, method fminsearch')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000100]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
toc %контроль часу виконання програми

```

Funfim_1R:

```

% Creating an objective function for Fminsearch_1R
% Створення цільової функції для Fminsearch_1R
function opt = Funfim_1R(VU,yabsexp,w)
r = VU(1);
L = VU(2)*1e-3;
C = VU(3)*1e-15;

```

```

C0 = VU(4)*1e-12;
ot = (yabsexp-sqrt((r./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2+(w*C0-((w*L-1./(w*C))./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2))).^2)).^2;
opt = sum(ot,2);
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

Lsqnonlin_1R:

```

% Program for approximation of experimental experiments |Y|, 1 resonance,
method lsqnonlin
% Програма апроксимації експериментальних вимірювань |Y|, 1 резонанс, метод
lsqnonlin
tic % контроль часу виконання програми
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexpl
s1 = fopen('fileexpl','rb');
a = fread(s1,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s1,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s1,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');
rfact = fread(s1,1,'double')
Lfact = fread(s1,1,'double')
Cfact = fread(s1,1,'double')
C0fact = fread(s1,1,'double')
f0fact = fread(s1,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s1,1,'double') %нормована довжина вектору кутової частоти w -
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
[yabsexp,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
f10 = fread(s1,1,'double'); %частота вимірювання для розрахунку початкового
значення C0
yabsexp10 = fread(s1,1,'double'); %емпіричне значення модуля провідності на
частоті f10
fmaxexrn = fread(s1,1,'double'); %нормована частота максимуму вектору
емпіричних даних yabsexp
[yabsfact,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор фактичного модуля провідності
%-----
% Зчитування еміричних даних з файлу fileFIR
s4 = fopen('fileFIR','rb');
h1 = fread(s4,1,'double'); %кількість коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
[b1,j] = fread(s4,h1,'double'); %вектор b1 коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
disp ('Нормований відлік групової затримки фільтра КІХ-ФНЧ:');
grdilay = fread(s4,1,'double') %нормований відлік групової затримки фільтра
КІХ-ФНЧ
disp ('-----
');
%-----
% Фільтрація емпіричних даних
yabsf = filter(b1,[1],yabsexp); %формування функції yabsf - фільтрація
yabsexp в КІХ-ФНЧ
%-----

```

```

f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
k1 = 1:1:h; %вектор відліків нормованої частоти
yabsf1 = yabsf(k1)'; %початкове формування функції yabsf1
%-----
% Формування функції yabsf1 з відсіканням перехідного процесу ФНЧ для yabsf
n = 1;
while n <= 2*h1,
yabsf1(n) = 0;
n = n+1;
end
%-----
% Формування функції yabsf2 зі зсувом yabsf1 вліво на нормоване значення
групової затримки фільтра,
% тобто здійснення повної компенсації затримки yabsf по відношенню до yabsexp
yabsf2 = 0;
n = 1:(h-grdilay);
yabsf2(n)= yabsf1(n+grdilay);
n = (h-grdilay+1):1:h;
yabsf2(n)= yabsf2(h-grdilay);
%-----
% Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних кривих
figure(1);
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsf2,'r-',f,yabsfact,'k--') %побудування графіків
провідностей yabsexp,yabsfact, yabsf2
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('емпірична функція |Y(f)|','відфільтрована функція |Y(f)|','фактична
функція |Y(f)|') %коментарі (легенда) на графіках
title('Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних
кривих на ділянці послідовних резонансів') %найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([9999900,10000100]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
%-----
% Розрахунок початкових умов
yabsf2max = yabsf2(fmaxexpn); %максимальне значення резонансу на yabsf2
fr = f(fmaxexpn); %частота f резонансу
wr = w(fmaxexpn); %кутова частота w резонансу
r = 1/yabsf2max %опір контуру
p = yabsf2max/sqrt(2); %розрахунок значення yabsf2max*0.707
n = 1;
while (yabsf2(n)-p)<0,
n = n+1;
end;
kL = n; %нормована частота на рівні yabsf2max*0.707 на лівій частині контуру
fkL = f(n); %частота f на рівні yabsf2max*0.707 на лівій частині контуру
n = h;
while (yabsf2(n)-p)<0,
n = n-1;
end;
kR = n; %нормована частота на рівні yabsf2max*0.707 на правій частині контуру
fkR = f(n); %частота f на рівні yabsf2max*0.707 на правій частині контуру

raz = (fkR-fkL); %розрахунок смуги пропуску за рівнем yabsf2max*0.707
q = (fr/raz) %розрахунок значення добротності контуру q
L = q*r/wr %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C = 1/(wr*q*r) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%вхідна ємність ПКЕ C0
C0 = yabsexp10/(2*pi*f10) %розрахунок початкового значення вхідної ємності
ПКЕ C0

```

```

% -----
disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r = abs((r/rfact)-1)*100
deviation_L = abs((L/Lfact)-1)*100
deviation_C = abs((C/Cfact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');

%-----
% Апроксимація/оптимізація методом найменших квадратів lsqnonlin
% Приведення змінних до нормованого значення
r = r*1; %нормоване значення r1
L = L*1e3; %нормоване значення L1
C = C*1e15; %нормоване значення C1
C0 = C0*1e12; %нормоване значення C0
VU = [r L C C0]; %вектор початкових нормованих значень
options=optimset('MaxFunEvals',100000,'MaxIter',100000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-10); %параметри оптимізації
lb = [0 0 0 0]; % нижня границя значень вихідних даних X
ub = [1000 1000 1000 1000]; % верхня границя значень вихідних даних X
[X,RESNORM,RESIDUAL,EXITFLAG,OUTPUT]=
lsqnonlin('Funlsq_1R',VU,lb,ub,options,'yabsexp','w');%обчислення функції
Funlsq_1R
OUTPUT
disp ('-----');
disp ('вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при
апроксимації/оптимізації:');
r = X(1) %вихідне значення r
L = X(2)*1e-3 %вихідне значення L
C = X(3)*1e-15 %вихідне значення C
C0 = X(4)*1e-12 %вихідне значення C0
disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від
фактичних:');
deviation_r = abs((r/rfact)-1)*100
deviation_L = abs((L/Lfact)-1)*100
deviation_C = abs((C/Cfact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');

yabsapr = sqrt((r./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2+(w*C0-(w*L-
1./(w*C))./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2); %обчислення апроксимованої функції
yabsapr(w)

%-----
% Частоти послідовних резонансів
[yabsaprmax,fn] = findpeaks(yabsapr); %пошук екстремумів max yabsfact
disp ('-----');
disp ('Вихідне значення резонансної частоти:');
f0 = f(fn(1))
disp ('-----');
disp ('Відхилення у Гц вихідного значення резонансної частоти від фактичної:');

```

```

deviation_f0 = abs(f0-f0fact)
disp ('-----');
');

% графік на ділянці послідовних резонансів-----
figure(2);
% побудування графіків емпіричних даних |Y(f)|, апроксимованої функції |Y(f)|,
фактичної функції |Y(f)|
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsapr,'b-',f,yabsfact,'k--
',f(kL),yabsapr(kL),'*r',f(kR),yabsapr(kR),'*r');
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('експеримент |Y(f)|','апроксимація |Y(f)|','фактичний |Y(f)|');
%коментарі(легенда) на графіках
title('Теоретична апроксимація та експеримент, method lsqnonlin')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([99999900,10000100]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
toc %контроль часу виконання програми

```

Funlsq_1R:

```

% Creating an objective function for Lsqnonlin_1R
% Створення цільової функції для Lsqnonlin_1R
function opt = Funlsq_1R(VU,yabsexp,w)
r = VU(1);
L = VU(2)*1e-3;
C = VU(3)*1e-15;
C0 = VU(4)*1e-12;
opt = yabsexp-sqrt((r./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2)).^2+(w*C0-((w*L-
1./(w*C))./(r.^2+(w*L-1./(w*C)).^2))).^2);
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

ДОДАТОК Б

Лістинги програм для апроксимації двох-резонансних кривих

Experiment 2R_10MHz:

```

% Mathematical model of 2-resonance circuit experiments (f = 10 MGz)
% Математична модель експериментів 2-х резонансної схеми (f = 10 МГц)
%-----
% **** СТАРТОВЕ ВВЕДЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ КОНТУРІВ (f01 < f02)****
C0 = 10*1e-12; %введення значення вхідної ємності ПКЕ
f01 = 10*1e6; %введення значення центральної частоти 1-го контуру (нижня)
q1 = 1e4; %введення значення добротності 1-го контуру
r1 = 10; %введення значення активного опору 1-го контуру
f02 = 10.001000*1e6; %введення значення центральної частоти 2-го контуру
(верхня)
q2 = 1e4; %введення значення добротності 2-го контуру
r2 = 10; %введення значення активного опору 2-го контуру
step = 0.1; %введення значення кроку вимірювання, Гц
error = 10; %введення значення похибки вимірювання в %
%*****
%-----
% Розрахунок інтервалу вимірювання
qmin = min([q1,q2]); %визначення мінімального значення добротності
if 5*(f01/qmin)> 1000,
    deltaf01 = 5*(f01/qmin);
else
    deltaf01 = 1000;
end
if 5*(f02/qmin)> 1000,
    deltaf02 = 5*(f02/qmin);
else
    deltaf02 = 1000;
end
a = f01-deltaf01; %розрахунок значення fmin, Гц (початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = f02+deltaf02;; %розрахунок значення fmax, Гц (кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
%-----
% Розрахунок значень L1,C1,L2,C2
L1 = (q1*r1)/(2*pi*f01) %розрахунок індуктивності 1-го контуру L1
C1 = 1/((2*pi*f01)^2*L1) %розрахунок ємності 1-го контуру C1
L2 = (q2*r2)/(2*pi*f02) %розрахунок індуктивності 2-го контуру L2
C2 = 1/((2*pi*f02)^2*L2) %розрахунок ємності 2-го контуру C2
%-----
% Розрахунок верхньої частоти паралельного резонансу fpar
au = L1*L2*C1*C2;
bu = (L1*C1)+(L2*C2)+((L1+L2)*C1*C2/C0);
cu = 1+((C1+C2)/C0);
wpar = sqrt((bu+sqrt(bu^2-(4*au*cu)))/(2*au));
fpar = wpar/(2*pi)
%-----
% Коригування кінцевого значення частоти інтервалу вимірювання
% з урахуванням верхньої частоти паралельного резонансу fpar
if 0.9999*fpar > b,
    d1 = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*b; %розрахунок вектору першого піддіапазону
кутової частоти w

```

```

d2 = (2*pi*b)+step : 2*pi*step*10 : (2*pi*0.9999*fpar)-step; %розрахунок
вектору другого піддіапазону кутової частоти w
d3 = 2*pi*0.9999*fpar : 2*pi*step : 2*pi*1.0001*fpar; %розрахунок вектору
третього піддіапазону кутової частоти w
w = [d1,d2,d3]; %формування об'єднаного вектору інтервалу кутової частоти w
else
    if 1.0001*fpar > b,
        w = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*1.0001*fpar; %формування об'єднаного
вектору інтервалу кутової частоти w
    else
        w = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*b; %формування об'єднаного вектору
інтервалу кутової частоти w
    end
end
disp ('-----');
');
disp ('Кількість відліків на інтервалі вимірювання:');
h = length(w) %нормована довжина вектору кутової частоти w - кількість
відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----');
');
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Розрахунок фактичного та експериментального векторів модуля провідності
yabsfact = sqrt(((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+r2./(r2.^2+(w*L2-
1./(w*C2)).^2))).^2+(w*C0-((w*L1-1./(w*C1))./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))-
((w*L2-1./(w*C2))./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2); %обчислення фактичного
модуля провідності
pogr = (rand(1,length(yabsfact))-0.5)*2*(error/100); % формування вектору
похибки
yabsexp = yabsfact+(yabsfact.*pogr); %формування вектору емпіричних даних
%-----
% Графіки на ділянці послідовних резонансів
figure(1);
plot(f,yabsexp,'m-',f,yabsfact,'k-') %побудування графіків |Y(f)|
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абсцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпіричні вимірювання |Y(f)|','фактичні значення |Y(f)|')
%коментарі(легенда) на графіках
title('Вимірювання на ділянці послідовних резонансів') %найменування
заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([a,b]) %діапазон значень осі абсцис X
%-----
% Графіки на ділянці паралельного резонансу
figure(2);
plot(f,yabsexp,'m-',f,yabsfact,'k-') %побудування графіків |Y(f)|
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абсцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпіричні вимірювання |Y(f)|','фактичні значення |Y(f)|')
%коментарі(легенда) на графіках
title('Вимірювання на ділянці паралельного резонансу') %найменування
заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([0.9999*fpar,1.0001*fpar]) %діапазон значень осі абсцис X
%-----
-----
% Уточнення фактичних значень частот послідовних резонансів
[yabsfactmax,fn] = findpeaks(yabsfact); %пошук екстремумів max yabsfact
disp ('-----');
');
disp ('Кількість екстремумів max yabsfact:');
kmaxfact = length(yabsfactmax) % кількість екстремумів max yabsfact

```

```

if kmaxfact == 2,
    f01 = f(fn(1))
    f02 = f(fn(2))
else
    f01 = f(fn(1))
    f02 = 0
end
disp ('-----
');
% Графіки на ділянці послідовних резонансів
figure(3);
plot(f(fn),yabsfactmax,'ro',f,yabsfact,'k-') %побудування графіків |Y(f)|
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абсцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('екстремуми max yabsfact', 'фактичні значення |Y(f)|')
%коментарі(легенда) на графіках
title('Графік екстремумів max функції фактичної провідності yabsfact')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абсцис X
%-----
% Визначення максимуму вектору емпіричних даних yabsexp
maxyabsexp = max(yabsexp)
n = 1;
while yabsexp(n) ~= maxyabsexp,
    n = n+1;
end
fmaxexp = f(n)
%-----
%-----
% Розрахунок фактичного та експериментального значень модуля провідності
% на частоті f*10 для подальшого розрахунку значення вхідної ємності C0
f10 = fmaxexp*10 % частота вимірювання для розрахунку при оптимізації
початкового значення C0
w10 = 2*pi*f10; %перехід від f10 до кутової частоти w10
yabsfact10 = sqrt(((r1/((r1^2)+(w10*L1-(1/(w10*C1))))^2))+r2/((r2^2)+(w10*L2-
(1/(w10*C2))))^2))^2+(w10*C0-(((w10*L1)-(1/(w10*C1)))/((r1^2)+(w10*L1-
(1/(w10*C1))))^2))-(((w10*L2)-(1/(w10*C2)))/((r2^2)+(w10*L2-
(1/(w10*C2))))^2))^2) %обчислення фактичного модуля провідності для f*10
pogr10 = (rand-0.5)*2*(error/100); % формування значення похибки
yabsexp10 = yabsfact10+(yabsfact10*pogr10) %формування емпіричного значення
на частоті f10
%-----
%-----
% Зберігання еміричних та фактичних даних в файлі filelexp1 для програми
апроксимації
s1 = fopen('fileexp1','wb');
a1 = fwrite(s1,a,'double');
a2 = fwrite(s1,b,'double');
a3 = fwrite(s1,step,'double');
a4 = fwrite(s1,r1,'double');
a5 = fwrite(s1,L1,'double');
a6 = fwrite(s1,C1,'double');
a7 = fwrite(s1,r2,'double');
a8 = fwrite(s1,L2,'double');
a9 = fwrite(s1,C2,'double');
a10 = fwrite(s1,C0,'double');
a11 = fwrite(s1,f01,'double');
a12 = fwrite(s1,f02,'double');
a13 = fwrite(s1,h,'double');
a14 = fwrite(s1,yabsexp,'double');
a15 = fwrite(s1,w,'double');
a16 = fwrite(s1,yabsfact,'double');

```

```

fclose(s1);
%-----
% Зберігання еміричних даних в файлі filelexp2 для програми розрахунку ФНЧ
s2 = fopen('fileexp2','wb');
a1 = fwrite(s2,step,'double');
a2 = fwrite(s2,fmaxexp,'double');
fclose(s2);
%-----
% Зберігання еміричних та фактичних даних в файлі filelexp3 для програми
Initial_conditions_2R
s3 = fopen('fileexp3','wb');
a1 = fwrite(s3,a,'double');
a2 = fwrite(s3,b,'double');
a3 = fwrite(s3,step,'double');
a4 = fwrite(s3,r1,'double');
a5 = fwrite(s3,L1,'double');
a6 = fwrite(s3,C1,'double');
a7 = fwrite(s3,r2,'double');
a8 = fwrite(s3,L2,'double');
a9 = fwrite(s3,C2,'double');
a10 = fwrite(s3,C0,'double');
a11 = fwrite(s3,h,'double');
a12 = fwrite(s3,yabsexp,'double');
a13 = fwrite(s3,w,'double');
a14 = fwrite(s3,f10,'double');
a15 = fwrite(s3,yabsexp10,'double');
a16 = fwrite(s3,fmaxexp,'double');
a17 = fwrite(s3,yabsfact,'double');
fclose(s3);

```

Initial_conditions_2R:

```

% Calculation of initial conditions for the approximation program for a 2-
resonant circuit
% Розрахунок початкових умов для програми апроксимації 2-х резонансної кривої
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexp3
s3 = fopen('fileexp3','rb');
a = fread(s3,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s3,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s3,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');
r1fact = fread(s3,1,'double')
L1fact = fread(s3,1,'double')
C1fact = fread(s3,1,'double')
r2fact = fread(s3,1,'double')
L2fact = fread(s3,1,'double')
C2fact = fread(s3,1,'double')
C0fact = fread(s3,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти - кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s3,1,'double') %нормована довжина вектору інтервалу частоти-
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');

```

```

[yabsexp,i] = fread(s3,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s3,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
f10 = fread(s3,1,'double'); %частота вимірювання для розрахунку початкового
значення C0
yabsexp10 = fread(s3,1,'double'); %емпіричне значення модуля провідності на
частоті f10
fmaxexp = fread(s3,1,'double'); %частота максимуму вектору емпіричних даних
yabsexp
[yabsfact,i] = fread(s3,h,'double'); %вектор фактичного модуля провідності
%-----
% Зчитування емпіричних даних з файлу fileFIR
s4 = fopen('fileFIR','rb');
h1 = fread(s4,1,'double'); %кількість коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
[b1,j] = fread(s4,h1,'double'); %вектор b1 коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
disp ('Нормований відлік групової затримки фільтра КІХ-ФНЧ:');
grdilay = fread(s4,1,'double') %нормований відлік групової затримки фільтра
КІХ-ФНЧ
disp ('-----
');
%-----
% Фільтрація емпіричних даних
yabsf = filter(b1,[1],yabsexp); %формування функції yabsf - фільтрація
yabsexp в КІХ-ФНЧ
%-----
f = w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
k1 = 1:1:h; %вектор відліків нормованої частоти
yabsf1 = yabsf(k1)'; %початкове формування функції yabsf1
%-----
% Формування функції yabsf1 з відсіканням перехідного процесу ФНЧ для yabsf
n = 1;
while n <= 2*h1,
yabsf1(n) = 0;
n = n+1;
end
%-----
% Формування функції yabsf2 зі зсувом yabsf1 вліво на нормоване значення
групової затримки фільтра,
% тобто здійснення повної компенсації затримки yabsf по відношенню до yabsexp
yabsf2 = 0;
n = 1:1:(h-grdilay);
yabsf2(n) = yabsf1(n+grdilay);
n = (h-grdilay+1):1:h;
yabsf2(n) = yabsf2(h-grdilay);
%-----
% Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних кривих
figure(1);
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsf2,'r-',f,yabsfact,'k--') %побудування графіків
провідностей yabsexp,yabsfact, yabsf2
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпірична функція |Y(f)|','відфільтрована функція |Y(f)|','фактична
функція |Y(f)|') %коментарі (легенда) на графіках
title('Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних
кривих на ділянці послідовних резонансів') %найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000200]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
%*****
**
% Цикл розрахунку максимумів yabsf2(n)
kpor = 0.035; %початкове значення коефіцієнту порога для визначення зростання
або спадання yabs1 на фоні шуму пихибки

```

```

kcounter = 1; %коефіцієнт лічильника для виконання циклу
answer = 'y'; %початкове значення "yes" текстової змінної answer
while answer == 'y', %перевірка умови виконання циклу
%-----
% Кусково-лінійна апроксимація yabsf2 - формування апроксимованої функції
yabsf2LINE
yabsf2LINE = yabsf2(k1)'; %початкове формування апроксимованої функції
yabsf2LINE
m = round((fmaxexp/1e6)/(20*step)) %мінімальна кількість відліків при
знаходженні середнього значення yabsf2; m=round((f/Qmax)/(20*step))
n = ((2*h1)-grdilay)+1; %початкова нормована частота обробки після відсікання
перехідного процесу ФНЧ
ksign1 = 1; %початкове значення коефіцієнту сигнатури ksign1 попереднього
інтервалу усереднення
kstart = n; %початкове значення нормованої частоти kstart для циклу
yabsf2mean2 = yabsf2(n); %початкове значення середнього значення yabsf2 для
поточного інтервалу
while n <= h-m, %перевірка умови закінчення інтервалу нормованої частоти
n = kstart; %присвоєння значення нормованого відліку для циклу
deltaabs = 0; %початкове значення delta - abs різниця між попереднім та
поточним середніми значеннями yabsf2
deltapor = 1; %початкове значення deltapor - поріг для визначення зростання
або спадання yabs1 на фоні шуму пихибки
m1 = m; %початкове значення m1 - кількість відліків при знаходженні
середнього значення в циклі
yabsf2mean1 = yabsf2mean2; %початкове значення середнього значення yabsf2 для
попереднього інтервалу
while deltaabs < deltapor, %перевірка умови досягнення порогу при зміні
середнього значення yabsf2
    if n <= h-m1, %перевірка умови закінчення інтервалу нормованої частоти
        k2 = n:1:(n+m1);
        yabsf2mean2 = mean(yabsf2(k2)); %середнє значення yabsf2 на інтервалі k2
        delta = yabsf2mean2 - yabsf2mean1; %різниця середніх значень delta
        deltaabs = abs(delta); %модуль різниці середніх значень delta
        %-----
        %формування значення коефіцієнту сигнатури ksign2 поточного інтервалу
усереднення
        if delta >=0,
            ksign2 =1;
        else
            ksign2 =-1;
        end
        %-----
        deltapor = yabsf2mean2*kpor; %розрахунок порогу deltapor
        m2 = m1;
        m1 = m1+m;
    else
        %формування значень для завершення кусково-лінійної апроксимації yabs1
        deltaabs = 1e50; % умова для завершення циклу "while deltaabs <
deltapor"
        %згладжування необробленої частки yabsf2 для уникнення помилкових max
        k3 = (n+1):1:h;
        yabsf2LINE(k3) = yabsf2LINE(n);
        n = h;
    end
end
ksign = ksign2 - ksign1; %розрахунок коефіцієнту сигнатури ksign
ksign1 = ksign2; %присвоєння значення коефіцієнту сигнатури ksign1
попереднього інтервалу усереднення
kstart = n;
if n <= h-m2, %перевірка умови закінчення інтервалу нормованої частоти
    if ksign ~= -2, %перевірка умови екстремума max - зміна знаку
швидкості функції з зростання на спадання

```

```

%знак швидкості функції не змінено - лінійна апроксимація yabsf2 на
інтервалі від yabsf2mean1 до yabsf2mean2
%з продовженням лінійної апроксимації до найближчого max або min
значення yabsf2 в залежності
%від зростання/зменшення yabsf2
k4 = (n+1):1:(n+m2);
pogr(k4) = abs(yabsf2(k4) - yabsf2mean2);
pogrmin = min(pogr(k4));
k5 = n+1;
while pogr(k5) ~> pogrmin,
k5 = k5+1;
end
kstart = k5;
kxy = (yabsf2mean2 - yabsf2mean1)/(k5-n);
k6 = (n+1):1:k5;
yabsf2LINE(k6) = kxy*(k6-n) + yabsf2mean1; %кусково-лінійна
апроксимація yabsf2
if ksign2 == 1,
%зростання yabsf2 на поточному інтервалі
%продовженням лінійної апроксимації до найближчого max yabsf2
k7 = k5+1;
while k7 <= h & yabsf2(k7) > yabsf2(k7-1),
yabsf2mean2 = yabsf2(k7);
yabsf2LINE(k7) = yabsf2mean2;
kstart = k7;
k7 = k7+1;
end
else
%зменшення yabsf2 на поточному інтервалі
%продовженням лінійної апроксимації до найближчого min yabsf2
k8 = k5+1;
while k8 <= h & yabsf2(k8) < yabsf2(k8-1),
yabsf2mean2 = yabsf2(k8);
yabsf2LINE(k8) = yabsf2mean2;
kstart = k8;
k8 = k8+1;
end
end
else
%знак швидкості функції змінено з зростання на зменшення - ознака
екстремуму max
%пошук max значення yabsf2 на поточному інтервалі з призначенням
нового відліку від max
k9 = (n+1):1:(n+m2);
yabsf2max = max(yabsf2(k9));
k10 = n;
while yabsf2(k10) ~> yabsf2max,
k10 = k10+1;
end
kstart = k10;
kxy = (yabsf2max - yabsf2mean1)/(k10-n);
k11 = (n+1):1:k10;
yabsf2LINE(k11) = kxy*(k11-n) + yabsf2mean1; %кусково-лінійна
апроксимація yabsf2 перед max
ksign2 = -1;
yabsf2mean2 = yabsf2max;
end
else
break
end
end
if n < h,
%згладжування необробленої частки yabsf2 для уникнення помилкових max

```

```

    k12 = (n+1):1:h;
    yabsf2LINE(k12) = yabsf2LINE(n);
end
%завершення кусково-лінійної апроксимації yabsf2

%-----
% Пошук екстремумів max апроксимованої функції yabsf2LINE
yabsf2LINEMAX = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору
yabsf2LINEMAX
yabsf2LINEMAX1 = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору
yabsf2LINEMAX1
fn = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору fn
fn1 = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору fn1
[yabsf2LINEMAX,fn] = findpeaks(yabsf2LINE); %формування векторів значень max
yabsf2LINEMAX, та аргументу відліків нормованої частоти fn
disp ('-----
');
ymax = yabsf2LINEMAX %відображення на екрані вектору значень max
yabsf2LINEMAX
fmax = f(fn) %відображення на екрані вектору аргументу відліків ненормованої
частоти
disp ('Кількість максимумів на функції емпіричної резонансної кривої
дорівнює:');
kmax = length(yabsf2LINEMAX)
if kmax>2,
    disp ('Два найвищих максимума - використовуйте max2 для швидкого введення
значення відсікання нижчих екстремумів max:');
    max1 = max(ymax)
    n = 1;
    while ymax(n)~= max1,
        n = n+1;
    end
    fmax1 = fmax(n)
    ymax(n) = 0;
    max2 = max(ymax)
    n = 1;
    while ymax(n)~= max2,
        n = n+1;
    end
    fmax2 = fmax(n)
end
disp ('-----
');
% Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої-----
---
figure(2)
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsf2LINE,'r-',f(fn),yabsf2LINEMAX,'ko')
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абсцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('емпірична функція |Y(f)|','лінійно-апроксимована функція
|Y(f)|','максимуми |Y(f)|') %коментарі(легенда) на графіках
title('Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000200]); %діапазон значень осі абсцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абсцис X -----
if kcounter == 1, %перевірка значення коефіцієнта лічильника циклу - 1-й цикл
при kpor=0.035
yabsf2LINEMAX1 = yabsf2LINEMAX; %присвоєння значень вектору max yabsf2LINEMAX
вектору yabsf2LINEMAX1
fn1 = fn; %присвоєння значень вектору аргументу відліків нормованої частоти
fn вектору fn1
else %починаючи з 2-го циклу (kcounter > 1) - повторний пошук max

```

```

yabsf2LINEMAX1 = yabsf2LINEMAX; %присвоєння значень вектору max yabsf2LINEMAX
вектору yabsf2LINEMAX1
fn1 = fn; %присвоєння значень вектору аргументу відліків нормованої частоти
fn вектору fn1
if kmax > 2,
    yabsf2LINEMAX1 = 0; %обнулення(перетворення на скаляр) вектору
yabsf2LINEMAX1
    fn1 = 0; %обнулення(перетворення на скаляр) вектору fn1
    maxyabs = max(yabsf2LINEMAX);
disp ('Введіть значення модуля провідності для відсікання нижчих екстремумів
max');
disp ('-----');
yabscutoff = input ('yabscutoff =');
while yabscutoff >= maxyabs,
    disp ('Введено некоректне значення модуля провідності для відсікання
нижчих екстремумів max,');
    disp ('введіть значення модуля провідності для відсікання нижчих
екстремумів max');
    disp ('-----');
    yabscutoff = input ('yabscutoff =');
end
n = 1;
k13 = 1;
while n <= kmax,
    if yabsf2LINEMAX(n) > yabscutoff, % для max, розташованих вище лінії
відсікання
        yabsf2LINEMAX1(k13) = yabsf2LINEMAX(n); %присвоєння значень вектору
yabsf2LINEMAX1
        fn1(k13) = fn(n); %присвоєння значень вектору fn1
        k13 = k13+1;
    end
    n = n+1;
end
disp ('-----');
ymax = yabsf2LINEMAX1 %відображення на екрані вектору значень max
yabsf2LINEMAX1
fmax = f(fn1)' %відображення на екрані вектору аргументу відліків
ненормованої частоти
disp ('Кількість максимумів на функції емпіричної резонансної кривої
дорівнює:');
kmax = length(yabsf2LINEMAX1)
disp ('-----');
yabscutoff1(k1) = yabscutoff;
% Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої-----
---
figure(3)
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsf2LINE,'r-
',f(fn),yabsf2LINEMAX,'ko',f,yabscutoff1,'k-')
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпірична функція |Y(f)|', 'лінійно-апроксимована функція
|Y(f)|', 'максимуми |Y(f)|', 'лінія відсікання нижчих екстремумів max')
%коментарі(легенда) на графіках
title('Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([9999900,10000200]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X -----
end

```

```

end
%-----
kcounter = kcounter+1; %збільшення значення коефіцієнта лічильника циклу
%-----
% Перевірка умови виходу з циклу пошуку максимумів
if kmax == 1 | kmax == 2,
disp ('Кількість максимумів відповідає моделі двох-резонансної кривої,');
disp ('Якщо необхідно повторити пошук, введіть значення у(yes), інакше
натисніть "Enter"');
answer = input ('','s');
if answer == 'y',
disp ('Поточне значення коефіцієнту kpor:');
kpor
disp ('Введіть нове значення значення коефіцієнту порога');
kpor = input ('kpor =');
end
else
disp ('Кількість максимумів не відповідає моделі двох-резонансної кривої,');
disp ('необхідно повторити пошук');
answer = 'y';
disp ('Поточне значення коефіцієнту kpor:');
kpor
disp ('Введіть нове значення значення коефіцієнту порога');
kpor = input ('kpor =');
end
%-----
end
%завершення циклу розрахунку максимумів yabsf2(n)
disp ('-----
');

%*****
**
% Розрахунок початкових умов
% -----
if kmax ==1, % якщо знайдено 1 максимум
yabsmaxexp = max(yabsexp); %максимальне значення yabsexp
n = 1;
while yabsexp(n) ~= yabsmaxexp,
n = n+1;
end;
fr = f(n); %уточнена частота резонансу f, яка відповідає yabsmaxexp
yabsmax = yabsf2(n); %значення yabsf2 на частоті fr
wr = 2*pi*fr; %кутова частота резонансу w, яка відповідає fr
%контур 1-----
r1 = 2/yabsmax %опір контуру 1
p1 = yabsmax/sqrt(2); %розрахунок значення yabsmax*0.707
n = 1;
while (yabsf2(n)-p1)<0,
n = n+1;
end;
kL = n; %нормована частота на рівні yabsmax*0.707 на лівій частині контуру
1
fr1L = f(n); %частота f на рівні yabsmax*0.707 на лівій частині контуру 1
raz1 = 2*(fr-fr1L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем yabsmax*0.707
q1 = fr/raz1 %розрахунок значення добротності контуру q
L1 = q1*r1/wr %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C1 = 1/(wr*q1*r1) %розрахунок початкового значення ємності контуру C
%контур 2-----
r2 = r1 %опір контуру 2
p2 = p1; %значення yabsmax*0.707
n = h;
while (yabsf2(n)-p2)<0,

```

```

n = n-1;
end;
krR = n; %нормована частота на рівні yabsmax*0.707 на правій частині
контуру 2
fr2R = f(n); %частота f на рівні yabsmax*0.707 на правій частині контуру 2
raz2 = 2*(fr2R-fr); %розрахунок смуги пропуску за рівнем yabsmax*0.707
q2 = fr/raz2 %розрахунок значення добротності контуру q
L2 = q2*r2/wr %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C2 = 1/(wr*q2*r2) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%вхідна ємність ПКЕ C0
C0 = yabsexp10/(2*pi*f10) %розрахунок початкового значення вхідної ємності
ПКЕ C0
%-----
% Фіксація нормованих частот, які використовуються при знаходженні 2-х
максимумів
kr1R05 = 1;
kr2L05 = 1;
%-----

disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');

% -----
else % якщо знайдено 2 максимуми
n = fn1(1):1:fn1(2); %вектор інтервалу нормованої частоти між 1-м та 2-м
резонансами
yabsminexp1 = min(yabsexp(n)); %мінімальне значення yabsexp між 1-м та 2-м
резонансами
n = fn1(1);
while yabsexp(n) ~= yabsminexp1,
n = n+1;
end;
frmin1 = f(n); %частота, що відповідає yabsminexp1
wmin1 = 2*pi*frmin1;
krmin1 = n; %нормована частота, що відповідає yabsmin1
yabsmin1 = yabsf2(n); %значення yabsf2 на частоті frmin1

disp ('-----');
disp ('Уточнені значення максимумів 1-го та 2-го резонансів,');
n = 1:1:krmin1;
yabsmaxexp1 = max(yabsexp(n)); %максимальне значення 1-го резонансу на
yabsexp
n = 1;
while yabsexp(n) ~= yabsmaxexp1,
n = n+1;
end;
fr1 = f(n) %уточнена частота 1-го резонансу f, яка відповідає yabsmaxexp1

```

```

krmax1 = n; %нормована частота, що відповідає yabsmax1
wr1 = 2*pi*fr1; %кутова частота 1-го резонансу w, яка відповідає fr1
yabsmax1 = yabsf2(n) %значення yabsf2 на частоті fr1

n = krmin1:1:h;
yabsmaxexp2 = max(yabsexp(n)); %максимальне значення 2-го резонансу на
yabsexp
n = 1;
while yabsexp(n) ~= yabsmaxexp2,
    n = n+1;
end;
fr2 = f(n) %уточнена частота 2-го резонансу f, яка відповідає yabsmaxexp2
krmax2 = n; %нормована частота, що відповідає yabsmax2
wr2 = 2*pi*fr2; %кутова частота 2-го резонансу w, яка відповідає fr2
yabsmax2 = yabsf2(n) %значення yabsf2 на частоті fr2
disp ('-----');
----');

%контур 1-----
%значення yabsmax1 з урахуванням коригуючого коефіцієнта - враховують
взаємовплив між контурами:
y1 = yabsmax1/(1+(((fr2-frmin1)/(fr2-
fr1))^2)*(yabsmin1/yabsmax1)*(yabsmax2/sqrt(yabsmax1*yabsmax2))));
r1 = 1/y1 %опір контуру 1
p1 = yabsmax1/sqrt(2); %розрахунок значення yabsmax1*0.707
n = 1;
while (yabsf2(n)-p1)<0,
    n = n+1;
end;
kL = n; %нормована частота на рівні yabsmax1*0.707 на лівій частині
контуру 1
fr1L = f(n); %частота f на рівні yabsmax1*0.707 на лівій частині контуру 1
wr1L = 2*pi*fr1L; %кутова частота w на рівні yabsmax1*0.707 на лівій
частині контуру 1
yabswr1L = yabsf2(n); %значення yabsf2 на частоті fr1L
raz1 = 2*(fr1-fr1L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем yabsmax1*0.707
%розрахунок добротності контуру з урахуванням коригуючого коефіцієнта -
враховують взаємовплив між контурами:
q1 = (fr1/raz1)*(1+(((fr2-frmin1)/(fr2-
fr1))*(yabsmin1/yabsmax1)*(yabsmax2/sqrt(yabsmax1*yabsmax2)))^2)
L1 = q1*r1/wr1 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C1 = 1/(wr1*q1*r1) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%контур 2-----
%значення yabsmax2 з урахуванням коригуючого коефіцієнта - враховують
взаємовплив між контурами:
y2 = yabsmax2/(1+(((frmin1-fr1)/(fr2-
fr1))^2)*(yabsmin1/yabsmax2)*(yabsmax1/sqrt(yabsmax1*yabsmax2))));
r2 = 1/y2 %опір контуру 2
p2 = yabsmax2/sqrt(2); %розрахунок значення yabsmax2*0.707
n = h;
while (yabsf2(n)-p2)<0,
    n = n-1;
end;
kR = n; %нормована частота на рівні yabsmax2*0.707 на правій частині
контуру 2
fr2R = f(n); %частота f на рівні yabsmax2*0.707 на правій частині контуру
2
wr2R = 2*pi*fr2R; %кутова частота w на рівні yabsmax2*0.707 на правій
частині контуру 2
yabswr2R = yabsf2(n); %значення yabsf2 на частоті fr2R
raz2 = 2*(fr2R-fr2); %розрахунок смуги пропуску за рівнем yabsmax2*0.707

```

```

%розрахунок добротності контуру з урахуванням коригуючого коефіцієнта -
враховують взаєм вплив між контурами:
q2 = (fr2/raz2)*(1+(((frmin1-fr1)/(fr2-
fr1))*(yabsmin1/yabsmax2)*(yabsmax1/sqrt(yabsmax1*yabsmax2))))^2)
L2 = q2*r2/wr2 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C2 = 1/(wr2*q2*r2) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%розрахунок додаткових точок для уточнення початкових умов-----
-
p3 = (yabsmax1 + yabsmin1)/2; %розрахунок значення (yabsmax1 + yabsmin1)/2
n = krmax1;
while (yabsf2(n)-p3)>0,
n = n+1;
end;
fr1R05 = f(n); %частота f на рівні (yabsmax1 + yabsmin1)*0.5 на правій
частині контуру 1
kr1R05 = n; %нормована частота на рівні (yabsmax1 + yabsmin1)*0.5 на
правій частині контуру 1
wr1R05 = 2*pi*fr1R05; %кутова частота w на рівні (yabsmax1 + yabsmin1)*0.5
на правій частині контуру 1
yabswr1R05 = yabsf2(n);

p4 = (yabsmax2 + yabsmin1)/2; %розрахунок значення (yabsmax2 + yabsmin1)/2
n = krmin1;
while (yabsf2(n)-p4)<0,
n = n+1;
end;
fr2L05 = f(n); %частота f на рівні (yabsmax2 + yabsmin1)*0.5 на лівій
частині контуру 2
kr2L05 = n; %нормована частота на рівні (yabsmax2 + yabsmin1)*0.5 на лівій
частині контуру 2
wr2L05 = 2*pi*fr2L05; %кутова частота w на рівні (yabsmax2 + yabsmin1)*0.5
на лівій частині контуру 2
yabswr2L05 = yabsf2(n);

%вхідна ємність ПКЕ c0
C0 = yabsexp10/(2*pi*f10) %розрахунок початкового значення вхідної ємності
ПКЕ C0
%-----
-----

disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');
-----

% Приведення змінних до нормованого значення
r1 = r1*1; %нормоване значення r1
L1 = L1*1e3; %нормоване значення L1
C1 = C1*1e15; %нормоване значення C1
r2 = r2*1; %нормоване значення r2
L2 = L2*1e3; %нормоване значення L2
C2 = C2*1e15; %нормоване значення C2

```

```

VP = [r1 L1 C1 r2 L2 C2]; %вектор початкових нормованих значень
[VU] = Clarification_2R
(wr1,yabsmax1,wr2,yabsmax2,wmin1,yabsmin1,wr1L,yabswr1L,wr2R,yabswr2R,wr1R05,
yabswr1R05,wr2L05,yabswr2L05,C0,VP);
disp ('-----');
disp ('-----');
disp ('уточнені початкові значення параметрів R,L,C двох контурів:');
r1 = VU(1) %уточнене початкове значення r1
L1 = VU(2) %уточнене початкове значення L1
C1 = VU(3) %уточнене початкове значення c1
r2 = VU(4) %уточнене початкове значення r2
L2 = VU(5) %уточнене початкове значення L2
C2 = VU(6) %уточнене початкове значення c2
disp ('-----');
disp ('-----');

disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');
disp ('-----');
end;
%-----
%-----
% Зберігання початкових умов для програми апроксимації 2-х резонансної кривої
s5 = fopen('initcondit','wb');
a1 = fwrite(s5,r1,'double');
a2 = fwrite(s5,L1,'double');
a3 = fwrite(s5,C1,'double');
a4 = fwrite(s5,r2,'double');
a5 = fwrite(s5,L2,'double');
a6 = fwrite(s5,C2,'double');
a7 = fwrite(s5,C0,'double');
a8 = fwrite(s5,kL,'double');
a9 = fwrite(s5,kR,'double');
a10 = fwrite(s5,kr1R05,'double');
a11 = fwrite(s5,kr2L05,'double');
fclose(s5);
%-----
%-----

```

Clarification_2R:

```

% Calculation of the vector of refined initial values VU = [r1 L1 c1 r2 L2
c2]
% Розрахунок вектору уточнених початкових значень VU = [r1 L1 c1 r2 L2 c2]
function [VU] = Clarification_2R
(wr1,yabsmax1,wr2,yabsmax2,wmin1,yabsmin1,wr1L,yabswr1L,wr2R,yabswr2R,wr1R05,
yabswr1R05,wr2L05,yabswr2L05,C0,VP)
n = 1:1:6;
V = VP(n);
options=optimset('MaxFunEvals',5000000,'MaxIter',5000000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-12);
[x fval exitflag OUTPUT] =
fsolve('Sysequat_2R',V,options,wr1,yabsmax1,wr2,yabsmax2,wmin1,yabsmin1,wr1L,
yabswr1L,wr2R,yabswr2R,wr1R05,yabswr1R05,wr2L05,yabswr2L05,C0);
OUTPUT

```

```

r1 = x(1); %вихідне значення r1
L1 = x(2)*1e-3; %вихідне значення L1
C1 = x(3)*1e-15; %вихідне значення c1
r2 = x(4); %вихідне значення r2
L2 = x(5)*1e-3; %вихідне значення L2
C2 = x(6)*1e-15; %вихідне значення c2
VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Sysequat_2R:

```

% System of equations for specification of initial conditions 2R
% Система рівнянь для уточнення початкових умов 2R
function
[z]=Sysequat_2R(x,wr1,yabsmax1,wr2,yabsmax2,wmin1,yabsmin1,wr1L,yabswr1L,wr2R
,yabswr2R,wr1R05,yabswr1R05,wr2L05,yabswr2L05,C0)
z(1) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wr1*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wr1*(x(5)*1e-3)-(1/(wr1*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wr1*C0-(((wr1*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wr1*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wr1*(x(5)*1e-3)-(1/(wr1*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wr1*(x(5)*1e-3)-
(1/(wr1*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabsmax1;
z(2) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wr2*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wr2*(x(5)*1e-3)-(1/(wr2*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wr2*C0-(((wr2*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wr2*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wr2*(x(5)*1e-3)-(1/(wr2*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wr2*(x(5)*1e-3)-
(1/(wr2*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabsmax2;
z(3) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wmin1*(x(2)*1e-3)-(1/(wmin1*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wmin1*(x(5)*1e-3)-(1/(wmin1*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wmin1*C0-(((wmin1*(x(2)*1e-3)-(1/(wmin1*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wmin1*(x(2)*1e-3)-(1/(wmin1*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wmin1*(x(5)*1e-3)-(1/(wmin1*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wmin1*(x(5)*1e-3)-
(1/(wmin1*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabsmin1;
z(4) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wr1L*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1L*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wr1L*(x(5)*1e-3)-(1/(wr1L*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wr1L*C0-(((wr1L*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1L*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wr1L*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1L*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wr1L*(x(5)*1e-3)-(1/(wr1L*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wr1L*(x(5)*1e-3)-
(1/(wr1L*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabswr1L;
z(5) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wr2R*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2R*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wr2R*(x(5)*1e-3)-(1/(wr2R*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wr2R*C0-(((wr2R*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2R*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wr2R*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2R*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wr2R*(x(5)*1e-3)-(1/(wr2R*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wr2R*(x(5)*1e-3)-
(1/(wr2R*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabswr2R;
z(6) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wr1R05*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1R05*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wr1R05*(x(5)*1e-3)-(1/(wr1R05*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wr1R05*C0-(((wr1R05*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1R05*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wr1R05*(x(2)*1e-3)-(1/(wr1R05*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wr1R05*(x(5)*1e-3)-(1/(wr1R05*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wr1R05*(x(5)*1e-
3)-(1/(wr1R05*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabswr1R05;
z(7) = sqrt(((x(1)/((x(1)^2)+(wr2L05*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2L05*(x(3)*1e-
15))))^2))+(x(4)/((x(4)^2)+(wr2L05*(x(5)*1e-3)-(1/(wr2L05*(x(6)*1e-
15))))^2)))^2+(wr2L05*C0-(((wr2L05*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2L05*(x(3)*1e-
15))))/((x(1)^2)+(wr2L05*(x(2)*1e-3)-(1/(wr2L05*(x(3)*1e-15))))^2))-
(((wr2L05*(x(5)*1e-3)-(1/(wr2L05*(x(6)*1e-15))))/((x(4)^2)+(wr2L05*(x(5)*1e-
3)-(1/(wr2L05*(x(6)*1e-15))))^2)))^2)-yabswr2L05;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Fminsearch_2R:

```

% Program for approximation of experimental experiments |Y|, 2 resonances,
method fminsearch
% Програма апроксимації експериментальних вимірювань |Y|, 2 резонанси, метод
fminsearch
tic % контроль часу виконання програми
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexpl
s1 = fopen('fileexpl','rb');
a = fread(s1,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s1,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s1,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');
r1fact = fread(s1,1,'double')
L1fact = fread(s1,1,'double')
C1fact = fread(s1,1,'double')
r2fact = fread(s1,1,'double')
L2fact = fread(s1,1,'double')
C2fact = fread(s1,1,'double')
C0fact = fread(s1,1,'double')
f01fact = fread(s1,1,'double')
f02fact = fread(s1,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s1,1,'double') %нормована довжина вектору кутової частоти w -
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
[yabsexp,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
[yabsfact,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор фактичного модуля провідності
%-----
% Зчитування початкових умов з файлу initcondit
s5 = fopen('initcondit','rb');
r1 = fread(s5,1,'double');
L1 = fread(s5,1,'double');
C1 = fread(s5,1,'double');
r2 = fread(s5,1,'double');
L2 = fread(s5,1,'double');
C2 = fread(s5,1,'double');
C0 = fread(s5,1,'double');
kL = fread(s5,1,'double');
kR = fread(s5,1,'double');
kr1R05 = fread(s5,1,'double');
kr2L05 = fread(s5,1,'double');
%-----
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Апроксимація/оптимізація методом найменших квадратів fminsearch
% Приведення змінних до нормованого значення
r1 = r1*1; %нормоване значення r1
L1 = L1*1e3; %нормоване значення L1
C1 = C1*1e15; %нормоване значення C1
r2 = r2*1; %нормоване значення r2
L2 = L2*1e3; %нормоване значення L2
C2 = C2*1e15; %нормоване значення C2
C0 = C0*1e12; %нормоване значення C0

```

```

VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 C0]; %вектор початкових нормованих значень
options=optimset('MaxFunEvals',200000,'MaxIter',200000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-10); %параметри оптимізації
[X,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] = fminsearch('Funfim_2R',VU,options,yabsexp',w');
%обчислення функції Funfim_2R
OUTPUT
disp ('-----');
disp ('вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при
апроксимації/оптимізації:');
C0 = X(7)*1e-12 %вихідне значення C0
r1 = X(1) %вихідне значення r1
L1p = X(2)*1e-3; %вихідне значення L1
C1p = X(3)*1e-15; %вихідне значення C1
r2 = X(4) %вихідне значення r2
L2p = X(5)*1e-3; %вихідне значення L2
C2p = X(6)*1e-15; %вихідне значення C2

if L1p*C1p >= L2p*C2p, % перевірка послідовності розташування резонансів по
осі частот
    L1 = L1p
    L2 = L2p
    C1 = C1p
    C2 = C2p
else
    L1 = L2p
    L2 = L1p
    C1 = C2p
    C2 = C1p
end

disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від
фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----');

yabsapr = sqrt(((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+r2./(r2.^2+(w*L2-
1./(w*C2)).^2))).^2+(w*C0-((w*L1-1./(w*C1))./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))-
((w*L2-1./(w*C2))./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2); %обчислення
апроксимованої функції yabsapr(w)

%-----
% Частоти послідовних резонансів
[yabsaprmax,fn] = findpeaks(yabsapr); %пошук екстремумів max yabsfact
disp ('-----');
disp ('Вихідні значення резонансних частот:');
kmaxyabsapr = length(yabsaprmax); % кількість екстремумів max yabsapr
if kmaxyabsapr == 2,
    f01 = f(fn(1))
    f02 = f(fn(2))
else

```

```

disp ('-----');
disp ('Увага, апроксимована крива має один резонанс:');
f01 = f(fn(1))
f02 = 0
end
disp ('-----');
disp ('Відхилення у Гц вихідних значень резонансних частот від фактичних:');
deviation_f01 = abs(f01-f01fact)
deviation_f02 = abs(f02-f02fact)
disp ('-----');

% графік на ділянці послідовних резонансів-----
figure(1);
%побудування графіків еміричних даних |Y(f)|, апроксимованої функції |Y(f)|,
фактичної функції |Y(f)|
plot(f,yabsexp,'g-',f,yabsapr,'b-',f,yabsfact,'k--
',f(kL),yabsapr(kL),'*r',f(kR),yabsapr(kR),'*r',f(kr1R05),yabsapr(kr1R05),'*r
',f(kr2L05),yabsapr(kr2L05),'*r');
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('експеримент |Y(f)|', 'апроксимація |Y(f)|', 'фактичний |Y(f)|');
%коментарі (легенда) на графіках
title('Теоретична апроксимація та експеримент, method fminsearch')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000200]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
toc %контроль часу виконання програми

```

Funfim_2R:

```

% Creating an objective function for Fminsearch_2R
% Створення цільової функції для Fminsearch_2R
function opt = Funfim_2R(VU,yabsexp,w)
r1 = VU(1);
L1 = VU(2)*1e-3;
C1 = VU(3)*1e-15;
r2 = VU(4);
L2 = VU(5)*1e-3;
C2 = VU(6)*1e-15;
C0 = VU(7)*1e-12;
ot = (yabsexp-sqrt(((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+
(r2./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2+(w*C0-
((w*L1-1./(w*C1))./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))-
((w*L2-1./(w*C2))./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2)).^2;
opt = sum(ot,2);
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

Lsqnonlin_2R:

```

% Program for approximation of experimental experiments |Y|, 2 resonances,
method lsqnonlin
% Програма апроксимації експериментальних вимірювань |Y|, 2 резонанси, метод
lsqnonlin
tic % контроль часу виконання програми
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexpl

```

```

s1 = fopen('fileexpl','rb');
a = fread(s1,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s1,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s1,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');
r1fact = fread(s1,1,'double')
L1fact = fread(s1,1,'double')
C1fact = fread(s1,1,'double')
r2fact = fread(s1,1,'double')
L2fact = fread(s1,1,'double')
C2fact = fread(s1,1,'double')
C0fact = fread(s1,1,'double')
f01fact = fread(s1,1,'double')
f02fact = fread(s1,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s1,1,'double') %нормована довжина вектору кутової частоти w -
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
[yabsexp,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
[yabsfact,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор фактичного модуля провідності
%-----
% Зчитування початкових умов з файлу initcondit
s5 = fopen('initcondit','rb');
r1 = fread(s5,1,'double');
L1 = fread(s5,1,'double');
C1 = fread(s5,1,'double');
r2 = fread(s5,1,'double');
L2 = fread(s5,1,'double');
C2 = fread(s5,1,'double');
C0 = fread(s5,1,'double');
kL = fread(s5,1,'double');
kR = fread(s5,1,'double');
kr1R05 = fread(s5,1,'double');
kr2L05 = fread(s5,1,'double');
%-----
f = w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Апроксимація/оптимізація методом найменших квадратів lsqnonlin
% Приведення змінних до нормованого значення
r1 = r1*1; %нормоване значення r1
L1 = L1*1e3; %нормоване значення L1
C1 = C1*1e15; %нормоване значення C1
r2 = r2*1; %нормоване значення r2
L2 = L2*1e3; %нормоване значення L2
C2 = C2*1e15; %нормоване значення C2
C0 = C0*1e12; %нормоване значення C0
VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 C0]; %вектор початкових нормованих значень
options=optimset('MaxFunEvals',200000,'MaxIter',200000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-10); %параметри оптимізації
lb = [0 0 0 0 0 0 0]; % нижня границя значень вихідних даних X
ub = [1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000]; % верхня границя значень вихідних
даних X

```

```

[X, RESNORM, RESIDUAL, EXITFLAG, OUTPUT]=
lsqnonlin('Funlsq_2R',VU,lb,ub,options,yabsexp',w');%обчислення функції
Funlsq_2R
OUTPUT
disp ('-----
-----');
disp ('вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при
апроксимації/оптимізації:');
C0 = X(7)*1e-12 %вихідне значення C0
r1 = X(1) %вихідне значення r1
L1p = X(2)*1e-3; %вихідне значення L1
C1p = X(3)*1e-15; %вихідне значення C1
r2 = X(4) %вихідне значення r2
L2p = X(5)*1e-3; %вихідне значення L2
C2p = X(6)*1e-15; %вихідне значення C2

if L1p*C1p >= L2p*C2p, % перевірка послідовності розташування резонансів по
осі частот
    L1 = L1p
    L2 = L2p
    C1 = C1p
    C2 = C2p
else
    L1 = L2p
    L2 = L1p
    C1 = C2p
    C2 = C1p
end

disp ('-----
-----');
disp ('відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від
фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_C0 = abs((C0/C0fact)-1)*100
disp ('-----
-----');
yabsapr = sqrt(((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+r2./(r2.^2+(w*L2-
1./(w*C2)).^2))).^2+(w*C0-((w*L1-1./(w*C1))./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))-
((w*L2-1./(w*C2))./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2); %обчислення
апроксимованої функції yabsapr(w)

%-----
% Частоти послідовних резонансів
[yabsaprmax,fn] = findpeaks(yabsapr); %пошук екстремумів max yabsfact
disp ('-----
-----');
disp ('Вихідні значення резонансних частот:');
kmaxyabsapr = length(yabsaprmax); % кількість екстремумів max yabsapr
if kmaxyabsapr == 2,
    f01 = f(fn(1))
    f02 = f(fn(2))
else
    disp ('-----
-----');
    disp ('Увага, апроксимована крива має один резонанс:');

```

```

    f01 = f(fn(1))
    f02 = 0
end
disp ('-----');
disp ('Відхилення у Гц вихідних значень резонасних частот від фактичних:');
deviation_f01 = abs(f01-f01fact)
deviation_f02 = abs(f02-f02fact)
disp ('-----');
');

% графік на ділянці послідовних резонансів-----
figure(1);
% побудування графіків еміричних даних |Y(f)|, апроксимованої функції |Y(f)|,
% фактичної функції |Y(f)|
plot(f, yabsexp, 'g-', f, yabsapr, 'b-', f, yabsfact, 'k--',
     f(kL), yabsapr(kL), '*r', f(kR), yabsapr(kR), '*r', f(kr1R05), yabsapr(kr1R05), '*r',
     f(kr2L05), yabsapr(kr2L05), '*r');
xlabel('f, (Гц)'); % найменування осі абцис X
ylabel('|Y(f)|, (См)'); % найменування осі ординат Y
legend('експеримент |Y(f)|', 'апроксимація |Y(f)|', 'фактичний |Y(f)|');
% коментарі (легенда) на графіках
title('Теоретична апроксимація та експеримент, method lsqnonlin')
% найменування заголовку графіків
grid on % включення координатної сітки на графіках
xlim([9999900, 10000200]); % діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a, b]); % діапазон значень осі абцис X
toc % контроль часу виконання програми

```

Funlsq_2R:

```

% Creating an objective function for Lsqnonlin_2R
% Створення цільової функції для Lsqnonlin_2R
function opt = Funlsq_2R(VU, yabsexp, w)
r1 = VU(1);
L1 = VU(2)*1e-3;
C1 = VU(3)*1e-15;
r2 = VU(4);
L2 = VU(5)*1e-3;
C2 = VU(6)*1e-15;
C0 = VU(7)*1e-12;
opt = yabsexp-sqrt(((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+
(r2./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2+(w*C0-((w*L1-1./(w*C1))./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))-
((w*L2-1./(w*C2))./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))).^2);
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

ДОДАТОК В

Лістинги програм для апроксимації трьох-резонансних кривих

Experiment 3R_10MHz:

```

% Mathematical model of 3-resonance circuit experiments (f = 10 MGz)
% Математична модель експериментів 3-х резонансної схеми (f = 10 МГц)
%-----
% **** СТАРТОВЕ ВВЕДЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ КОНТУРІВ (f01 < f02 < f03)****
f01 = 10*1e6; %введення значення центральної частоти 1-го контуру (нижня)
q1 = 1e5; %введення значення добротності 1-го контуру
r1 = 10; %введення значення активного опору 1-го контуру
f02 = 10.000100*1e6; %введення значення центральної частоти 2-го контуру
(середня)
q2 = 1e5; %введення значення добротності 2-го контуру
r2 = 15; %введення значення активного опору 2-го контуру
f03 = 10.000200*1e6; %введення значення центральної частоти 3-го контуру
(верхня)
q3 = 1e5; %введення значення добротності 3-го контуру
r3 = 15; %введення значення активного опору 3-го контуру
step = 0.1; %введення значення кроку вимірювання, Гц
error = 10; %введення значення похибки вимірювання в %
%*****
%-----
% Розрахунок інтервалу вимірювання
qmin = min([q1,q2,q3]); %визначення мінімального значення добротності
if 5*(f01/qmin)> 2000,
    deltaf01 = 5*(f01/qmin);
else
    deltaf01 = 2000;
end
if 5*(f03/qmin)> 2000,
    deltaf03 = 5*(f03/qmin);
else
    deltaf03 = 2000;
end
a = f01-deltaf01; %розрахунок значення fmin, Гц (початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = f03+deltaf03;; %розрахунок значення fmax, Гц (кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
%-----
% Розрахунок значень L1,C1,L2,C2,L3,C3
L1 = (q1*r1)/(2*pi*f01) %розрахунок індуктивності 1-го контуру L1
C1 = 1/((2*pi*f01)^2*L1) %розрахунок ємності 1-го контуру C1
L2 = (q2*r2)/(2*pi*f02) %розрахунок індуктивності 2-го контуру L2
C2 = 1/((2*pi*f02)^2*L2) %розрахунок ємності 2-го контуру C2
L3 = (q3*r3)/(2*pi*f03) %розрахунок індуктивності 3-го контуру L3
C3 = 1/((2*pi*f03)^2*L3) %розрахунок ємності 3-го контуру C3
%-----
w = 2*pi*a : 2*pi*step : 2*pi*b; %формування вектору кутової частоти w
disp ('-----');
');
disp ('Кількість відліків на інтервалі вимірювання:');
h = length(w) %нормована довжина вектору кутової частоти w - кількість
відліків на інтервалі вимірювання

```

```

disp ('-----
');
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Розрахунок фактичного та експериментального векторів активної складової
провідності
gfact = (r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+r2./(r2.^2+(w*L2-
1./(w*C2)).^2))+r3./(r3.^2+(w*L3-1./(w*C3)).^2)); %обчислення активної
складової провідності
pogr = (rand(1,length(gfact))-0.5)*2*(error/100); % формування вектору
похибки
gexр = gfact+(gfact.*pogr); %формування вектору емпіричних даних
%-----
% Графіки на ділянці послідовного резонансу
figure(1);
plot(f,gexр,'m-',f,gfact,'k-') %побудування графіків G(f)
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпіричні вимірювання G(f)', 'фактичні значення G(f)')
%коментарі (легенда) на графіках
title('Вимірювання на ділянці послідовних резонансів') %найменування
заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([a,b]) %діапазон значень осі абцис X
%-----
% Уточнення фактичних значень частот послідовних резонансів
[gfactmax,fn] = findpeaks(gfact); %пошук екстремумів max gfact
disp ('-----
');
disp ('Кількість екстремумів max gfact:');
kmaxfact = length(gfactmax) % кількість екстремумів max gfactmax
if kmaxfact == 3,
    f01 = f(fn(1))
    f02 = f(fn(2))
    f03 = f(fn(3))
else
    if kmaxfact == 2,
        f01 = f(fn(1))
        f02 = f(fn(2))
        f03 = 0
    else
        f01 = f(fn(1))
        f02 = 0
        f03 = 0
    end
end
end
disp ('-----
');
% Графіки на ділянці послідовного резонансу
figure(2);
plot(f(fn),gfactmax,'ro',f,gfact,'k-') %побудування графіків G(f)
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('екстремуми max gfact', 'фактичні значення G(f)') %коментарі (легенда)
на графіках
title('Графік екстремумів max функції фактичної активної провідності gfact')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
%-----
% Визначення максимуму вектору емпіричних даних gexр
maxgexр = max(gexр)

```

```

n = 1;
while gexp(n) ~= maxgexp,
    n = n+1;
end
fmaxexp = f(n)
%-----
-----
% Зберігання еміричних та фактичних даних в файлі filelexp1 для програми
апроксимації
s1 = fopen('fileexp1','wb');
a1 = fwrite(s1,a,'double');
a2 = fwrite(s1,b,'double');
a3 = fwrite(s1,step,'double');
a4 = fwrite(s1,r1,'double');
a5 = fwrite(s1,L1,'double');
a6 = fwrite(s1,C1,'double');
a7 = fwrite(s1,r2,'double');
a8 = fwrite(s1,L2,'double');
a9 = fwrite(s1,C2,'double');
a10 = fwrite(s1,r3,'double');
a11 = fwrite(s1,L3,'double');
a12 = fwrite(s1,C3,'double');
a13 = fwrite(s1,f01,'double');
a14 = fwrite(s1,f02,'double');
a15 = fwrite(s1,f03,'double');
a16 = fwrite(s1,h,'double');
a17 = fwrite(s1,gexp,'double');
a18 = fwrite(s1,w,'double');
a19 = fwrite(s1,gfact,'double');
fclose(s1);
%-----
-----
% Зберігання еміричних даних в файлі filelexp2 для програми розрахунку ФНЧ
s2 = fopen('fileexp2','wb');
a1 = fwrite(s2,step,'double');
a2 = fwrite(s2,fmaxexp,'double');
fclose(s2);
%-----
-----
% Зберігання еміричних та фактичних даних в файлі filelexp3 для програми
Initial_conditions_3R
s3 = fopen('fileexp3','wb');
a1 = fwrite(s3,a,'double');
a2 = fwrite(s3,b,'double');
a3 = fwrite(s3,step,'double');
a4 = fwrite(s3,r1,'double');
a5 = fwrite(s3,L1,'double');
a6 = fwrite(s3,C1,'double');
a7 = fwrite(s3,r2,'double');
a8 = fwrite(s3,L2,'double');
a9 = fwrite(s3,C2,'double');
a10 = fwrite(s3,r3,'double');
a11 = fwrite(s3,L3,'double');
a12 = fwrite(s3,C3,'double');
a13 = fwrite(s3,h,'double');
a14 = fwrite(s3,gexp,'double');
a15 = fwrite(s3,w,'double');
a16 = fwrite(s3,fmaxexp,'double');
a17 = fwrite(s3,gfact,'double');
fclose(s3);

```

Initial_conditions_3R:

```

% Calculation of initial conditions for the approximation program for a 3-
resonant circuit
% Розрахунок початкових умов для програми апроксимації 3-х резонансної кривої
%-----
% Зчитування емпіричних та фактичних даних з файлу fileexp3
s3 = fopen('fileexp3','rb');
a = fread(s3,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s3,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s3,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів трьох
контурів:');
r1fact = fread(s3,1,'double')
L1fact = fread(s3,1,'double')
C1fact = fread(s3,1,'double')
r2fact = fread(s3,1,'double')
L2fact = fread(s3,1,'double')
C2fact = fread(s3,1,'double')
r3fact = fread(s3,1,'double')
L3fact = fread(s3,1,'double')
C3fact = fread(s3,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти - кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s3,1,'double') %нормована довжина вектору інтервалу частоти-
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
[gexp,i] = fread(s3,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s3,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
fmaxexp = fread(s3,1,'double'); %частота максимуму вектору емпіричних даних
gexp
[gfact,i] = fread(s3,h,'double'); %вектор фактичної активної провідності
%-----
% Зчитування емпіричних даних з файлу fileFIR
s4 = fopen('fileFIR','rb');
h1 = fread(s4,1,'double'); %кількість коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
[b1,j] = fread(s4,h1,'double'); %вектор b1 коефіцієнтів фільтра КІХ-ФНЧ
disp ('Нормований відлік групової затримки фільтра КІХ-ФНЧ:');
grdilay = fread(s4,1,'double') %нормований відлік групової затримки фільтра
КІХ-ФНЧ
disp ('-----
');
%-----
% Фільтрація емпіричних даних
gf = filter(b1,[1],gexp); %формування функції gf - фільтрація gexp в КІХ-ФНЧ
%-----
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
k1 = 1:1:h; %вектор відліків нормованої частоти
gf1 = gf(k1)'; %початкове формування функції gf1
%-----
% Формування функції gf1 з відсіканням перехідного процесу ФНЧ для gf
n = 1;
while n <= 2*h1,
gf1(n) = 0;
n = n+1;
end

```

```

%-----
% Формування функції gf2 зі зсувом gf1 вліво на нормоване значення групової
затримки фільтра,
% тобто здійснення повної компенсації затримки gf по відношенню до gexp
gf2 = 0;
n = 1:1:(h-grdilay);
gf2(n)= gf1(n+grdilay);
n = (h-grdilay+1):1:h;
gf2(n)= gf2(h-grdilay);
%-----
% Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних кривих
figure(1);
plot(f,gexp,'g-',f,gf2,'r-',f,gfact,'k--') %побудування графіків провідностей
gexp,gfact, gf2
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпірична функція G(f)', 'відфільтрована функція G(f)', 'фактична
функція G(f)') %коментарі (легенда) на графіках
title('Графіки функцій емпіричної, відфільтрованої та фактичної резонансних
кривих на ділянці послідовних резонансів') %найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
%xlim([99999900,10000300]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
%*****
**
% Цикл розрахунку максимумів gf2(n)
kpor = 0.035; %початкове значення коефіцієнту порога для визначення зростання
або спадання g1 на фоні шуму пихибки
kcounter = 1; %коефіцієнт лічильника для виконання циклу
answer = 'y'; %початкове значення "yes" текстової змінної answer
while answer == 'y', %перевірка умови виконання циклу
%-----
% Кусково-лінійна апроксимація gf2 - формування апроксимованої функції
gf2LINE
gf2LINE = gf2(k1)'; %початкове формування апроксимованої функції gf2LINE
m = round((fmaxexp/1e6)/(20*step)) %мінімальна кількість відліків при
знаходженні середнього значення gf2: m=round((f/Qmax)/(20*step))
n = ((2*h1)-grdilay)+1; %початкова нормована частота обробки після відсікання
перехідного процесу ФНЧ
ksign1 = 1; %початкове значення коефіцієнту сигнатури ksign1 попереднього
інтервалу усереднення
kstart = n; %початкове значення нормованої частоти kstart для циклу
gf2mean2 = gf2(n); %початкове значення середнього значення gf2 для поточного
інтервалу
while n <= h-m, %перевірка умови закінчення інтервалу нормованої частоти
n = kstart; %присвоєння значення нормованого відліку для циклу
deltaabs = 0; %початкове значення delta - abs різниця між попереднім та
поточним середніми значеннями gf2
deltapor = 1; %початкове значення deltapor - поріг для визначення зростання
або спадання g1 на фоні шуму пихибки
m1 = m; %початкове значення m1 - кількість відліків при знаходженні
середнього значення в циклі
gf2mean1 = gf2mean2; %початкове значення середнього значення gf2 для
попереднього інтервалу
while deltaabs < deltapor, %перевірка умови досягнення порогу при зміні
середнього значення gf2
if n <= h-m1, %перевірка умови закінчення інтервалу нормованої частоти
k2 = n:1:(n+m1);
gf2mean2 = mean(gf2(k2)); %середнє значення gf2 на інтервалі k2
delta = gf2mean2 - gf2mean1; %різниця середніх значень delta
deltaabs = abs(delta); %модуль різниці середніх значень delta
%-----

```

```

    %формування значення коефіцієнту сигнатури ksign2 поточного інтервалу
    усереднення
    if delta >=0,
        ksign2 =1;
    else
        ksign2 =-1;
    end
    %-----
    deltapor = gf2mean2*kpor; %розрахунок порогу deltapor
    m2 = m1;
    m1 = m1+m;
end
else
    %формування значень для завершення кусково-лінійної апроксимації g1
    deltaabs = 1e50; % умова для завершення циклу "while deltaabs <
deltapor"
    %згладжування необробленої частки gf2 для уникнення помилкових max
    k3 = (n+1):1:h;
    gf2LINE(k3)= gf2LINE(n);
    n = h;
end
end
    ksign = ksign2 - ksign1; %розрахунок коефіцієнту сигнатури ksign
    ksign1 = ksign2; %присвоєння значення коефіцієнту сигнатури ksign1
попереднього інтервалу усереднення
    kstart = n;
    if n <= h-m2, %перевірка умови закінчення інтервалу нормованої частоти
        if ksign ~= -2, %перевірка умови екстремума max - зміна знаку
швидкості функції з зростання на спадання
            %знак швидкості функції не змінено - лінійна апроксимація gf2 на
інтервалі від gf2mean1 до gf2mean2
            %з продовженням лінійної апроксимації до найближчого max або min
значення gf2 в залежності
            %від зростання/зменшення gf2
            k4 = (n+1):1:(n+m2);
            pogr(k4) = abs(gf2(k4) - gf2mean2);
            pogrmin = min(pogr(k4));
            k5 = n+1;
            while pogr(k5) ~=pogrmin,
                k5 = k5+1;
            end
            kstart = k5;
            kxy = (gf2mean2 - gf2mean1)/(k5-n);
            k6 = (n+1):1:k5;
            gf2LINE(k6)= kxy*(k6-n)+gf2mean1; %кусково-лінійна апроксимація gf2
            if ksign2 == 1,
                %зростання gf2 на поточному інтервалі
                %продовженням лінійної апроксимації до найближчого max gf2
                k7 = k5+1;
                while k7 <= h & gf2(k7) > gf2(k7-1),
                    gf2mean2 = gf2(k7);
                    gf2LINE(k7)= gf2mean2;
                    kstart = k7;
                    k7 = k7+1;
                end
            else
                %зменшення gf2 на поточному інтервалі
                %продовженням лінійної апроксимації до найближчого min gf2
                k8 = k5+1;
                while k8 <= h & gf2(k8) < gf2(k8-1),
                    gf2mean2 = gf2(k8);
                    gf2LINE(k8)= gf2mean2;
                    kstart = k8;
                    k8 = k8+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end
end
else
    %знак швидкості функції змінено з зростання на зменшення - ознака
    екстремуму max
    %пошук max значення gf2 на поточному інтервалі з призначенням
    нового відліку від max
    k9 = (n+1):1:(n+m2);
    gf2max = max(gf2(k9));
    k10 = n;
    while gf2(k10)~=gf2max,
    k10 = k10+1;
    end
    kstart = k10;
    kxy = (gf2max - gf2mean1)/(k10-n);
    k11 = (n+1):1:k10;
    gf2LINE(k11)= kxy*(k11-n)+gf2mean1; %кусково-лінійна апроксимація
gf2 перед max
    ksign2 = -1;
    gf2mean2 = gf2max;
end
else
    break
end
end
if n < h,
    %згладжування необробленої частки gf2 для уникнення помилкових max
    k12 = (n+1):1:h;
    gf2LINE(k12)= gf2LINE(n);
end
%завершення кусково-лінійної апроксимації gf2

%-----
% Пошук екстремумів max апроксимованої функції gf2LINE
gf2LINEMAX = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору
gf2LINEMAX
gf2LINEMAX1 = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору
gf2LINEMAX1
fn = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору fn
fn1 = 0; %початкове обнулення(перетворення на скаляр) вектору fn1
[gf2LINEMAX,fn] = findpeaks(gf2LINE); %формування векторів значень max
gf2LINEMAX, та аргументу відліків нормованої частоти fn
disp ('-----');
');
gmax = gf2LINEMAX %відображення на екрані вектору значень max gf2LINEMAX
fmax = f(fn) %відображення на екрані вектору аргументу відліків ненормованої
частоти
disp ('Кількість максимумів на функції емпіричної резонансної кривої
дорівнює:');
kmax = length(gf2LINEMAX)
if kmax>3,
    disp ('Три найвищих максимума - використовуйте max3 для швидкого введення
значення відсікання нижчих екстремумів max:');
    max1 = max(gmax)
    n = 1;
    while gmax(n)~= max1,
    n = n+1;
    end
    fmax1 = fmax(n)
    gmax(n) = 0;
    max2 = max(gmax)
    n = 1;
    while gmax(n)~= max2,

```

```

n = n+1;
end
fmax2 = fmax(n)
gmax(n) = 0;
max3 = max(gmax)
n = 1;
while gmax(n) ~= max3,
n = n+1;
end
fmax3 = fmax(n)
end
disp ('-----');
');
% Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої-----
---
figure(2)
plot(f,gexp,'g-',f,gf2LINE,'r-',f(fn),gf2LINEMAX,'ko')
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абсцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('емпірична функція G(f)', 'лінійно-апроксимована функція
G(f)', 'максимуми G(f)') %коментарі(легенда) на графіках
title('Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000300]); %діапазон значень осі абсцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абсцис X -----
if kcounter == 1, %перевірка значення коефіцієнта лічильника циклу - 1-й цикл
при kpor=0.035
gf2LINEMAX1 = gf2LINEMAX; %присвоєння значень вектору max gf2LINEMAX вектору
gf2LINEMAX1
fn1 = fn; %присвоєння значень вектору аргументу відліків нормованої частоти
fn вектору fn1
else %починаючи з 2-го циклу (kcounter > 1) - повторний пошук max
gf2LINEMAX1 = gf2LINEMAX; %присвоєння значень вектору max gf2LINEMAX вектору
gf2LINEMAX1
fn1 = fn; %присвоєння значень вектору аргументу відліків нормованої частоти
fn вектору fn1
if kmax > 3,
gf2LINEMAX1 = 0; %обнулення(перетворення на скаляр) вектору gf2LINEMAX1
fn1 = 0; %обнулення(перетворення на скаляр) вектору fn1
maxg = max(gf2LINEMAX);
disp ('Введіть значення активної провідності для відсікання нижчих
екстремумів max');
disp ('-----');
');
gcutoff = input ('gcutoff =');
while gcutoff >= maxg,
disp ('Введено некоректне значення активної провідності для відсікання
нижчих екстремумів max,');
disp ('введіть значення активної провідності для відсікання нижчих
екстремумів max');
disp ('-----');
-----');
gcutoff = input ('gcutoff =');
end
n = 1;
k13 = 1;
while n <= kmax,
if gf2LINEMAX(n) > gcutoff, % для max, розташованих вище лінії
відсікання
gf2LINEMAX1(k13) = gf2LINEMAX(n); %присвоєння значень вектору
gf2LINEMAX1
fn1(k13) = fn(n); %присвоєння значень вектору fn1

```

```

        k13 = k13+1;
    end
    n = n+1;
end
disp ('-----
');
gmax = gf2LINEMAX1 %відображення на екрані вектору значень max gf2LINEMAX1
fmax = f(fn1) %відображення на екрані вектору аргументу відліків
ненормованої частоти
disp ('Кількість максимумів на функції емпіричної резонансної кривої
дорівнює:');
kmax = length(gf2LINEMAX1)
disp ('-----
');
gcutoff1(k1) = gcutoff;
% Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої-----
---
figure(3)
plot(f,gexp,'g-',f,gf2LINE,'r-',f(fn),gf2LINEMAX,'ko',f,gcutoff1,'k-')
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('емпірична функція G(f)', 'лінійно-апроксимована функція
G(f)', 'максимуми G(f)', 'лінія відсікання нижчих екстремумів max')
%коментарі (легенда) на графіках
title('Графік екстремумів max на функції емпіричної резонансної кривої')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000300]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X -----
end
end
%-----
kcounter = kcounter+1; %збільшення значення коефіцієнта лічильника циклу
%-----
% Перевірка умови виходу з циклу пошуку максимумів
if kmax == 1 | kmax == 2 | kmax == 3,
disp ('Кількість максимумів відповідає моделі трьох-резонансної кривої,');
disp ('Якщо необхідно повторити пошук, введіть значення у(yes), інакше
натисніть "Enter"');
answer = input ('','s');
if answer == 'y',
disp ('Поточне значення коефіцієнту kpor:');
kpor
disp ('Введіть нове значення значення коефіцієнту порога');
kpor = input ('kpor =');
end
else
disp ('Кількість максимумів не відповідає моделі трьох-резонансної кривої,');
disp ('необхідно повторити пошук');
answer = 'y';
disp ('Поточне значення коефіцієнту kpor:');
kpor
disp ('Введіть нове значення значення коефіцієнту порога');
kpor = input ('kpor =');
end
%-----
end
%завершення циклу розрахунку максимумів gf2(n)
disp ('-----
');

%*****
**

```

```

% Розрахунок початкових умов
% -----
if kmax ==1, % якщо знайдено 1 максимум
    gmaxexp = max(gexp); %максимальне значення gexp
    n = 1;
    while gexp(n) ~= gmaxexp,
        n = n+1;
    end;
    fr = f(n); %уточнена частота резонансу f, яка відповідає gmaxexp
    gmax = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr
    wr = 2*pi*fr; %кутова частота резонансу w, яка відповідає fr
    r = 3/gmax %опір контурів 1,2,3
    p = gmax/2; %розрахунок значення gmax*0.5
    n = 1;
    while (gf2(n)-p)<0,
        n = n+1;
    end;
    k1L = n; %нормована частота на рівні gmax*0.5 на лівій частині загального
контуру
    fr1L = f(n); %частота f на рівні gmax*0.5 на лівій частині загального
контуру
    n = h;
    while (gf2(n)-p)<0,
        n = n-1;
    end;
    k2R = n; %нормована частота на рівні gmax*0.5 на правій частині загального
контуру
    fr2R = f(n); %частота f на рівні gmax*0.5 на правій частині загального
контуру
    raz = (fr2R-fr1L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax*0.5
    q = fr/raz %розрахунок значення добротності контурів q
    L = q*r/wr %розрахунок початкового значення індуктивності контурів L
    C = 1/(wr*q*r) %розрахунок початкового значення ємности контурів C
    r1 = r;
    L1 = L;
    C1 = C;
    r2 = r;
    L2 = L;
    C2 = C;
    r3 = r;
    L3 = L;
    C3 = C;
% -----

% Фіксація нормованих частот, які використовуються при знаходженні 2-х або
3-х максимумів
k1R = 1;
k2L = 1;
k3L = 1;
k3R = 1;
% -----

disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_r3 = abs((r3/r3fact)-1)*100

```

```

deviation_L3 = abs((L3/L3fact)-1)*100
deviation_C3 = abs((C3/C3fact)-1)*100
disp ('-----');
% -----

else
    if kmax ==2, %якщо знайдено 2 максимуми,
        %припущення: 2-й резонанс розташований між 1-м і 3-м
        n = fn1(1):1:fn1(2); %вектор інтервалу нормованої частоти між 1-м та 3-м
        резонансами
        gminexp1 = min(gexp(n)); %мінімальне значення gexp між 1-м та 3-м
        резонансами
        n = fn1(1);
        while gexp(n) ~= gminexp1,
            n = n+1;
        end;
        frmin1 = f(n); %частота f, що відповідає gminexp1
        wmin1 = 2*pi*frmin1; %кутова частота w, що відповідає gminexp1
        krmin1 = n; %нормована частота, що відповідає gmin1
        gmin1 = gf2(n); %значення gf2 на частоті frmin1

        disp ('-----');
        disp ('Уточнені значення максимумів 1-го та 3-го резонансів, (припущення:
        2-й резонанс розташований між 1-м і 3-м):');
        n = 1:1:krmin1;
        gmaxexp1 = max(gexp(n)); %максимальне значення 1-го резонансу на gexp
        n = 1;
        while gexp(n) ~= gmaxexp1,
            n = n+1;
        end;
        fr1 = f(n) %уточнена частота 1-го резонансу f, яка відповідає gmaxexp1
        krmax1 = n; %нормована частота, що відповідає gmax1
        wr1 = 2*pi*fr1; %кутова частота 1-го резонансу w, яка відповідає fr1
        gmax1 = gf2(n) %значення gf2 на частоті fr1

        n = krmin1:1:h;
        gmaxexp3 = max(gexp(n)); %максимальне значення 3-го резонансу на gexp
        n = 1;
        while gexp(n) ~= gmaxexp3,
            n = n+1;
        end;
        fr3 = f(n) %уточнена частота 3-го резонансу f, яка відповідає gmaxexp3
        krmax3 = n; %нормована частота, що відповідає gmax3
        wr3 = 2*pi*fr3; %кутова частота 3-го резонансу w, яка відповідає fr3
        gmax3 = gf2(n) %значення gf2 на частоті fr3
        disp ('-----');
        disp ('-----');

        %контур 1-----
        %значення gmax1 з урахуванням коригуючого коефіцієнта - враховують
        взаємодію між 1-м та 3-м контурами:
        g1 = gmax1/(1+(((fr3-frmin1)/(fr3-
        fr1))^2)*(gmin1/gmax1)*(gmax3/sqrt(gmax1*gmax3))));
        r1 = 1/g1 %опір контуру 1
        p1 = gmax1/2; %розрахунок значення gmax1*0.5
        n = 1;
        while (gf2(n)-p1)<0,
            n = n+1;
        end;
        k1L = n; %нормована частота на рівні gmax1*0.5 на лівій частині контуру 1

```

```

fr1L = f(n); %частота f на рівні gmax1*0.5 на лівій частині контуру 1
wr1L = 2*pi*fr1L; %кутова частота w на рівні gmax1*0.5 на лівій частині
контуру 1
raz1 = 2*(fr1-fr1L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax1*0.5
%розрахунок добротності контуру з урахуванням коригуючого коефіцієнта -
враховують взаємовплив між 1-м та 3-м контурами:
q1 = (fr1/raz1)*(1+(((fr3-frmin1)/(fr3-
fr1))*(gmin1/gmax1)*(gmax3/sqrt(gmax1*gmax3))))^2)
L1 = q1*r1/wr1 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C1 = 1/(wr1*q1*r1) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%контур 3-----
%значення gmax3 з урахуванням коригуючого коефіцієнта - враховують
взаємовплив між 1-м та 3-м контурами:
g3 = gmax3/(1+(((frmin1-fr1)/(fr3-
fr1))^2)*(gmin1/gmax3)*(gmax1/sqrt(gmax1*gmax3)))));
r3 = 1/g3 %опір контуру 3
p3 = gmax3/2; %розрахунок значення gmax3*0.5
n = h;
while (gf2(n)-p3)<0,
n = n-1;
end;
k3R = n; %нормована частота на рівні gmax3*0.5 на правій частині контуру 3
fr3R = f(n); %частота f на рівні gmax3*0.5 на правій частині контуру 3
wr3R = 2*pi*fr3R; %кутова частота w на рівні gmax3*0.5 на правій частині
контуру 3
raz3 = 2*(fr3R-fr3); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax3*0.5
%розрахунок добротності контуру з урахуванням коригуючого коефіцієнта -
враховують взаємовплив між 1-м та 3-м контурами:
q3 = (fr3/raz3)*(1+(((frmin1-fr1)/(fr3-
fr1))*(gmin1/gmax3)*(gmax1/sqrt(gmax1*gmax3))))^2)
L3 = q3*r3/wr3 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C3 = 1/(wr3*q3*r3) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%контур 2-----
%припущення: 2-й резонанс розташований між 1-м і 3-м:
g2kf2 = gf2'-((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2)))+(r3./(r3.^2+(w*L3-
1./(w*C3)).^2))); %обчислення активної провідності контура 2
gmax2 = max(g2kf2); %максимальне значення 2-го резонансу на g2kf2
n = 1;
while g2kf2(n) ~= gmax2,
n = n+1;
end;
fr2 = f(n) %частота 2-го резонансу f, яка відповідає gmax2
krmax2 = n; %нормована частота, що відповідає gmax2
wr2 = 2*pi*fr2; %кутова частота 1-го резонансу w, яка відповідає fr2
r2 = 1/gmax2 %опір контуру 2
p2 = gmax2/2; %розрахунок значення gmax2*0.5

n = krmax2;
while (g2kf2(n)-p2)>0,
n = n-1;
end;
k2L = n; %нормована частота на рівні gmax2*0.5 на лівій частині контуру 2
fr2L = f(n); %частота f на рівні gmax2*0.5 на лівій частині контуру 2

n = krmax2;
while (g2kf2(n)-p2)>0,
n = n+1;
end;
k2R = n; %нормована частота на рівні gmax2*0.5 на правій частині контуру 2
fr2R = f(n); %частота f на рівні gmax2*0.5 на правій частині контуру 2

```

```

raz2 = (fr2R-fr2L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax2*0.5
q2 = (fr2/raz2) %розрахунок значення добротності контуру q
L2 = q2*r2/wr2 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C2 = 1/(wr2*q2*r2) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%графіки функцій
figure(4); %
plot(f,gexp,'g-',f,gf2,'r-',f,gfact,'k--',f,g2kf2,'b-
',f(k2L),g2kf2(k2L),'*r',f(k2R),g2kf2(k2R),'*r'); %побудування графіків
функцій gexp,gfact,g2kf2
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('емпірична функція G(f)', 'відфільтрована функція G(f)', 'фактична
функція G(f)', 'функція G(f) середнього контуру'); %коментарі(легенда) на
графіках
title('Графіки загальної експериментальної провідності gexp, фільтрованої
провідності gf2, фактичної провідності gfact та окремої провідності
середнього контура g2kf2') %найменування заголовку графіків
xlim([a,b]) %діапазон значень осі абцис X
%-----
%-----
% Фіксація нормованих частот, які використовуються при знаходженні 3-х
максимумів
k1R = 1;
k2L = 1;
k2R = 1;
k3L = 1;
%-----
%-----
disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_r3 = abs((r3/r3fact)-1)*100
deviation_L3 = abs((L3/L3fact)-1)*100
deviation_C3 = abs((C3/C3fact)-1)*100
disp ('-----');
%-----
%-----
else
if kmax ==3, %якщо знайдено 3 максимуми
n = fn1(1):1:fn1(2); %вектор інтервалу нормованої частоти між 1-м та 2-м
резонансами
gminexp1 = min(gexp(n)); %мінімальне значення gexp між 1-м та 2-м
резонансами
n = fn1(1);
while gexp(n) ~= gminexp1,
n = n+1;
end;
frmin1 = f(n); %частота f, що відповідає gminexp1
wmin1 = 2*pi*frmin1; %кутова частота w, що відповідає gminexp1
krmin1 = n; %нормована частота, що відповідає gmin1
gmin1 = gf2(n); %значення gf2 на частоті frmin1

```

```

n = fn1(2):1:fn1(3); %вектор інтервалу нормованої частоти між 2-м та 3-м
резонансами
gminexp2 = min(gexp(n)); %мінімальне значення gexp між 2-м та 3-м
резонансами
n = fn1(2);
while gexp(n) ~= gminexp2,
    n = n+1;
end;
frmin2 = f(n); %частота f, що відповідає gminexp2
wmin2 = 2*pi*frmin2; %кутова частота w, що відповідає gminexp2
krmin2 = n; %нормована частота, що відповідає gmin2
gmin2 = gf2(n); %значення gf2 на частоті frmin2

disp ('-----');
disp ('Уточнені значення максимумів 1-го, 2-го, 3-го резонансів:');
n = 1:1:krmin1;
gmaxexp1 = max(gexp(n)); %максимальне значення 1-го резонансу на gexp
n = 1;
while gexp(n) ~= gmaxexp1,
    n = n+1;
end;
fr1 = f(n) %уточнена частота 1-го резонансу f, яка відповідає gmaxexp1
krmax1 = n; %нормована частота, що відповідає gmax1
wr1 = 2*pi*fr1; %кутова частота 1-го резонансу w, яка відповідає fr1
gmax1 = gf2(n) %значення gf2 на частоті fr1

n = krmin1:1:krmin2;
gmaxexp2 = max(gexp(n)); %максимальне значення 2-го резонансу на gexp
n = 1;
while gexp(n) ~= gmaxexp2,
    n = n+1;
end;
fr2 = f(n) %уточнена частота 2-го резонансу f, яка відповідає gmaxexp2
krmax2 = n; %нормована частота, що відповідає gmax2
wr2 = 2*pi*fr2; %кутова частота 1-го резонансу w, яка відповідає fr2
gmax2 = gf2(n) %значення gf2 на частоті fr2

n = krmin2:1:h;
gmaxexp3 = max(gexp(n)); %максимальне значення 3-го резонансу на gexp
n = 1;
while gexp(n) ~= gmaxexp3,
    n = n+1;
end;
fr3 = f(n) %уточнена частота 3-го резонансу f, яка відповідає gmaxexp3
krmax3 = n; %нормована частота, що відповідає gmax3
wr3 = 2*pi*fr3; %кутова частота 3-го резонансу w, яка відповідає fr3
gmax3 = gf2(n) %значення gf2 на частоті fr3
disp ('-----');

%контур 1-----
%значення gmax1 з урахуванням коригуючого коефіцієнта - враховують
взаємовплив між 1-м та 2-м контурами:
g1 = gmax1/(1+(((fr2-frmin1)/(fr2-
fr1))^2)*(gmin1/gmax1)*(gmax2/sqrt(gmax1*gmax2))));
r1 = 1/g1 %опір контуру 1
p1 = gmax1/2; %розрахунок значення gmax1*0.5
n = 1;
while (gf2(n)-p1)<0,
    n = n+1;

```

```

end;
k1L = n; %нормована частота на рівні gmax1*0.5 на лівій частині контуру 1
fr1L = f(n); %частота f на рівні gmax1*0.5 на лівій частині контуру 1
wr1L = 2*pi*fr1L; %кутова частота w на рівні gmax1*0.5 на лівій частині
контуру 1
gwr1L = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr1L
raz1 = 2*(fr1-fr1L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax1*0.5
%розрахунок добротності контуру з урахуванням коригуючого коефіцієнта -
враховують взаємовплив між 1-м та 2-м контурами:
q1 = (fr1/raz1)*(1+(((fr2-frmin1)/(fr2-
fr1))*(gmin1/gmax1)*(gmax2/sqrt(gmax1*gmax2))))^2)
L1 = q1*r1/wr1 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C1 = 1/(wr1*q1*r1) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%контур 3-----
%значення gmax3 з урахуванням коригуючого коефіцієнта - враховують
взаємовплив між 2-м та 3-м контурами:
g3 = gmax3/(1+(((frmin2-fr2)/(fr3-
fr2))^2)*(gmin2/gmax3)*(gmax2/sqrt(gmax2*gmax3)))));
r3 = 1/g3 %опір контуру 3
p3 = gmax3/2; %розрахунок значення gmax3*0.5
n = h;
while (gf2(n)-p3)<0,
n = n-1;
end;
k3R = n; %нормована частота на рівні gmax3*0.5 на правій частині контуру 3
fr3R = f(n); %частота f на рівні gmax3*0.5 на правій частині контуру 3
wr3R = 2*pi*fr3R; %кутова частота w на рівні gmax3*0.5 на правій частині
контуру 3
gwr3R = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr3R
raz3 = 2*(fr3R-fr3); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax3*0.5
%розрахунок добротності контуру з урахуванням коригуючого коефіцієнта -
враховують взаємовплив між 2-м та 3-м контурами:
q3 = (fr3/raz3)*(1+(((frmin2-fr2)/(fr3-
fr2))*(gmin2/gmax3)*(gmax2/sqrt(gmax2*gmax3))))^2)
L3 = q3*r3/wr3 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L
C3 = 1/(wr3*q3*r3) %розрахунок початкового значення ємності контуру C

%контур 2-----
g2kf2 = gf2'-((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+r3./(r3.^2+(w*L3-
1./(w*C3)).^2))); %обчислення провідності контура_2
g2kf2max = g2kf2(krmax2); %максимальне значення 2-го резонансу на g2kf2
r2 = 1/g2kf2max %опір контуру 2
p2 = g2kf2max/2; %розрахунок значення gmax2*0.5

n = krmax2;
while (g2kf2(n)-p2)>0,
n = n-1;
end;
k2L = n; %нормована частота на рівні gmax2*0.5 на лівій частині контуру 2
fr2L = f(n); %частота f на рівні gmax2*0.5 на лівій частині контуру 2

n = krmax2;
while (g2kf2(n)-p2)>0,
n = n+1;
end;
k2R = n; %нормована частота на рівні gmax2*0.5 на правій частині контуру 2
fr2R = f(n); %частота f на рівні gmax2*0.5 на правій частині контуру 2

raz2 = (fr2R-fr2L); %розрахунок смуги пропуску за рівнем gmax2*0.5
q2 = (fr2/raz2) %розрахунок значення добротності контуру q
L2 = q2*r2/wr2 %розрахунок початкового значення індуктивності контуру L

```

```

C2 = 1/(wr2*q2*r2) %розрахунок початкового значення ємности контуру C

%графіки функцій
figure(4); %
plot(f,gexp,'g-',f,gf2,'r-',f,gfact,'k--',f,g2kf2,'b-
',f(k2L),g2kf2(k2L),'*r',f(k2R),g2kf2(k2R),'*r'); %побудування графіків
функцій gexp,gfact,g2kf2
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend('емпірична функція G(f)','відфільтрована функція G(f)','фактична
функція G(f)','функція G(f) середнього контуру'); %коментарі(легенда) на
графіках
title('Графіки загальної експериментальної провідності gexp, фільтрованої
провідності gf2, фактичної провідності gfact та окремої провідності
середнього контура g2kf2') %найменування заголовку графіків
%xlim([9999900,10000300]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]) %діапазон значень осі абцис X
%-----
-----
disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_r3 = abs((r3/r3fact)-1)*100
deviation_L3 = abs((L3/L3fact)-1)*100
deviation_C3 = abs((C3/C3fact)-1)*100
disp ('-----');
-----

%розрахунок додаткових точок для уточнення початкових умов-----
-
p4 = (gmax1 + gmin1)/2; %розрахунок значення (gmax1 + gmin1)/2
n = krmax1;
while (gf2(n)-p4)>0,
n = n+1;
end;
fr1R = f(n); %частота f на рівні (gmax1 + gmin1)*0.5 на правій частині
контуру 1
k1R = n; %нормована частота на рівні (gmax1 + gmin1)*0.5 на правій частині
контуру 1
wr1R = 2*pi*fr1R; %кутова частота w на рівні (gmax1 + gmin1)*0.5 на правій
частині контуру 1
gwr1R = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr1R

p5 = (gmax2 + gmin1)/2; %розрахунок значення (gmax2 + gmin1)/2
n = krmin1;
while (gf2(n)-p5)<0,
n = n+1;
end;
fr2L = f(n); %частота f на рівні (gmax2 + gmin1)*0.5 на лівій частині
контуру 2
k2L = n; %нормована частота на рівні (gmax2 + gmin1)*0.5 на лівій частині
контуру 2
wr2L = 2*pi*fr2L; %кутова частота w на рівні (gmax2 + gmin1)*0.5 на лівій
частині контуру 2
gwr2L = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr2L

```

```

p6 = (gmax2 + gmin2)/2; %розрахунок значення (gmax2 + gmin2)/2
n = krmax2;
while (gf2(n)-p6)>0,
n = n+1;
end;
fr2R = f(n); %частота f на рівні (gmax2 + gmin2)*0.5 на правій частині
конттуру 2
k2R = n; %нормована частота на рівні (gmax2 + gmin2)*0.5 на правій частині
конттуру 2
wr2R = 2*pi*fr2R; %кутова частота w на рівні (gmax2 + gmin2)*0.5 на правій
частині конттуру 2
gwr2R = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr2R

p7 = (gmax3 + gmin2)/2; %розрахунок значення (gmax3 + gmin2)/2
n = krmin2;
while (gf2(n)-p7)<0,
n = n+1;
end;
fr3L = f(n); %частота f на рівні (gmax3 + gmin2)*0.5 на лівій частині
конттуру 3
k3L = n; %нормована частота на рівні (gmax3 + gmin2)*0.5 на лівій частині
конттуру 3
wr3L = 2*pi*fr3L; %кутова частота w на рівні (gmax3 + gmin2)*0.5 на лівій
частині конттуру 3
gwr3L = gf2(n); %значення gf2 на частоті fr3L

% Уточнення початкових значень r, L, C
% Приведення змінних до нормованого значення
r1 = r1*1; %нормоване значення r1
L1 = L1*1e3; %нормоване значення L1
C1 = C1*1e15; %нормоване значення C1
r2 = r2*1; %нормоване значення r2
L2 = L2*1e3; %нормоване значення L2
C2 = C2*1e15; %нормоване значення C2
r3 = r3*1; %нормоване значення r3
L3 = L3*1e3; %нормоване значення L3
C3 = C3*1e15; %нормоване значення C3
VP = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 r3 L3 C3]; %вектор початкових нормованих значень
[VU] = Clarification_3R
(wr1, gmax1, wr2, gmax2, wr3, gmax3, wmin1, gmin1, wmin2, gmin2, wr1L, gwr1L, wr1R, gwr1R,
wr2L, gwr2L, wr2R, gwr2R, wr3L, gwr3L, wr3R, gwr3R, VP);
disp ('-----');
disp ('уточнені початкові значення параметрів R,L,C трьох контурів:');
r1 = VU(1) %уточнене початкове значення r1
L1 = VU(2) %уточнене початкове значення L1
C1 = VU(3) %уточнене початкове значення c1
r2 = VU(4) %уточнене початкове значення r2
L2 = VU(5) %уточнене початкове значення L2
C2 = VU(6) %уточнене початкове значення c2
r3 = VU(7) %уточнене початкове значення r3
L3 = VU(8) %уточнене початкове значення L3
C3 = VU(9) %уточнене початкове значення c3
disp ('-----');

disp ('відхилення у відсотках розрахованих початкових значень параметрів
R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100

```

```

deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_r3 = abs((r3/r3fact)-1)*100
deviation_L3 = abs((L3/L3fact)-1)*100
deviation_C3 = abs((C3/C3fact)-1)*100
disp ('-----');
end;
end;
end;

%-----
-----
% Зберігання початкових умов для програми апроксимації 3-х резонансної кривої
s5 = fopen('initcondit','wb');
a1 = fwrite(s5,r1,'double');
a2 = fwrite(s5,L1,'double');
a3 = fwrite(s5,C1,'double');
a4 = fwrite(s5,r2,'double');
a5 = fwrite(s5,L2,'double');
a6 = fwrite(s5,C2,'double');
a7 = fwrite(s5,r3,'double');
a8 = fwrite(s5,L3,'double');
a9 = fwrite(s5,C3,'double');
a10 = fwrite(s5,k1L,'double');
a11 = fwrite(s5,k1R,'double');
a12 = fwrite(s5,k2L,'double');
a13 = fwrite(s5,k2R,'double');
a14 = fwrite(s5,k3L,'double');
a15 = fwrite(s5,k3R,'double');
fclose(s5);
%-----

```

Clarification_3R:

```

% Calculation of the vector of refined initial values VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2
r3 L3 C3]
% Розрахунок вектору уточнених початкових значень VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 r3
L3 C3]
function [VU] = Clarification_3R
(wr1,gmax1,wr2,gmax2,wr3,gmax3,wmin1,gmin1,wmin2,gmin2,wr1L,gwr1L,wr1R,gwr1R,
wr2L,gwr2L,wr2R,gwr2R,wr3L,gwr3L,wr3R,gwr3R,VP)
n = 1:1:9;
V = VP(n);
options=optimset('MaxFunEvals',5000000,'MaxIter',5000000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-12);
[x fval exitflag OUTPUT] =
fsolve('Sysequat_3R',V,options,wr1,gmax1,wr2,gmax2,wr3,gmax3,wmin1,gmin1,wmin
2,gmin2,wr1L,gwr1L,wr1R,gwr1R,wr2L,gwr2L,wr2R,gwr2R,wr3L,gwr3L,wr3R,gwr3R);
OUTPUT
r1 = x(1); %вихідне значення r1
L1 = x(2)*1e-3; %вихідне значення L1
C1 = x(3)*1e-15; %вихідне значення c1
r2 = x(4); %вихідне значення r2
L2 = x(5)*1e-3; %вихідне значення L2
C2 = x(6)*1e-15; %вихідне значення c2
r3 = x(7); %вихідне значення r3
L3 = x(8)*1e-3; %вихідне значення L3
C3 = x(9)*1e-15; %вихідне значення c3
VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 r3 L3 C3];
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

Sysequat_3R:

```

% System of equations for specification of initial conditions 3R
% Система рівнянь для уточнення початкових умов 3R
function
[z]=Sysequat_3R(x,wr1,gmax1,wr2,gmax2,wr3,gmax3,wmin1,gmin1,wmin2,gmin2,wr1L,
gwr1L,wr1R,gwr1R,wr2L,gwr2L,wr2R,gwr2R,wr3L,gwr3L,wr3R,gwr3R)
z(1) = (x(1)/(x(1)^2+((wr1*(x(2)*1e-3))-1/(wr1*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr1*(x(5)*1e-3))-1/(wr1*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr1*(x(8)*1e-3))-1/(wr1*(x(9)*1e-15))))^2))-
gmax1;
z(2) = (x(1)/(x(1)^2+((wr2*(x(2)*1e-3))-1/(wr2*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr2*(x(5)*1e-3))-1/(wr2*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr2*(x(8)*1e-3))-1/(wr2*(x(9)*1e-15))))^2))-
gmax2;
z(3) = (x(1)/(x(1)^2+((wr3*(x(2)*1e-3))-1/(wr3*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr3*(x(5)*1e-3))-1/(wr3*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr3*(x(8)*1e-3))-1/(wr3*(x(9)*1e-15))))^2))-
gmax3;
z(4) = (x(1)/(x(1)^2+((wmin1*(x(2)*1e-3))-1/(wmin1*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wmin1*(x(5)*1e-3))-1/(wmin1*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wmin1*(x(8)*1e-3))-1/(wmin1*(x(9)*1e-15))))^2))-
gmin1;
z(5) = (x(1)/(x(1)^2+((wmin2*(x(2)*1e-3))-1/(wmin2*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wmin2*(x(5)*1e-3))-1/(wmin2*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wmin2*(x(8)*1e-3))-1/(wmin2*(x(9)*1e-15))))^2))-
gmin2;
z(6) = (x(1)/(x(1)^2+((wr1L*(x(2)*1e-3))-1/(wr1L*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr1L*(x(5)*1e-3))-1/(wr1L*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr1L*(x(8)*1e-3))-1/(wr1L*(x(9)*1e-15))))^2))-
gwr1L;
z(7) = (x(1)/(x(1)^2+((wr1R*(x(2)*1e-3))-1/(wr1R*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr1R*(x(5)*1e-3))-1/(wr1R*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr1R*(x(8)*1e-3))-1/(wr1R*(x(9)*1e-15))))^2))-
gwr1R;
z(8) = (x(1)/(x(1)^2+((wr2L*(x(2)*1e-3))-1/(wr2L*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr2L*(x(5)*1e-3))-1/(wr2L*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr2L*(x(8)*1e-3))-1/(wr2L*(x(9)*1e-15))))^2))-
gwr2L;
z(9) = (x(1)/(x(1)^2+((wr2R*(x(2)*1e-3))-1/(wr2R*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr2R*(x(5)*1e-3))-1/(wr2R*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr2R*(x(8)*1e-3))-1/(wr2R*(x(9)*1e-15))))^2))-
gwr2R;
z(10) = (x(1)/(x(1)^2+((wr3L*(x(2)*1e-3))-1/(wr3L*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr3L*(x(5)*1e-3))-1/(wr3L*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr3L*(x(8)*1e-3))-1/(wr3L*(x(9)*1e-15))))^2))-
gwr3L;
z(11) = (x(1)/(x(1)^2+((wr3R*(x(2)*1e-3))-1/(wr3R*(x(3)*1e-
15))))^2))+x(4)/(x(4)^2+((wr3R*(x(5)*1e-3))-1/(wr3R*(x(6)*1e-
15))))^2))+x(7)/(x(7)^2+((wr3R*(x(8)*1e-3))-1/(wr3R*(x(9)*1e-15))))^2))-
gwr3R;
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

Fminsearch_3R:

```

% Program for approximation of experimental experiments G, 3 resonances,
method fminsearch
% Програма апроксимації експериментальних вимірювань G, 3 резонанси, метод
fminsearch
tic % контроль часу виконання програми
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexpl

```

```

s1 = fopen('fileexpl','rb');
a = fread(s1,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s1,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s1,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----');
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');
r1fact = fread(s1,1,'double')
L1fact = fread(s1,1,'double')
C1fact = fread(s1,1,'double')
r2fact = fread(s1,1,'double')
L2fact = fread(s1,1,'double')
C2fact = fread(s1,1,'double')
r3fact = fread(s1,1,'double')
L3fact = fread(s1,1,'double')
C3fact = fread(s1,1,'double')
f01fact = fread(s1,1,'double')
f02fact = fread(s1,1,'double')
f03fact = fread(s1,1,'double')
disp ('-----');
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s1,1,'double') %нормована довжина вектору кутової частоти w -
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----');
');
[gexp,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
[gfact,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор фактичної активної провідності
%-----
% Зчитування початкових умов з файлу initcondit
s5 = fopen('initcondit','rb');
r1 = fread(s5,1,'double');
L1 = fread(s5,1,'double');
C1 = fread(s5,1,'double');
r2 = fread(s5,1,'double');
L2 = fread(s5,1,'double');
C2 = fread(s5,1,'double');
r3 = fread(s5,1,'double');
L3 = fread(s5,1,'double');
C3 = fread(s5,1,'double');
k1L = fread(s5,1,'double');
k1R = fread(s5,1,'double');
k2L = fread(s5,1,'double');
k2R = fread(s5,1,'double');
k3L = fread(s5,1,'double');
k3R = fread(s5,1,'double');
%-----
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Апроксимація/оптимізація методом найменших квадратів fminsearch
% Приведення змінних до нормованого значення
r1 = r1*1; %нормоване значення r1
L1 = L1*1e3; %нормоване значення L1
C1 = C1*1e15; %нормоване значення C1
r2 = r2*1; %нормоване значення r2
L2 = L2*1e3; %нормоване значення L2
C2 = C2*1e15; %нормоване значення C2
r3 = r3*1; %нормоване значення r2

```

```

L3 = L3*1e3; %нормоване значення L2
C3 = C3*1e15; %нормоване значення C2

VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 r3 L3 C3]; %вектор початкових нормованих значень
options=optimset('MaxFunEvals',200000,'MaxIter',200000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-10); %параметри оптимізації
[X,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] = fminsearch('Funfim_3R',VU,options,gexp,'w');
%обчислення функції Funfim_3R
OUTPUT
disp ('-----');
disp ('-----');
disp ('вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при
апроксимації/оптимізації:');
r1 = X(1); %вихідне значення r1
L1p = X(2)*1e-3; %вихідне значення L1
C1p = X(3)*1e-15; %вихідне значення C1
r2 = X(4); %вихідне значення r2
L2p = X(5)*1e-3; %вихідне значення L2
C2p = X(6)*1e-15; %вихідне значення C2
r3 = X(7); %вихідне значення r2
L3p = X(8)*1e-3; %вихідне значення L2
C3p = X(9)*1e-15; %вихідне значення C2

% перевірка послідовності розташування резонансів по осі частот
LCmax = max([L1p*C1p L2p*C2p L3p*C3p]);
if L1p*C1p == LCmax,
    r1 = r1, L1 = L1p, C1 = C1p
    LCmax1 = max([L2p*C2p L3p*C3p]);
    if L2p*C2p == LCmax1,
        r2 = r2, L2 = L2p, C2 = C2p
        r3 = r3, L3 = L3p, C3 = C3p
    else
        r2 = r3, L2 = L3p, C2 = C3p
        r3 = r2, L3 = L2p, C3 = C2p
    end
end
if L2p*C2p == LCmax,
    r1 = r2, L1 = L2p, C1 = C2p
    LCmax1 = max([L1p*C1p L3p*C3p]);
    if L1p*C1p == LCmax1,
        r2 = r1, L2 = L1p, C2 = C1p
        r3 = r3, L3 = L3p, C3 = C3p
    else
        r2 = r3, L2 = L3p, C2 = C3p
        r3 = r1, L3 = L1p, C3 = C1p
    end
end
if L3p*C3p == LCmax,
    r1 = r3, L1 = L3p, C1 = C3p
    LCmax1 = max([L1p*C1p L2p*C2p]);
    if L1p*C1p == LCmax1,
        r2 = r1, L2 = L1p, C2 = C1p
        r3 = r2, L3 = L2p, C3 = C2p
    else
        r2 = r2, L2 = L2p, C2 = C2p
        r3 = r1, L3 = L1p, C3 = C1p
    end
end
disp ('-----');
disp ('-----');

```

```

disp ('Відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від
фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_r3 = abs((r3/r3fact)-1)*100
deviation_L3 = abs((L3/L3fact)-1)*100
deviation_C3 = abs((C3/C3fact)-1)*100
disp ('-----');

gapr = (r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+ (r2./(r2.^2+(w*L2-
1./(w*C2)).^2))+ (r3./(r3.^2+(w*L3-1./(w*C3)).^2)); %обчислення апроксимованої
функції gapr(w)

%-----
% Частоти послідовних резонансів
[garpmax,fn] = findpeaks(gapr); %пошук екстремумів max gfact
disp ('-----');
');
disp ('Вихідні значення резонансних частот:');
kmaxgapr = length(garpmax); % кількість екстремумів max gapr
if kmaxgapr == 3,
    f01 = f(fn(1))
    f02 = f(fn(2))
    f03 = f(fn(3))
else
    if kmaxgapr == 2,
        disp ('-----');
        disp ('Увага, апроксимована крива має два резонанси:');
        f01 = f(fn(1))
        f02 = f(fn(2))
        f03 = 0
    else
        disp ('-----');
        disp ('Увага, апроксимована крива має один резонанс:');
        f01 = f(fn(1))
        f02 = 0
        f03 = 0
    end
end
disp ('-----');
disp ('Відхилення у Гц вихідних значень резонансних частот від фактичних:');
deviation_f01 = abs(f01-f01fact)
deviation_f02 = abs(f02-f02fact)
deviation_f03 = abs(f03-f03fact)
disp ('-----');
');

% графік на ділянці послідовних резонансів-----
figure(1);
%побудування графіків еміричних даних G(f), апроксимованої функції G(f),
фактичної функції G(f)

```

```

plot(f,gexp,'g-',f,gapr,'b-',f,gfact,'k--
',f(k1L),gapr(k1L),'*r',f(k1R),gapr(k1R),'*r',f(k2L),gapr(k2L),'*r',f(k2R),ga
pr(k2R),'*r',f(k3L),gapr(k3L),'*r',f(k3R),gapr(k3R),'*r');
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абсцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('Експеримент G(f)', 'апроксимація G(f)', 'фактична G(f)');
%коментарі (легенда) на графіках
title('Теоретична апроксимація та експеримент, method fminsearch')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
%xlim([9999900,10000300]); %діапазон значень осі абсцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абсцис X
toc %контроль часу виконання програми

```

Funfim_3R:

```

% Creating an objective function for Fminsearch_3R
% Створення цільової функції для Fminsearch_3R
function opt = Funfim_3R(VU,gexp,w)
r1 = VU(1);
L1 = VU(2)*1e-3;
C1 = VU(3)*1e-15;
r2 = VU(4);
L2 = VU(5)*1e-3;
C2 = VU(6)*1e-15;
r3 = VU(7);
L3 = VU(8)*1e-3;
C3 = VU(9)*1e-15;
ot = (gexp-((r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2)))+(r2./(r2.^2+(w*L2-
1./(w*C2)).^2))+r3./(r3.^2+(w*L3-1./(w*C3)).^2))).^2;
opt = sum(ot,2);
end
%%%%%%%%%% end of file %%%%%%%%%%%

```

Lsqnonlin_3R:

```

% Program for approximation of experimental experiments G, 3 resonances,
method lsqnonlin
% Програма апроксимації експериментальних вимірювань G, 3 резонанси, method
lsqnonlin
tic % контроль часу виконання програми
%-----
% Зчитування еміричних та фактичних даних з файлу fileexpl
s1 = fopen('fileexpl','rb');
a = fread(s1,1,'double'); %fmin, Гц (введене початкове значення частоти
інтервалу вимірювання)
b = fread(s1,1,'double'); %fmax, Гц (введене кінцеве значення частоти
інтервалу вимірювання)
step = fread(s1,1,'double'); %введене значення кроку вимірювання, Гц
disp ('-----
');
disp ('Фактичні, закладені при модулюванні, значення параметрів двох
контурів:');
r1fact = fread(s1,1,'double')
L1fact = fread(s1,1,'double')
C1fact = fread(s1,1,'double')
r2fact = fread(s1,1,'double')
L2fact = fread(s1,1,'double')
C2fact = fread(s1,1,'double')
r3fact = fread(s1,1,'double')
L3fact = fread(s1,1,'double')
C3fact = fread(s1,1,'double')
f01fact = fread(s1,1,'double')
f02fact = fread(s1,1,'double')

```

```

f03fact = fread(s1,1,'double')
disp ('-----
');
disp ('Нормована довжина вектору інтервалу частоти- кількість відліків на
інтервалі вимірювання:');
h = fread(s1,1,'double') %нормована довжина вектору кутової частоти w -
кількість відліків на інтервалі вимірювання
disp ('-----
');
[gexp,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор емпіричних даних
[w,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор значень кутової частоти w
[gfact,i] = fread(s1,h,'double'); %вектор фактичної активної провідності
%-----
% Зчитування початкових умов з файлу initcondit
s5 = fopen('initcondit','rb');
r1 = fread(s5,1,'double');
L1 = fread(s5,1,'double');
C1 = fread(s5,1,'double');
r2 = fread(s5,1,'double');
L2 = fread(s5,1,'double');
C2 = fread(s5,1,'double');
r3 = fread(s5,1,'double');
L3 = fread(s5,1,'double');
C3 = fread(s5,1,'double');
k1L = fread(s5,1,'double');
k1R = fread(s5,1,'double');
k2L = fread(s5,1,'double');
k2R = fread(s5,1,'double');
k3L = fread(s5,1,'double');
k3R = fread(s5,1,'double');
%-----
f= w./(2*pi); %перехід від кутової частоти w до f
%-----
% Апроксимація/оптимізація методом найменших квадратів lsqnonlin
% Приведення змінних до нормованого значення
r1 = r1*1; %нормоване значення r1
L1 = L1*1e3; %нормоване значення L1
C1 = C1*1e15; %нормоване значення C1
r2 = r2*1; %нормоване значення r2
L2 = L2*1e3; %нормоване значення L2
C2 = C2*1e15; %нормоване значення C2
r3 = r3*1; %нормоване значення r2
L3 = L3*1e3; %нормоване значення L2
C3 = C3*1e15; %нормоване значення C2

VU = [r1 L1 C1 r2 L2 C2 r3 L3 C3]; %вектор початкових нормованих значень
options=optimset('MaxFunEvals',200000,'MaxIter',200000,'TolX',1e-
12,'TolFun',1e-10); %параметри оптимізації
lb = [0 0 0 0 0 0 0 0 0]; % нижня границя значень вихідних даних X
ub = [1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000]; % верхня границя значень
вихідних даних X
[X,RESNORM,RESIDUAL,EXITFLAG,OUTPUT]=
lsqnonlin('Funlsq_3R',VU,lb,ub,options,gexp,'w');%обчислення функції
Funlsq_3R
OUTPUT
disp ('-----
-----');
disp ('вихідні значення параметрів двох контурів, отримані при
апроксимації/оптимізації:');
r1 = X(1); %вихідне значення r1
L1p = X(2)*1e-3; %вихідне значення L1
C1p = X(3)*1e-15; %вихідне значення C1
r2 = X(4); %вихідне значення r2

```

```

L2p = X(5)*1e-3; %вихідне значення L2
C2p = X(6)*1e-15; %вихідне значення C2
r3 = X(7); %вихідне значення r2
L3p = X(8)*1e-3; %вихідне значення L2
C3p = X(9)*1e-15; %вихідне значення C2

% перевірка послідовності розташування резонансів по осі частот
LCmax = max([L1p*C1p L2p*C2p L3p*C3p]);
if L1p*C1p == LCmax,
    r1 = r1, L1 = L1p, C1 = C1p
    LCmax1 = max([L2p*C2p L3p*C3p]);
    if L2p*C2p == LCmax1,
        r2 = r2, L2 = L2p, C2 = C2p
        r3 = r3, L3 = L3p, C3 = C3p
    else
        r2 = r3, L2 = L3p, C2 = C3p
        r3 = r2, L3 = L2p, C3 = C2p
    end
end
if L2p*C2p == LCmax,
    r1 = r2, L1 = L2p, C1 = C2p
    LCmax1 = max([L1p*C1p L3p*C3p]);
    if L1p*C1p == LCmax1,
        r2 = r1, L2 = L1p, C2 = C1p
        r3 = r3, L3 = L3p, C3 = C3p
    else
        r2 = r3, L2 = L3p, C2 = C3p
        r3 = r1, L3 = L1p, C3 = C1p
    end
end
if L3p*C3p == LCmax,
    r1 = r3, L1 = L3p, C1 = C3p
    LCmax1 = max([L1p*C1p L2p*C2p]);
    if L1p*C1p == LCmax1,
        r2 = r1, L2 = L1p, C2 = C1p
        r3 = r2, L3 = L2p, C3 = C2p
    else
        r2 = r2, L2 = L2p, C2 = C2p
        r3 = r1, L3 = L1p, C3 = C1p
    end
end
end

disp ('-----');
disp ('відхилення у відсотках вихідних значень параметрів R,L,C від фактичних:');
deviation_r1 = abs((r1/r1fact)-1)*100
deviation_L1 = abs((L1/L1fact)-1)*100
deviation_C1 = abs((C1/C1fact)-1)*100
deviation_r2 = abs((r2/r2fact)-1)*100
deviation_L2 = abs((L2/L2fact)-1)*100
deviation_C2 = abs((C2/C2fact)-1)*100
deviation_r3 = abs((r3/r3fact)-1)*100
deviation_L3 = abs((L3/L3fact)-1)*100
deviation_C3 = abs((C3/C3fact)-1)*100
disp ('-----');

gapr = (r1./(r1.^2+(w*L1-1./(w*C1)).^2))+ (r2./(r2.^2+(w*L2-1./(w*C2)).^2))+ (r3./(r3.^2+(w*L3-1./(w*C3)).^2)); %обчислення апроксимованої функції gapr(w)

```

```

%-----
% Частоти послідовних резонансів
[garpmx,fn] = findpeaks(gapr); %пошук екстремумів max gfact
disp ('-----
');
disp ('Вихідні значення резонансних частот:');
kmaxgapr = length(garpmx); % кількість екстремумів max gapr
if kmaxgapr == 3,
    f01 = f(fn(1))
    f02 = f(fn(2))
    f03 = f(fn(3))
else
    if kmaxgapr == 2,
disp ('-----
');
disp ('Увага, апроксимована крива має два резонанси:');
f01 = f(fn(1))
f02 = f(fn(2))
f03 = 0
    else
disp ('-----
');
disp ('Увага, апроксимована крива має один резонанс:');
f01 = f(fn(1))
f02 = 0
f03 = 0
end
end
disp ('-----
');
disp ('Відхилення у Гц вихідних значень резонансних частот від фактичних:');
deviation_f01 = abs(f01-f01fact)
deviation_f02 = abs(f02-f02fact)
deviation_f03 = abs(f03-f03fact)
disp ('-----
');

% графік на ділянці послідовних резонансів-----
figure(1);
%побудування графіків емпіричних даних G(f), апроксимованої функції G(f),
фактичної функції G(f)
plot(f,gexp,'g-',f,gapr,'b-',f,gfact,'k--
',f(k1L),gapr(k1L),'*r',f(k1R),gapr(k1R),'*r',f(k2L),gapr(k2L),'*r',f(k2R),ga
pr(k2R),'*r',f(k3L),gapr(k3L),'*r',f(k3R),gapr(k3R),'*r');
xlabel('f, (Гц)'); %найменування осі абцис X
ylabel('G(f), (См)'); %найменування осі ординат Y
legend ('експеримент G(f)', 'апроксимація G(f)', 'фактична G(f)');
%коментарі(легенда) на графіках
title('Теоретична апроксимація та експеримент, method lsqnonlin')
%найменування заголовку графіків
grid on %включення координатної сітки на графіках
xlim([9999900,10000300]); %діапазон значень осі абцис X для q=1e6
xlim([a,b]); %діапазон значень осі абцис X
toc %контроль часу виконання програми

```

Funlsq_3R:

```

% Creating an objective function for Lsqnonlin_3R
% Створення цільової функції для Lsqnonlin_3R
function opt = Funlsq_3R(VU,gexp,w)
r1 = VU(1);
L1 = VU(2)*1e-3;

```

