

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра РАДІОІНЖЕНЕРІЇ**

«На правах рукопису»
УДК 621.3.061

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Сергій ЛІТВІНЦЕВ
«22» _____ 12 _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

**на тему: «Лабораторний макет для дослідження частотних властивостей
мостових прохідних чотириполюсників»**

Виконав:

студент II курсу, групи РІ-41 мп

Рагульський Дмитро Олександрович

Науковий керівник:

к.т.н., ст. викладач Булашенко Андрій Васильович

Рецензент:

к.т.н., доцент Піддубний Володимир Олексійович



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

Студент _____



**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
спеціальність 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”
Освітньо-професійна програма “Інформаційна та комунікаційна
радіоінженерія”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РІ

Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«08» 09 2025 року

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Рагульському Дмитру Олександровичу

1. Тема дисертації: «Лабораторний макет для дослідження частотних властивостей мостових прохідних чотириполіусників»

Науковий керівник Булашенко Андрій Васильович, к.т.н., ст. викл.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «11» 11 2025 р. № 4895-с

2. Термін подання студентом дисертації 22 грудня 2025 року

3. Об'єкт дослідження: амплітудно-частотні характеристики схем мостових прохідних чотириполіусників.

4. Вихідні дані: лабораторний макет для дослідження частотних характеристик мостових прохідних чотириполіусників з діапазоном частот від 100 Гц – 100 кГц, друкована плата розмірами не більше 250x150 мм; корпус лабораторного макету – не більше 300x180x60 мм.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) огляд існуючих рішень; 2) аналіз та обґрунтування вибору елементної бази;
- 3) проектування схем в Multisim та MathCAD; 4) створення та дослідження

експериментальних макетів схем; 5) проектування друкованої плати; 6) проектування корпусу лабораторного макету.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

складальний кресленик плати; схема електрична принципова; креслення корпусу, презентація в PowerPoint.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Дата видачі завдання: 8.09.2025.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	до 14.09.2025	виконано
2	Розрахунок частотних характеристик у MathCAD та моделювання схем у програмі Multisim	до 28.09.2025	виконано
3	Аналіз та обґрунтування вибору елементної бази	до 08.10.2025	виконано
4	Експериментальне проектування схем на макетних платах та дослідження їх частотних характеристик	до 01.11.2025	виконано
5	Порівняння експериментальних та теоретичних частотних характеристик	до 05.11.2025	виконано
6	Проектування друкованої плати в Altium Designer та корпусу в SolidWorks	до 01.12.2025	виконано
7	Створення необхідних креслень до проекту	до 10.12.2025	виконано
8	Оформлення роботи та створення презентації	до 19.12.2025	виконано

Студент



Дмитро РАГУЛЬСЬКИЙ

Керівник



Андрій БУЛАШЕНКО

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка магістерської дисертації містить 94 сторінки, 83 рисунки, 17 таблиць, 2 формули, 20 посилань та 8 додатків.

У дипломному проєкті виконано огляд переваг та недоліків існуючих навчальних стендів та макетів, розроблено електричні принципові схеми макету та проведено моделювання схем в програмному середовищі Multisim.

Експериментальні дослідження виконано на макетних платах із подальшим аналізом отриманих амплітудно-частотних характеристик.

Розглянуто причини розбіжностей між теоретичними, модельними та експериментальними результатами з урахуванням реальних параметрів елементів і похибок вимірювань.

У програмному середовищі Altium Designer виконано проєктування друкованої плати лабораторного макету, а у програмі SolidWorks розроблено корпус пристрою.

Отримані результати дозволяють виготовити прототип макету та використовувати його в навчальному процесі.

Ключові слова: пасивний чотириполіусник, лабораторний макет, частотні характеристики, експериментальні дослідження, друкована плата.

ANNOTATION

The explanatory note of the master's thesis consists of 94 pages, 83 figures, 17 tables, 2 formulas, 20 references, and 8 appendices.

The thesis includes a review of the advantages and disadvantages of existing educational laboratory stands and prototypes, the development of electrical schematic diagrams of the prototype, and circuit simulation performed in the Multisim software environment.

Experimental studies were carried out on breadboards, followed by an analysis of the obtained amplitude–frequency characteristics.

The reasons for discrepancies between theoretical, simulation, and experimental results are discussed, taking into account the real parameters of components and measurement errors.

The printed circuit board of the laboratory prototype was designed using the Altium Designer software, and the device enclosure was developed in SolidWorks.

The obtained results make it possible to manufacture a prototype of the laboratory setup and use it in the educational process.

Keywords: passive two-port network, laboratory prototype, frequency characteristics, experimental studies, printed circuit board.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської дисертації

на тему: «Лабораторний макет для дослідження частотних властивостей
мостових прохідних чотириполюсників»

Київ – 2025 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	12
1.1 Набірні поля	12
1.2 Комбіновані макети	13
1.3 Стенд УІЛС-1	14
1.4 Порівняння аналогів.....	15
2. РОЗРАХУНКИ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНИХ ЧОТИРИХПОЛЮСНИКІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ.....	18
2.1 Розрахунок частотних характеристик схем у програмному середовищі MathCAD	18
2.2 Моделювання схем у програмному середовищі Multisim	19
2.3 Світлодіодна індикація та комутація елементів схеми	38
3. АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ	41
3.1 Резистори	41
3.2 Котушки індуктивності	43
3.3 Конденсатори	44
3.4 Перемикачі.....	46
3.5 Світлодіоди.....	47
3.6 Роз'єми.....	50
4. ЕКСПЕРИМЕНТ ПРОЄКТУВАННЯ СХЕМ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА МАКЕТНИХ ПЛАТАХ.....	54
4.1 Збірка схем на макетних платах та зняття АЧХ.....	54

4.2 Порівняння результатів частотних характеристик отриманих експериментально та у програмному середовищі Multisim	61
5. ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ТА КОРПУСУ	70
5.1 Проєктування друкованої плати в програмному середовищі Altium Designer	70
5.1.1 Бібліотека компонентів	70
5.1.2 Створення схеми електричної принципової [4]	74
5.1.3 Розрахунок оптимальних розмірів друкованої плати [7]	76
5.1.4 Трасування друкованої плати	79
5.1.5 Створення файлів технологічного процесу	82
5.2 Проєктування корпусу в програмному середовищі SolidWorks ...	86
ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	92
ДОДАТОК А	95
ДОДАТОК Б.....	108
ДОДАТОК В.....	109
ДОДАТОК Г.....	111
ДОДАТОК Г.....	113
ДОДАТОК Д	114
ДОДАТОК Е.....	116
ДОДАТОК Ж.....	118

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ДП – друкована плата;

LED (від англ. light-emitting diode) – світлодіод;

СЕП – схема електрична принципова;

DIP (від англ. Dual In-line Package) - корпус с двома рядами виводів;

УГП – умовне графічне позначення;

ФНЧ – фільтр нижніх частот;

ФВЧ – фільтр верхніх частот.

ВСТУП

Розвиток електронних комунікацій та радіотехнічних систем зумовлює необхідність постійного удосконалення практичної підготовки фахівців у галузі високочастотної техніки, схемотехніки та радіоелектроніки. Одним із базових предметів для фахівців зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка є дисципліни «Основи теорії кіл» та «Процеси в лінійних електронних схемах». В рамках вивчення цих курсів здійснюється цикл лабораторних робіт. Одним із напрямів навчання є дослідження частотних властивостей пасивних чотириполіусників, зокрема мостових прохідних структур, що використовуються у фільтрах, підсилювачах, лініях зв'язку та вимірювальних пристроях. Ефективність засвоєння цього матеріалу значною мірою залежить від доступності якісної лабораторної бази, яка дозволяє не лише теоретично розглядати поведінку схем, але й експериментально досліджувати їх частотні характеристики в схемах чотириполіусників на сучасній елементній базі.

У більшості навчальних закладів зберігаються лабораторні макети, створені на попередніх поколіннях елементної бази. Вони здатні забезпечувати типові лабораторні вимірювання, однак мають низку обмежень: низьку гнучкість у зміні параметрів елементів, відсутність індикації режимів роботи, недостатню компактність або великі габарити та складність швидкого перемикавання між різними конфігураціями схем. Аналіз наявних рішень свідчить, що такі макети залишаються працездатними та дозволяють виконувати базові дослідження, проте їх функціональність не повністю відповідає сучасним вимогам до лабораторного обладнання у сфері сучасної електроніки.

Стан наявних лабораторних установок підкреслює необхідність створення більш універсального та компактного лабораторного макету, у якому передбачено можливість швидкої зміни елементів, наочної світлодіодної індикації та забезпечення широкого діапазону досліджень

частотних характеристик. Особливої уваги потребує можливість регулювання числових значень пасивних компонентів — резистивних, ємнісних та індуктивних — адже саме ці зміни дають змогу студентам спостерігати, як конкретні номінали впливають на амплітудно-частотну або фазо-частотну характеристики чотириполюсника.

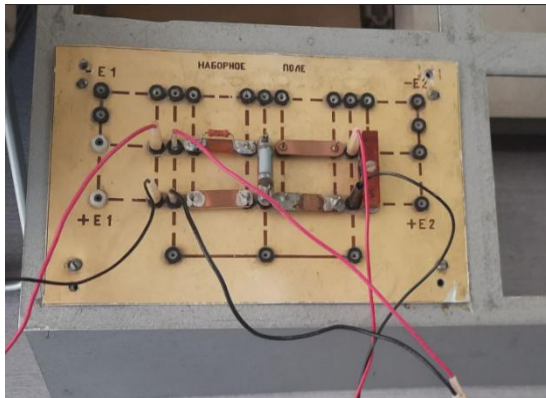
Таким чином, актуальність роботи визначається потребою в оновленні та розширенні матеріально-технічної бази лабораторій, що забезпечують підготовку студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка. Створення нового лабораторного макета для дослідження частотних властивостей мостових прохідних чотириполюсників дозволить суттєво підвищити якість лабораторних занять. Також розроблений макет забезпечить студентам інструмент для наочного засвоєння принципів роботи радіoeлектронних схем із сучасною компонентною базою та дозволить порівнювати теоретичні моделі із реальними.

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

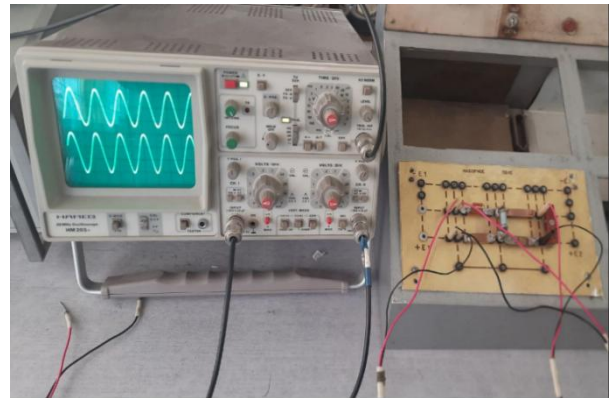
Сучасні компоненти дозволяють створювати більш компактні, універсальні та зручні макети. Мета оновлення лабораторної бази — замінити старі набори новими макетами, що розширюють спектр експериментів, підвищують наочність і зручність роботи, а також дозволяють ефективніше досліджувати частотні характеристики схем.

1.1 Набірні поля

На рис. 1.1 наведено приклад набірного поля, що використовується в лабораторії основ радіоелектроніки (аудиторія №324, радіотехнічний факультет) в дисциплінах: «Основи теорії кіл» та «Процеси та лінійних електронних колах».



а)



б)

Рисунок 1.1 – Приклад набірного поля

Монтажні поля дозволяють студентам самостійно збирати схеми з окремих вивідних компонентів. Це гнучкий інструмент для практичного навчання.

До основних переваг відносяться:

- універсальність та свобода складання схем;
- швидка заміна компонентів;
- наочне вивчення електричних з'єднань;

Також є і недоліки:

- ймовірність монтажних помилок;
- відсутність LED-індикації;
- необхідність збирати кожен конфігурацію вручну;
- великі габарити при великій кількості елементів;
- неможильні.

Переваги нового макета:

- чотири змонтовані схеми чотирьохполюсників у одному корпусі;
- регулювання параметрів через потенціометри та магазини індуктивностей та ємностей;
- LED-індикація тих елементів в магазині, які безпосередньо ввімкнені;
- відсутність монтажних помилок;
- компактність і зручність зберігання.

1.2 Комбіновані макети

Комбіновані макети поєднують наявність схем на панелі та можливість перемикання схем механічними тумблерами, що дозволяє виконувати кілька лабораторних робіт на одному пристрої. Нижче продемонстровано комбінований макет з факультету електроніки (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад комбінованого макету

1.3 Стенд УІЛС-1

Навчальний лабораторний стенд УІЛС–1 призначений для виконання лабораторних робіт з електротехніки та теорії електричних кіл на початкових етапах підготовки студентів. Загальний вигляд та структурні елементи стенда наведені на рисунку 1.3

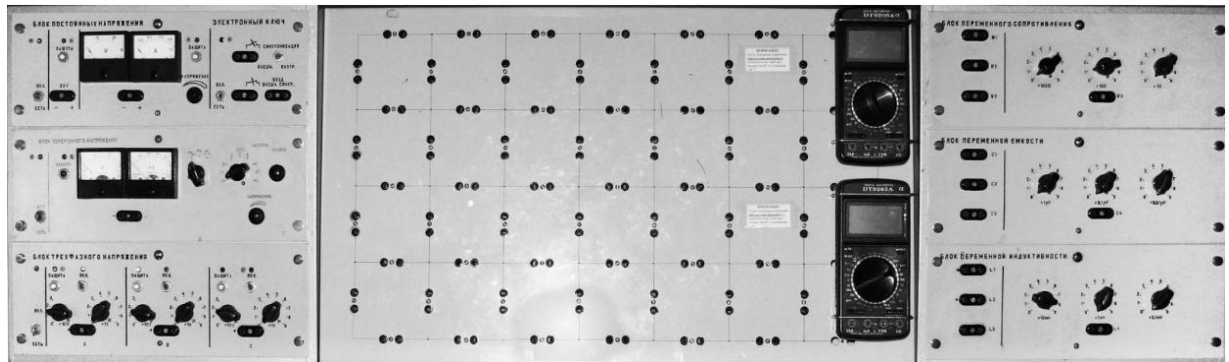


Рисунок 1.3 – Навчальний лабораторний стенд УІЛС–1

Стенд реалізує принцип фізичного моделювання електричних кіл із використанням реальних пасивних елементів, що дозволяє безпосередньо спостерігати вплив параметрів схеми на її режими роботи. Конструктивно стенд складається з пульта керування, набірного поля, блоків джерел живлення та електронного ключа, а також комплекту з'єднувальних проводів.

Набірне поле забезпечує можливість формування електричних схем шляхом з'єднання окремих вузлів за допомогою штекерних перемичок. Такий підхід сприяє розвитку практичних навичок монтажу та розумінню топології електричних з'єднань, оскільки зібрана схема візуально відповідає принциповій.

До переваг стенда УІЛС–1 можна віднести:

- універсальність та можливість реалізації широкого кола електротехнічних задач;
- роботу з реальними джерелами постійної, змінної та трифазної напруги;
- високу наочність процесу складання схем;

- електричний захист і безпечні режими експлуатації.

Разом з тим, стенд має і певні обмеження:

- значні габаритні розміри та стаціонарне виконання;
- відсутність вбудованої індикації активних елементів схеми;
- необхідність ручного монтажу кожної конфігурації, що підвищує імовірність помилок;
- складність оперативного перемикання між різними варіантами схем.

Зазначені особливості обумовлюють доцільність використання стенда УІЛС–1 як базового навчального засобу, водночас створюючи передумови для розробки більш компактних та функціонально орієнтованих лабораторних макетів нового покоління.

1.4 Порівняння аналогів

У більшості українських університетів, де проводиться підготовка фахівців у галузі 17 Електроніка та телекомунікації, лабораторні роботи з дисциплін, пов'язаних з аналізом електричних кіл, виконуються із застосуванням класичних набірних полів та універсальних стендів. На кафедрах факультетів КПП та не тільки подібні макети використовуються багато років і добре зарекомендували себе як прості й надійні засоби навчання. Вони дозволяють студентам отримати базові практичні навички монтажу схем, роботи з електронними компонентами та проведення вимірювань.

Разом з тим, такі системи мають природні конструктивні обмеження. Класичне набірне поле передбачає ручний монтаж кожної схеми, що потребує часу, особливо під час виконання лабораторних робіт, які включають частотні дослідження або побудову кількох варіантів структур у межах одного заняття. Контактні групи з часом зношуються, що впливає на повторюваність результатів, а переустановка елементів інколи ускладнює роботу

студентів, особливо під час дослідження чотириполіусників, де точність значень параметрів відіграє критично важливу роль.

Варто наголосити, що наявні набірні поля та стенди не можна вважати нефункціональними. Вони й надалі забезпечують високу якість навчального процесу та дозволяють формувати у студентів фундаментальні знання в галузі електроніки. Основна ідея полягає не у заміні існуючої матеріальної бази, а в її доповненні сучасним макетом, який забезпечує зручніші умови для виконання окремих видів робіт — зокрема, для дослідження мостових прохідних чотириполіусників.

Новий макет розроблений з урахуванням потреб лабораторних занять і включає сучасні компоненти у DIP-виконанні, магазини індуктивностей та ємностей, потенціометри для плавного регулювання параметрів, LED-індикацію активних ділянок схеми та компактне компонування. Для студента це означає меншу кількість ручних операцій, стабільнішу якість контактів і можливість оперативно змінювати конфігурацію до чотирьох різних мостових структур.

Щоб системно порівняти традиційні рішення з новим макетом, у наведеній нижче таблиці (табл. 1.4) узагальнено основні критерії, які безпосередньо впливають на навчальний процес та зручність студентів під час виконання лабораторних робіт.

Таблиця 1.4 – порівняння існуючих лабораторних установок з новим макетом

Критерій	Існуючі набірні поля (РТФ, ФЕЛ, Стенд УІЛС для ФЕА)	Новий лабораторний макет мостових прохідних чотириполіусників
Зручність використання студентами	Забезпечують формування базових практичних навичок монтажу; підготовка до роботи може займати	Підготовка до роботи займає мінімум часу; компонування макета дозволяє одразу переходити до

	значний час	вимірювань
Гнучкість у навчальному процесі	Підходять для широкого спектра базових лабораторних робіт з електротехніки	Орієнтовані на дослідження частотних властивостей мостових прохідних чотириполосників
Підготовка та зміна конфігурації схеми	Потребують ручного складання схеми або перемикачів блоків	Конфігурація змінюється перемикачами, а параметри — потенціометрами та магазинами
Повторюваність вимірювань	Результати можуть залежати від якості контактів і точності монтажу	Стаціонарний монтаж забезпечує стабільні та відтворювані результати
Компактність та організація робочого місця	Часто потребують значної кількості з'єднувальних проводів і робочого простору	Компактна конструкція, мінімальна кількість зовнішніх з'єднань, наявна LED-індикація
Орієнтація на сучасні освітні потреби	Відповідають вимогам класичної лабораторної підготовки	Доповнюють існуючу матеріальну базу за рахунок підвищеної наочності

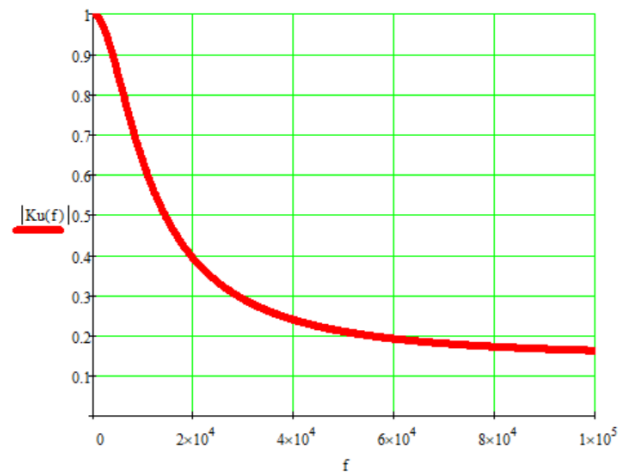
Як видно з порівняння, новий лабораторний макет не замінює існуючі рішення, а розширює їх можливості, забезпечуючи студентам більш комфортні умови для виконання лабораторних робіт, пов'язаних із побудовою та аналізом частотних характеристик. Використання потенціометрів, магазинів індуктивностей та ємностей, DIP-компонентів і компактної структури дозволяє отримувати точні та повторювані результати навіть у складних режимах дослідження, що підвищує якість навчального процесу.

Єдиним суттєвим недоліком нового макету є те, що для того щоб виміряти опір на потенціометрах потрібен додатковий спеціальний вимірювальний прилад – мультиметр.

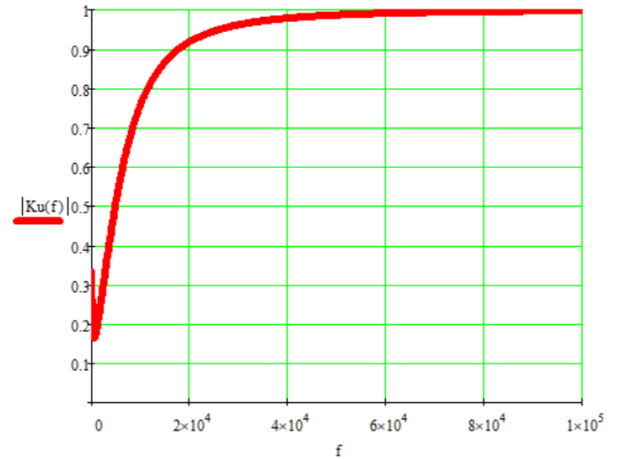
2. РОЗРАХУНКИ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНИХ ЧОТИРЬОХПОЛЮСНИКАХ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ

2.1 Розрахунок частотних характеристик схем у програмному середовищі MathCAD

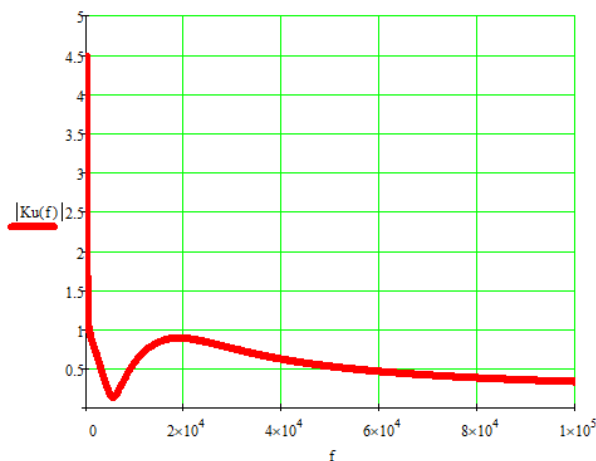
На рис. 2.1 а - г зображені залежності модулів (АЧХ) коефіцієнтів передачі від частоти. Розрахунки, що здійснювалися у програми MathCAD за допомогою схемних функцій для схем 1-4 представлені у Додатку Ж.



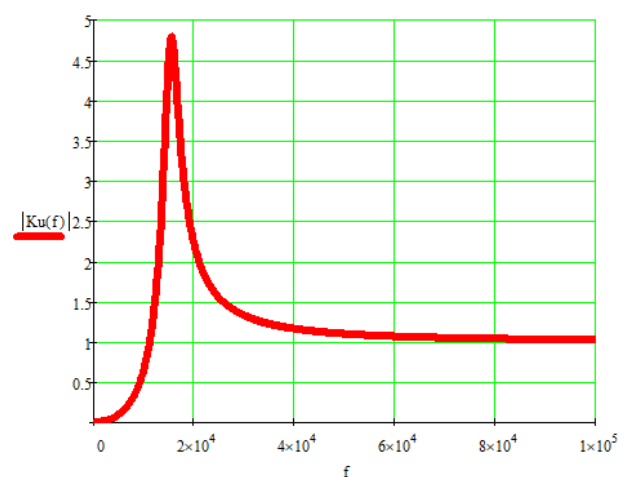
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.1 – Залежність модулів від частоти: а) схема 1; б) схема 2; в) схема 3; г) схема 4

2.2 Моделювання схем у програмному середовищі Multisim

У програмному середовищі Multisim виконано схемотехнічне моделювання чотирьох варіантів пасивних мостових прохідних чотириполіусників відповідно до обраної структури лабораторного макета (рис. 2.2 та рис. 2.3).

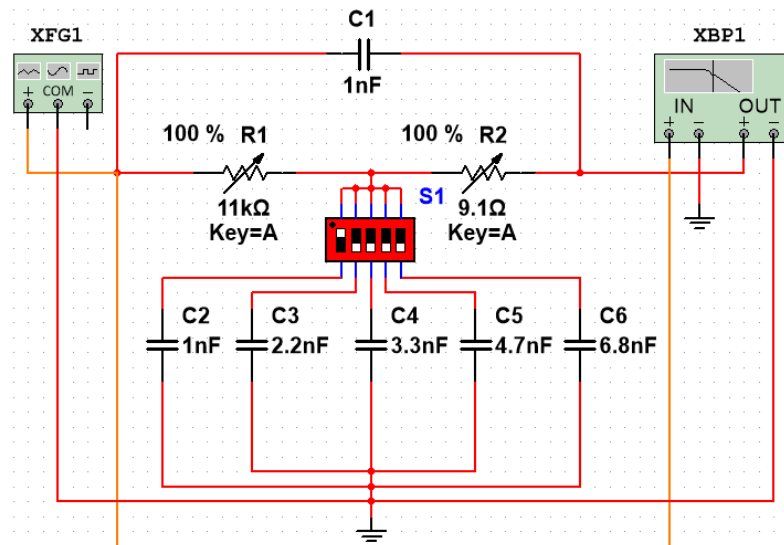


Рисунок 2.2 – Розроблена схема 1

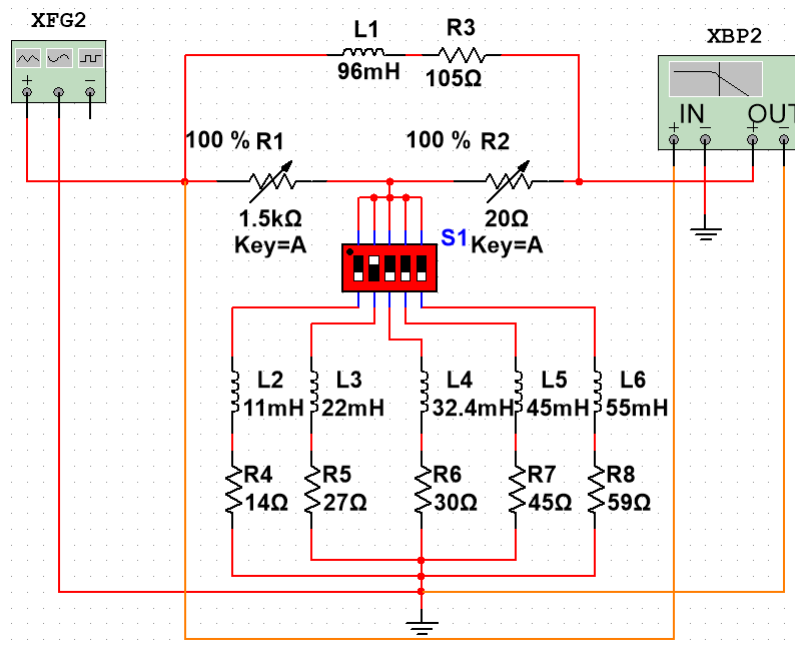


Рисунок 2.3 – Розроблена схема 2

Оскільки бібліотечні компоненти Multisim є ідеальними, у кожену з гілок схеми введено додаткові резистивні елементи, які моделюють еквівалентні втрати в котушках індуктивності, конденсаторах і з'єднувальних провідниках. Таке рішення дозволяє більш точно відтворити реальні умови роботи електричних кіл. Для цього було виміряно реальні котушки індуктивності та враховано їх внутрішній опір втрат при комп'ютерному моделюванні. У фізичному лабораторному макеті ці втрати будуть визначатися внутрішніми параметрами застосованих елементів, тому введення додаткових резисторів у реальній схемі не передбачається.

Нижче представлені об'єднані схеми спочатку з індуктивностями (рис. 2.4) та спершу з ємностями (рис. 2.5).

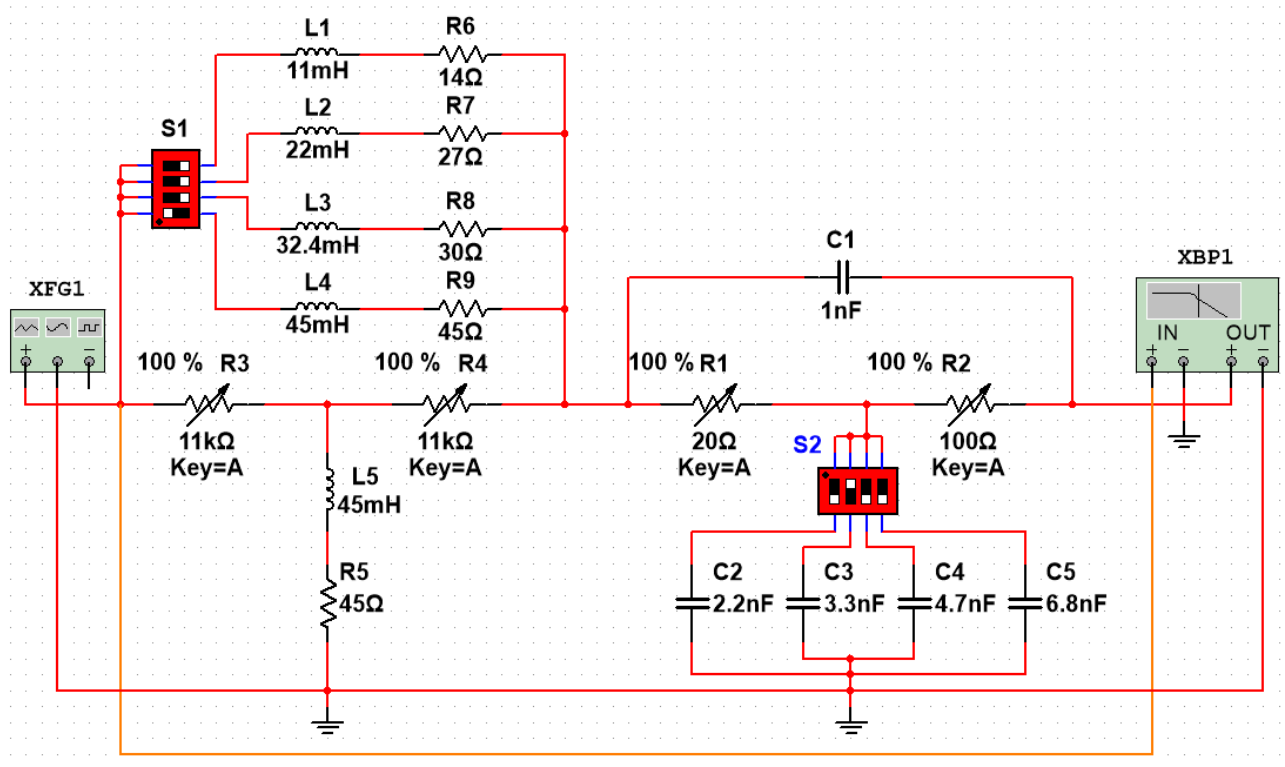


Рисунок 2.4 – Розроблена об'єднана схема 3 в програмі Multisim

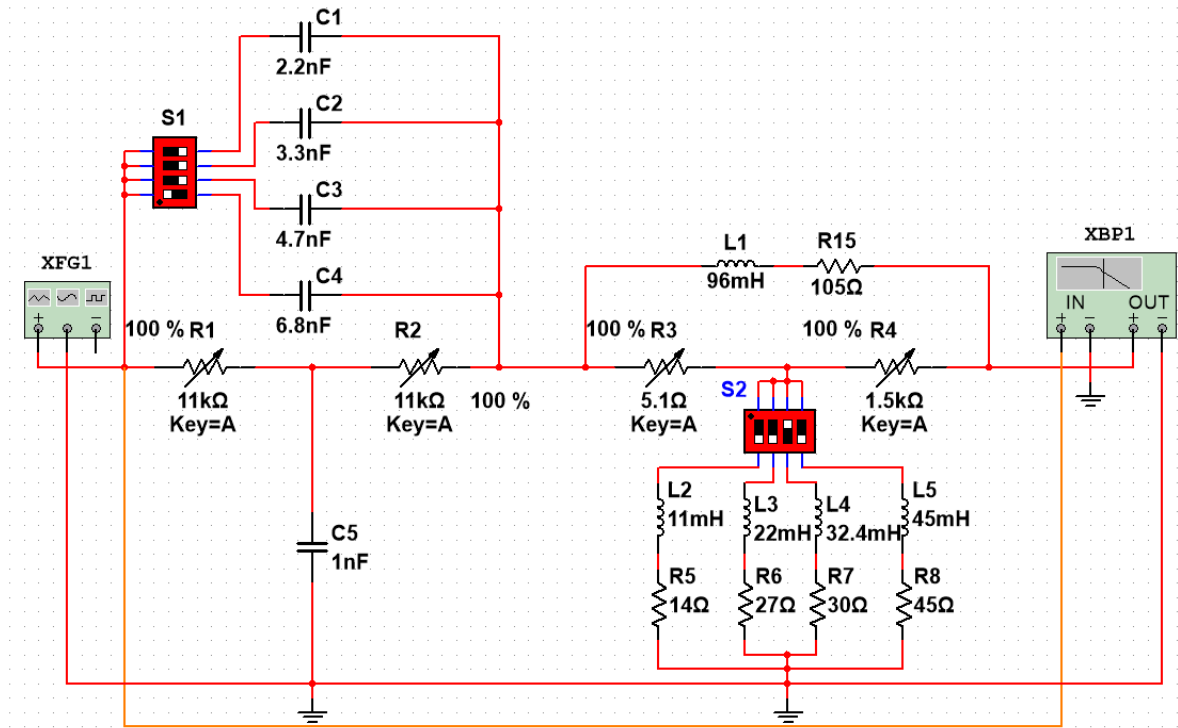


Рисунок 2.5 – Розроблена об'єднана схема 4 в програмі Multisim

Для формування вхідного сигналу у схемах використовується функціональний генератор напруги XFG (рис. 2.6), який моделює роботу реального лабораторного генератора синусоїдальних коливань. Для зручності обрахунків було обрано значення вхідної напруги рівним 1В.

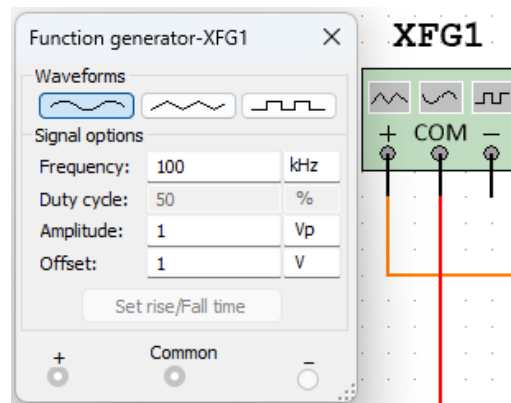


Рисунок 2.6 – Задані параметри генератора вхідного сигналу XFG

Керування конфігурацією електричних кіл у процесі моделювання реалізовано за допомогою перемикачів, які дозволяють оперативно змінювати структуру чотириполюсника без повної перебудови схеми. Для регулювання активних параметрів у роботі використано потенціометри, що дає змогу плавно змінювати опори гілок і спостерігати зміну частотних характеристик у

реальному часі. Реактивні параметри змінюються за допомогою магазинів ємностей та індуктивностей, що забезпечує широкий діапазон налаштування резонансних частот і добротності кіл.

Дані схеми відповідають різним конфігураціям елементної бази та дозволяють дослідити вплив активних, реактивних і комбінованих навантажень на частотні властивості чотириполосника. Окремі варіанти реалізовані на основі резистивно-ємнісних, резистивно-індуктивних та комбінованих RC та RL структур, що забезпечує можливість комплексного аналізу частотних характеристик.

Для реєстрації амплітудно-частотних характеристик до всіх чотирьох схем застосовано віртуальний вимірювальний прилад Bode Plotter. Використання даного інструмента дає змогу проводити автоматизований аналіз коефіцієнта передачі чотириполосника у широкому діапазоні частот та здійснювати порівняння результатів комп'ютерного моделювання з теоретичними розрахунками, виконаними в середовищі MathCAD, а також порівнювати з результатами отриманими експериментально.

Нижче представлені графіки АЧХ схем 1 (з ємностями), 2 (з індуктивностями), 3 (спочатку з індуктивностями), 4 (спочатку з ємностями) в залежності від впливу зміни номіналів елементів.

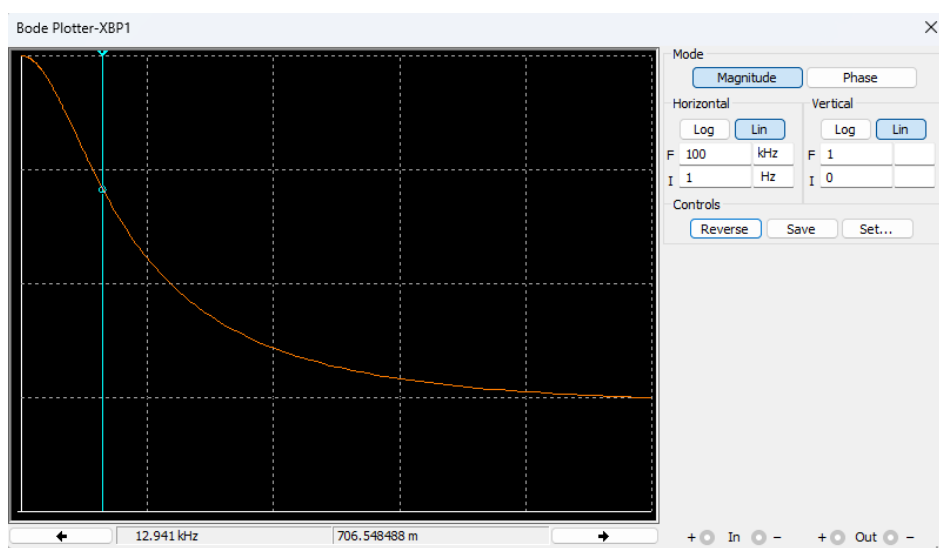


Рисунок 2.7 – АЧХ схеми 1. $R1 = 3 \text{ кОм}$; $R2 = 100 \text{ Ом}$; $C1 = 1 \text{ нФ}$; $C2 = 3,3 \text{ нФ}$

Значення частоти на рівні $U = 0,707 \text{ В}$ (-3 дБ) становить $f = 12,9 \text{ кГц}$.

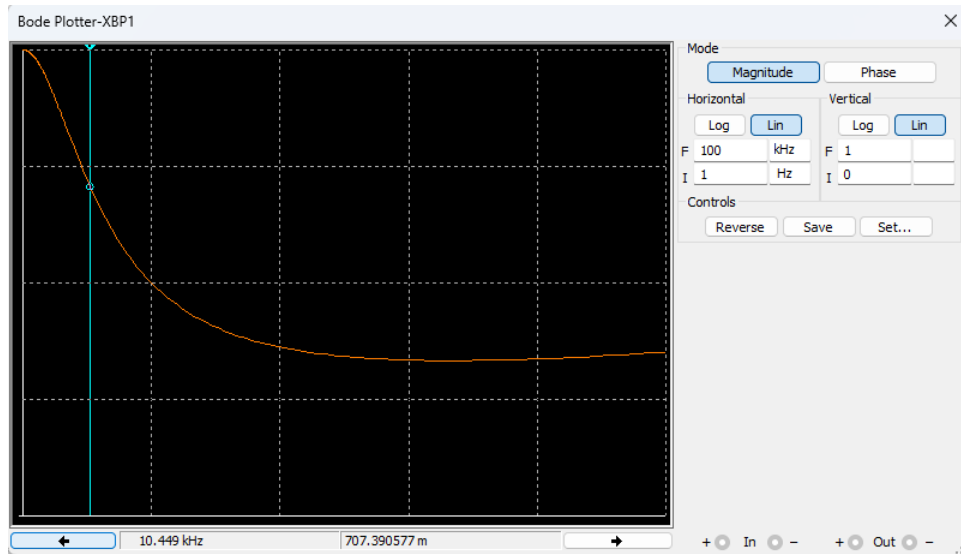


Рисунок 2.8 – АЧХ схеми 1. $R1 = 5,1 \text{ кОм}$; $R2 = 510 \text{ Ом}$; $C1 = 1 \text{ нФ}$; $C2 = 2,2 \text{ нФ}$

На рис. 2.8 видно, що частота на рівні $U = 0,707 \text{ В}$ складає $f = 10,4 \text{ кГц}$.

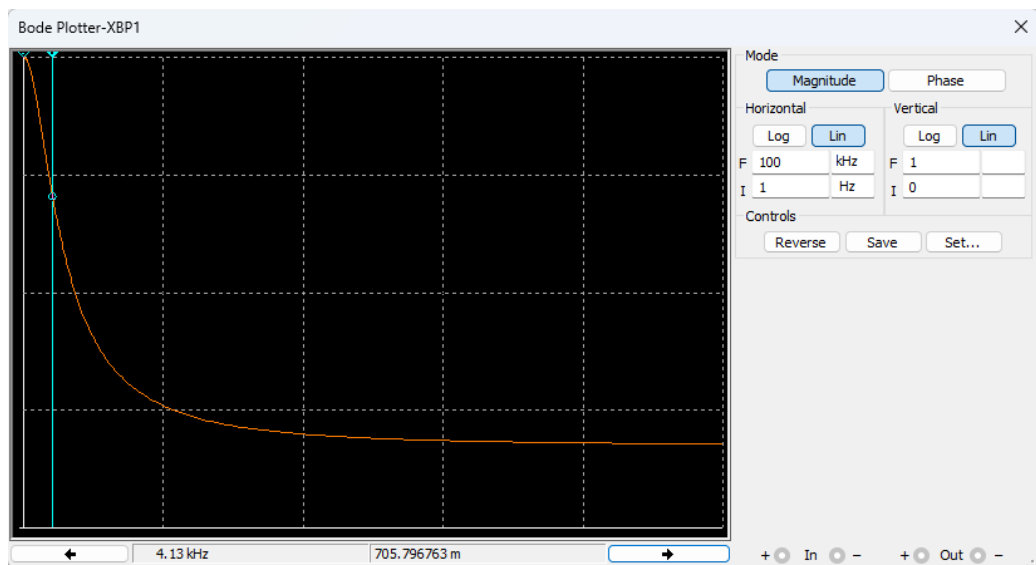


Рисунок 2.9 – АЧХ схеми 1. $R1 = 7 \text{ кОм}$; $R2 = 20 \text{ Ом}$; $C1 = 1 \text{ нФ}$; $C2 = 4,7$

На рис. 2.9 значення частоти складає $f = 4,1 \text{ кГц}$ на рівні $U = 0,707 \text{ В}$.

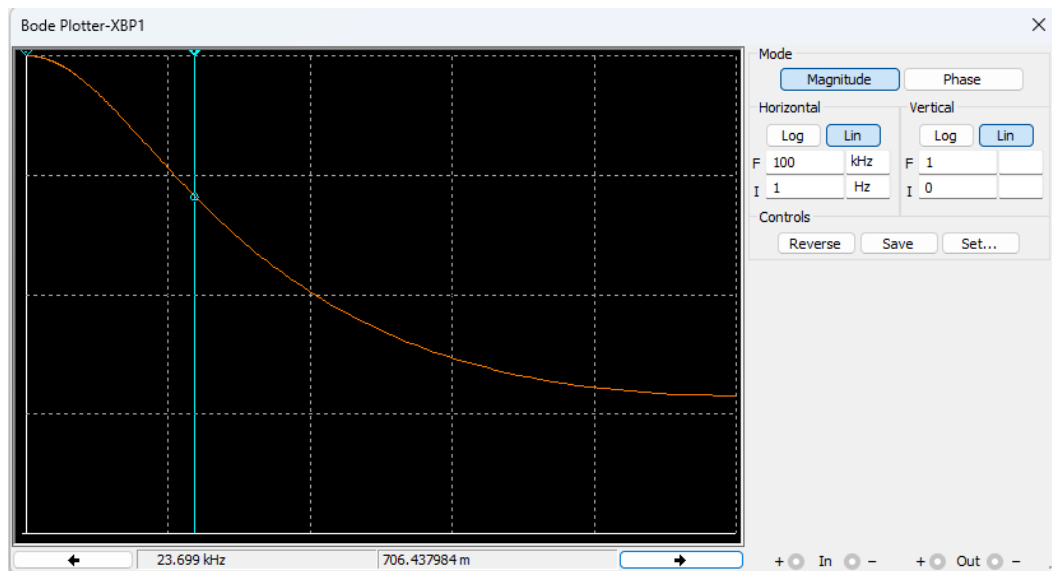


Рисунок 2.10 – АЧХ схеми 1. $R1 = 1.5 \text{ кОм}$; $R2 = 510 \text{ Ом}$; $C1 = 1 \text{ нФ}$; $C2 = 3,3 \text{ нФ}$

На рис. 2.10 видно, що значення частоти на рівні $U = 0,707 \text{ В}$ становить $f=23,6 \text{ кГц}$.

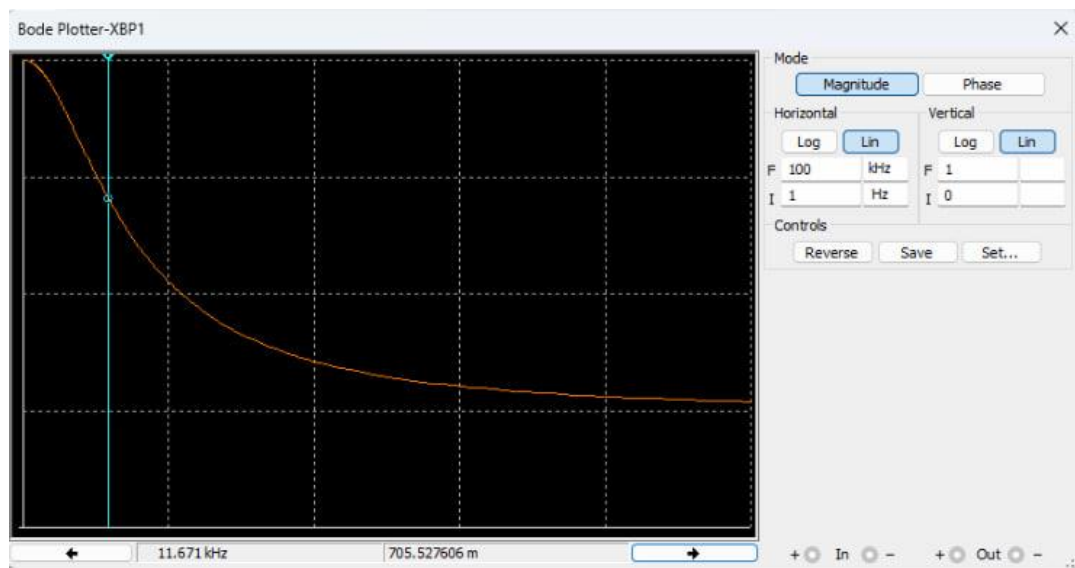


Рисунок 2.11– АЧХ схеми 1. $R1 = 11 \text{ кОм}$; $R2 = 9,1 \text{ Ом}$; $C1 = 1 \text{ нФ}$; $C2 = 1 \text{ нФ}$

На рис. 2.11 видно, що на рівні $U = 0,707 \text{ В}$, частота $f = 11,5 \text{ кГц}$.

Отже, на рис. 2.7 – 2.11 значення частоти на рівні приблизно $0,707 \text{ В}$ різна на кожному графіку це і доводить вплив кожного елемента на вигляд АЧХ схеми. Структура графіків залишається наближеною одна до одної, та нагадує ФНЧ.

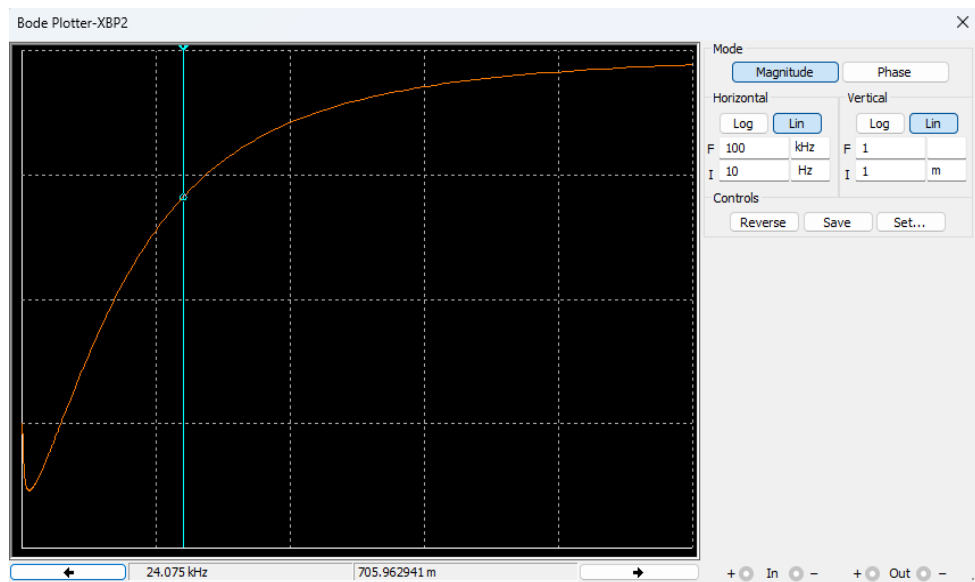


Рисунок 2.12 – АЧХ схеми 2. $R1 = 1,5 \text{ кОм}$; $R2 = 20 \text{ Ом}$; $L1 = 96 \text{ мГн}$; $L2 = 11 \text{ мГн}$

На рис. 2.12 видно, що напруга $U = 0,707 \text{ В}$ відповідає частоті $f = 24 \text{ кГц}$.

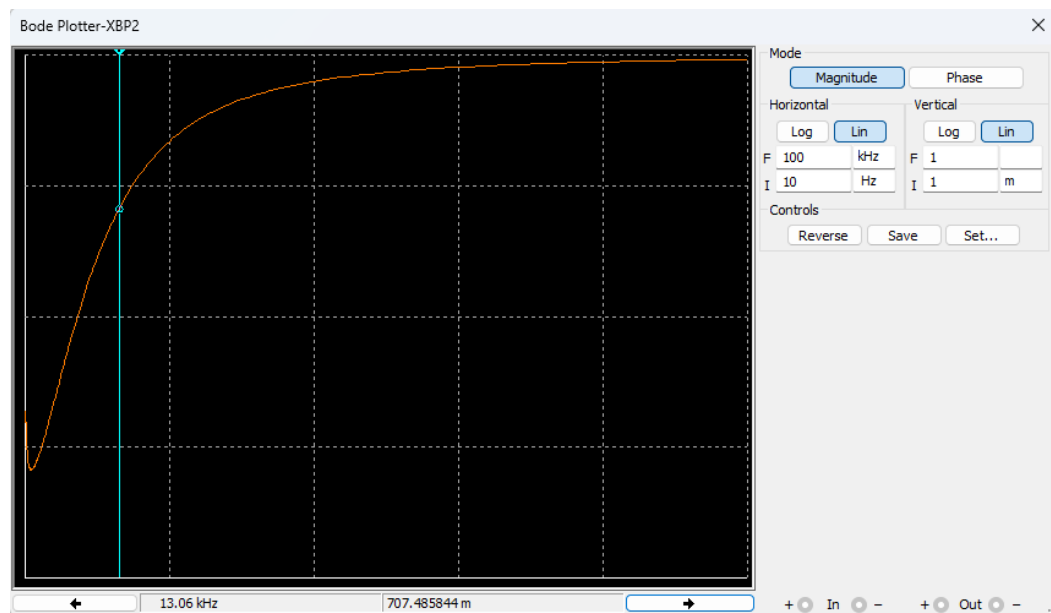


Рисунок 2.13 – АЧХ схеми 2. $R1 = 1,5 \text{ кОм}$; $R2 = 20 \text{ Ом}$; $L1 = 96 \text{ мГн}$; $L2 = 22 \text{ мГн}$

На рис. 2.13 видно, що рівень напруги $U = 0,707 \text{ В}$ відповідає частоті $f = 13 \text{ кГц}$.

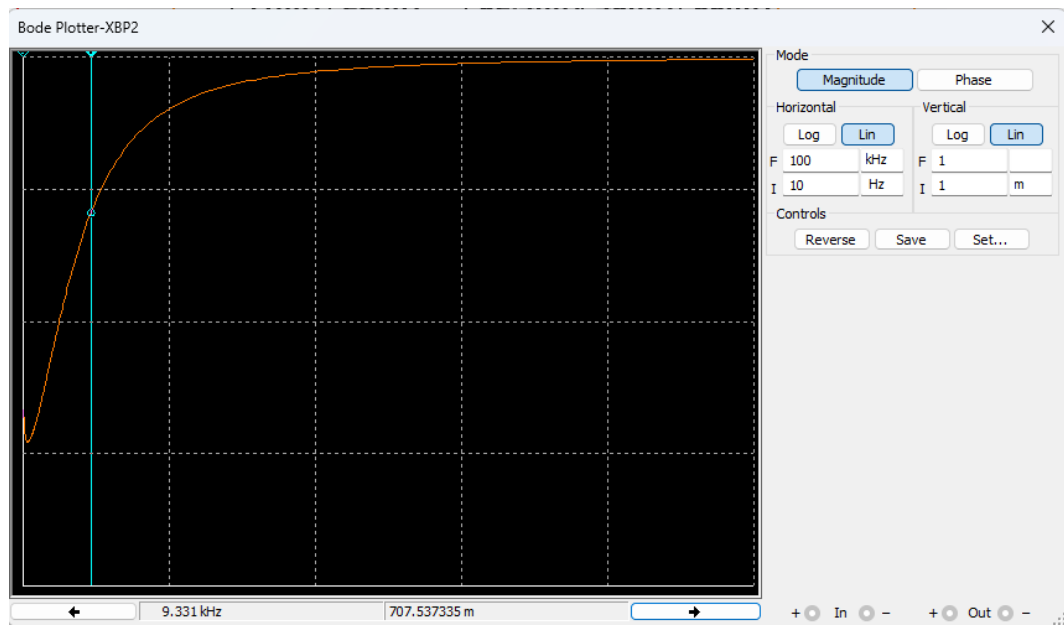


Рисунок 2.14 – АЧХ схеми 2. $R1 = 1,5 \text{ кОм}$; $R2 = 20 \text{ Ом}$; $L1 = 96 \text{ мГн}$; $L2 = 32,4 \text{ мГн}$

На рис. 2.14 значення частоти складає $f = 9,3 \text{ кГц}$ на рівні $U = 0,707 \text{ В}$.

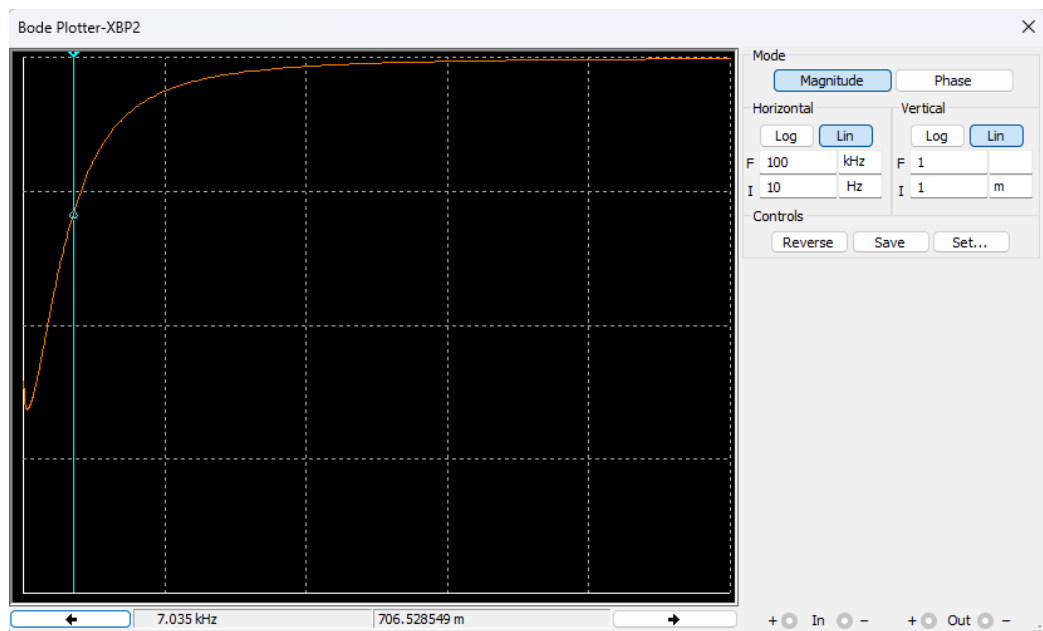


Рисунок 2.15 – АЧХ схеми 2. $R1 = 1,5 \text{ кОм}$; $R2 = 20 \text{ Ом}$; $L1 = 96 \text{ мГн}$; $L2 = 45 \text{ мГн}$

На рис. 2.15 значення частоти $f = 7 \text{ кГц}$ знаходиться на рівні напруги $U = 0,707 \text{ В}$.

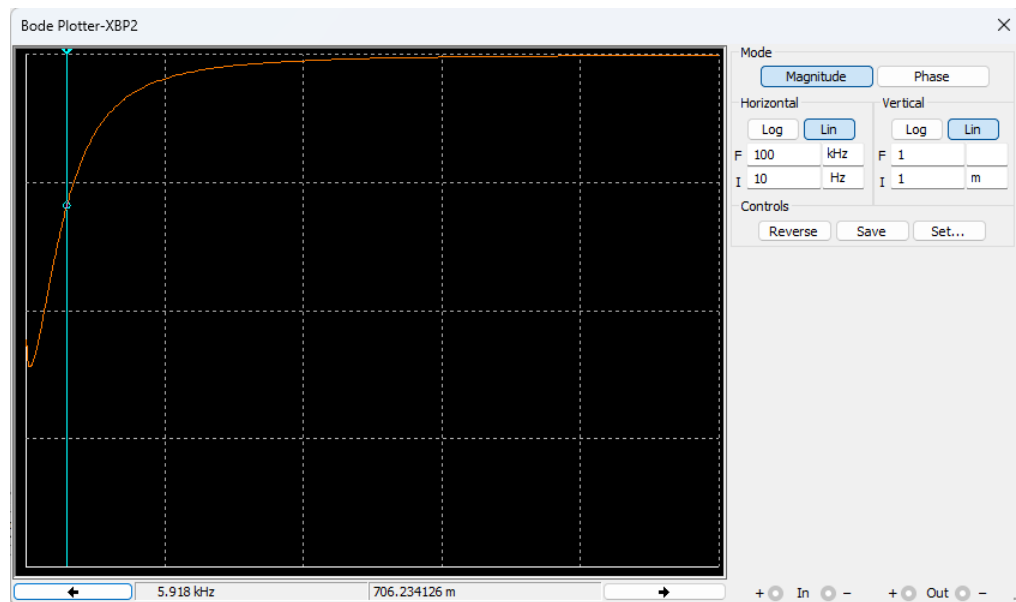


Рисунок 2.16 – АЧХ схеми 2. $R1 = 1,5 \text{ кОм}$; $R2 = 20 \text{ Ом}$; $L1 = 96 \text{ мГн}$; $L2 = 55 \text{ мГн}$

На рис. 2.16 видно, що на частоті $f = 6 \text{ кГц}$, значення рівня напруги $U = 0,707 \text{ (В)}$.

На представлених нижче графіках (рис. 2.17, 2.18) зображено вплив значення опорів $R1$ та $R2$ на АЧХ схеми 2 при значенні індуктивності $L2 = 22 \text{ мГн}$.

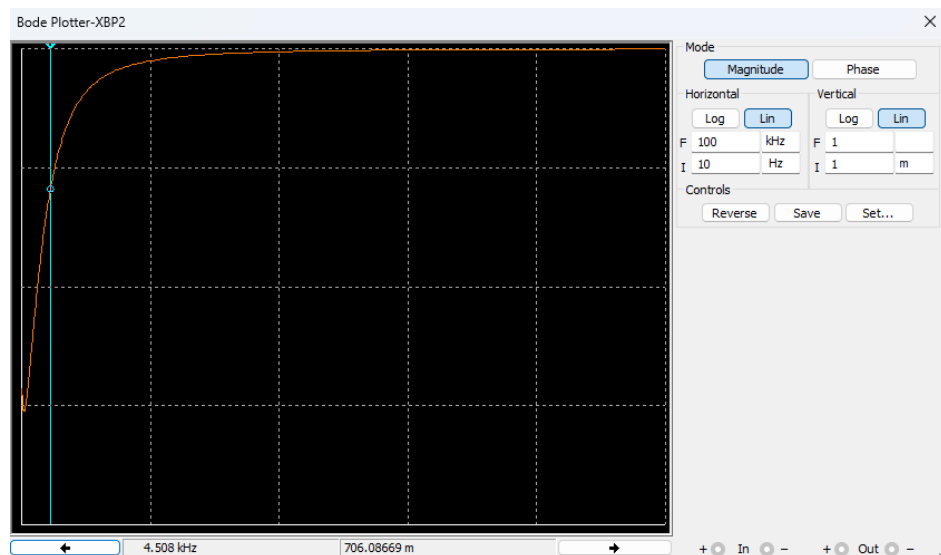


Рисунок 2.17 – Вплив на АЧХ окремо опорів $R1$ та $R2$ схеми 2. $R1 = 510 \text{ Ом}$; $R2 = 9,1 \text{ (Ом)}$; $L1 = 96 \text{ мГн}$; $L2 = 22 \text{ мГн}$

На рис. 2.17 видно, що порівнюючи графік з рисунком 2.12 рівень напруги $U = 0,707$ В відповідає значенню частоти $f = 4,5$ (кГц) у порівнянні з $f = 13$ (кГц) на тому самому рівні напруги.

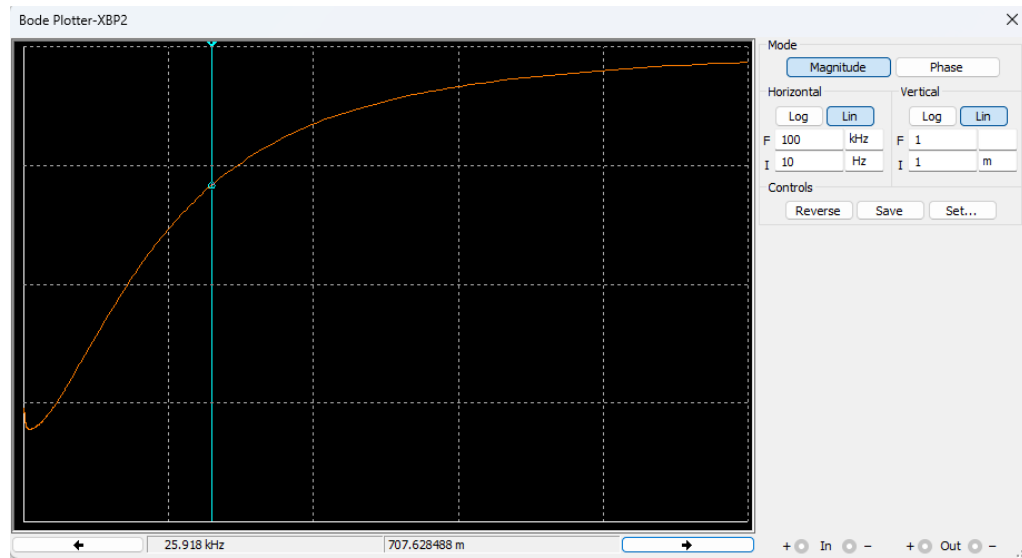


Рисунок 2.18 – Вплив на АЧХ окремо опорів $R1$ та $R2$ схеми 2. $R1 = 3$ кОм;
 $R2 = 5,1$ Ом; $L1 = 96$ мГн; $L2 = 22$ мГн

На рис. 2.18 видно, що значення частоти у порівнянні з минулим графіком змінилось на $f = 25,9$ кГц на рівні напруги $U = 0,707$ В (-3 дБ). Структура графіків залишається наближеною одна до одної, та нагадує ФВЧ.

Нижче на рис. 2.19 – 2.22 зображено графіки АЧХ схеми 3 в залежності від зміни номіналу конденсатора $C2$.

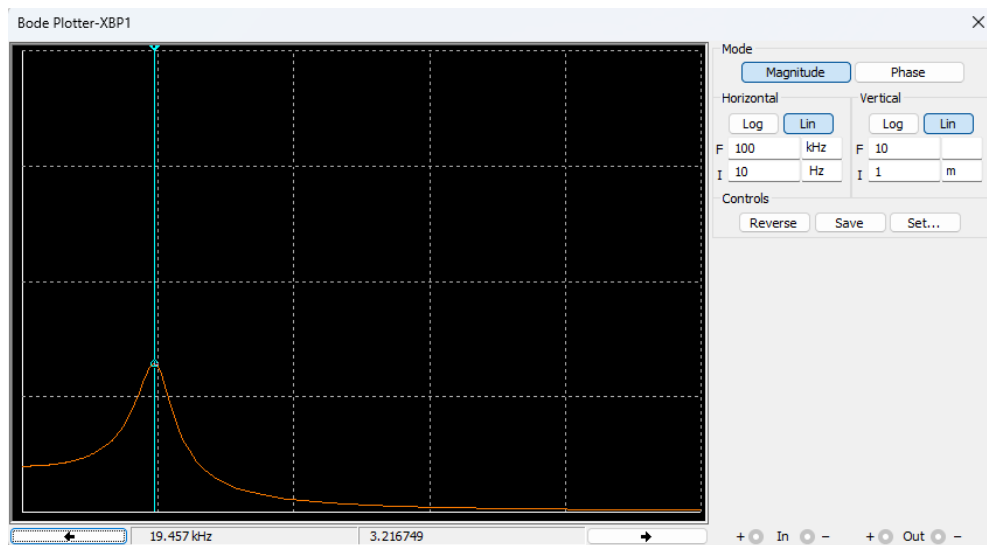


Рисунок 2.19 – Вплив ємності $C2$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.19 видно, що в результаті побудови схеми спочатку з індуктивностями отримано резонанс амплітудою $U = 4,75$ (В) на частоті $f = 19,5$ кГц. Значення ємності $C2 = 2,2$ нФ, індуктивності $L1 = 32,4$ мГн.

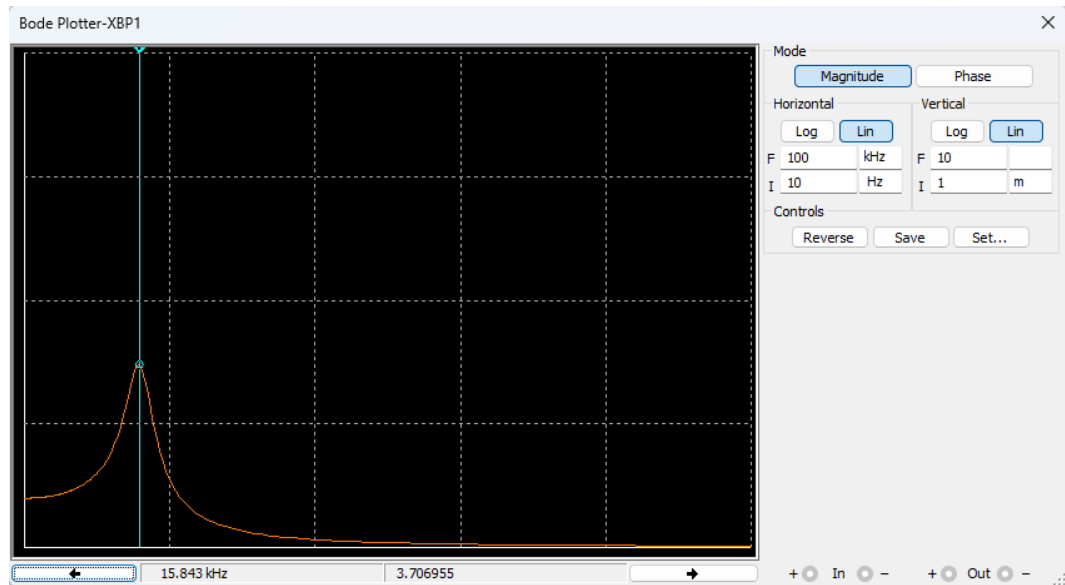


Рисунок 2.20 – Вплив ємності $C2$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.20 отримано резонанс амплітудою $U = 3,7$ В на частоті $f = 15,8$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 32,4$ мГн.

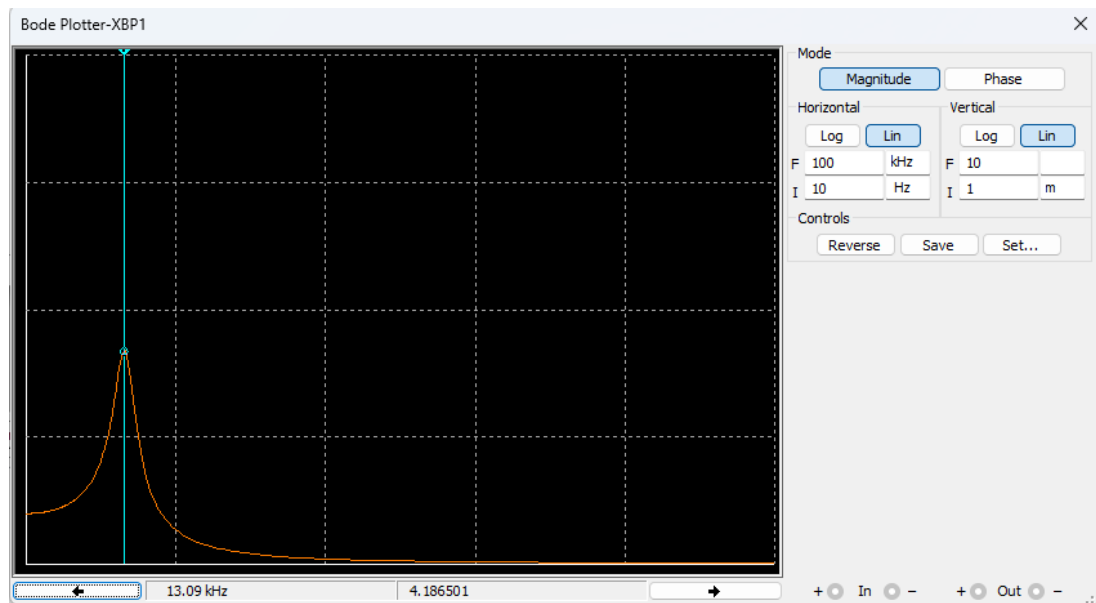


Рисунок 2.21 – Вплив ємності $C2$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.21 отримано резонанс амплітудою $U = 4,18$ В на частоті $f = 13,1$ кГц. Значення ємності $C2 = 4,7$ нФ, індуктивності $L1 = 32,4$ мГн.

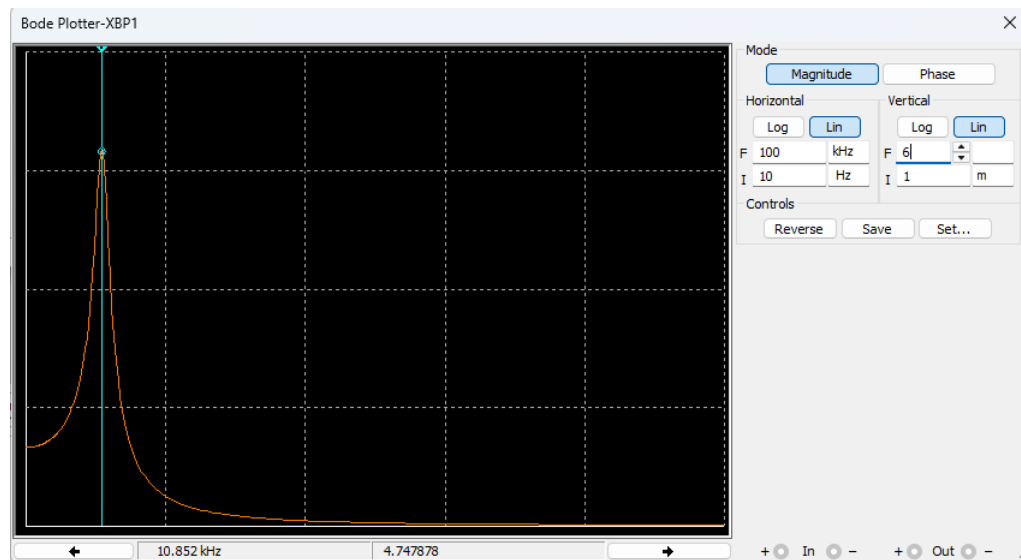


Рисунок 2.22 – Вплив ємності $C2$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.22 отримано резонанс амплітудою $U = 4,74$ В на частоті $f = 10,85$ кГц. Значення ємності $C2 = 6,8$ нФ, індуктивності $L1 = 32,4$ мГн.

Також досліджено вплив опорів $R1$ та $R4$ на схемі 3. Відповідні графіки (рис. 2.23, 2.24) приведено нижче.

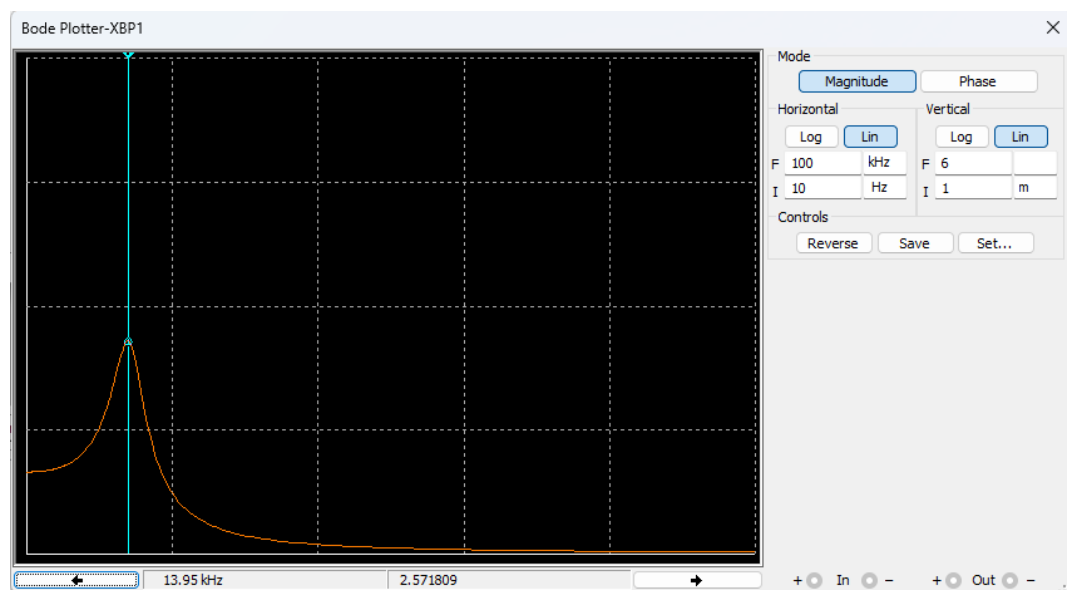


Рисунок 2.23 – Вплив на АЧХ окремо опорів $R1$ та $R4$ в схемі 3

На рис. 2.23 отримано резонанс амплітудою $U = 2,57$ В на частоті $f = 13,95$ кГц. Значення елементів схеми: $R3 = 11$ кОм, $R4 = 5,1$ кОм, $L1 = 32,4$ мГн, $L2 = 45$ мГн, $R1 = 5,1$ Ом, $R2 = 100$ Ом, $C1 = 1$ нФ, $C2 = 4,7$ нФ.

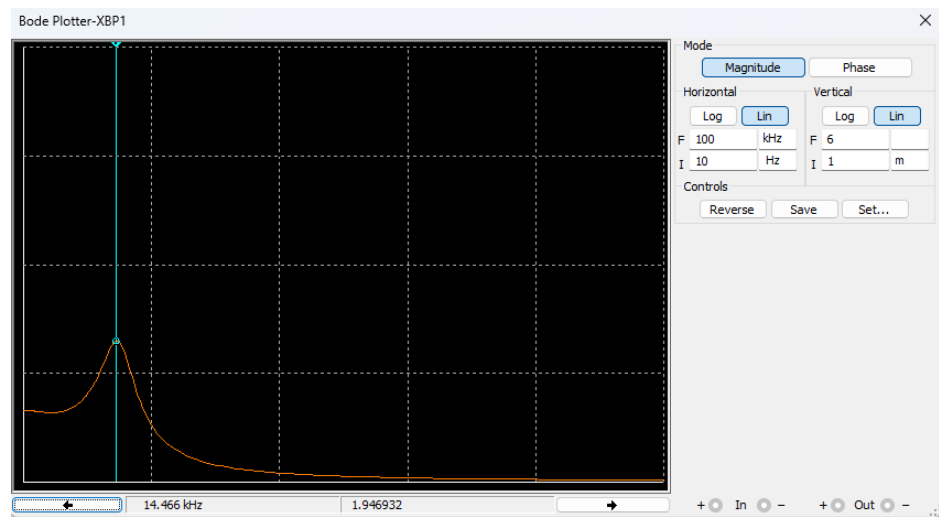


Рисунок 2.24 – Вплив на АЧХ окремо опорів R1 та R4 в схемі 3

На рис. 2.24 отримано резонанс амплітудою $U = 1,95$ В на частоті $f = 14,5$ кГц. Значення елементів схеми: $R3 = 11$ кОм, $R4 = 3$ кОм, $L1 = 32,4$ мГн, $L2 = 45$ мГн, $R1 = 100$ Ом, $R2 = 100$ Ом, $C1 = 1$ нФ, $C2 = 4,7$ нФ.

Як видно з графіків, опори R1 та R4 суттєво впливають на амплітуду сигналу на резонансній частоті, а також мають деякий вплив на зсув резонансу.

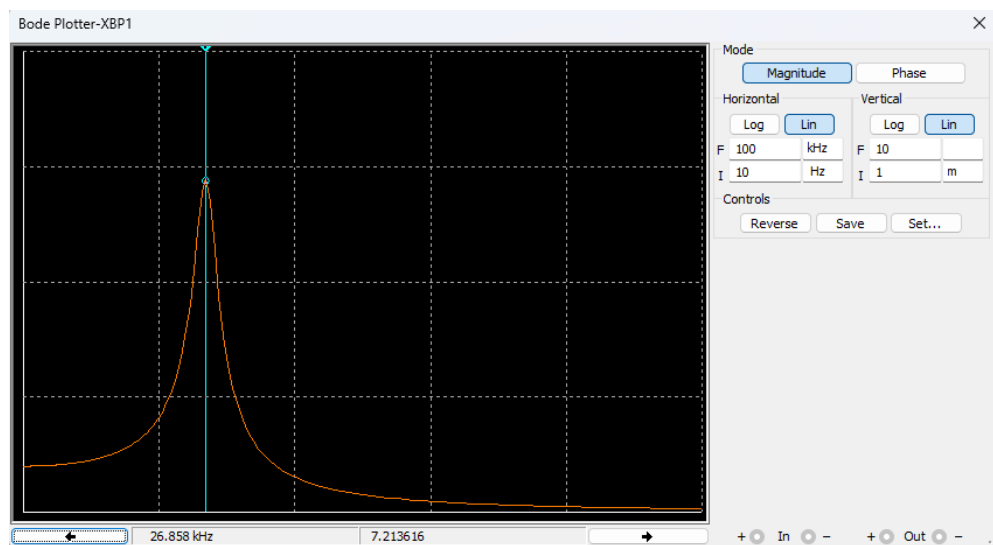


Рисунок 2.25 – Вплив індуктивності L1 на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.25 отримано резонанс амплітудою $U = 7,21$ В на частоті $f = 26,9$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 11$ мГн.

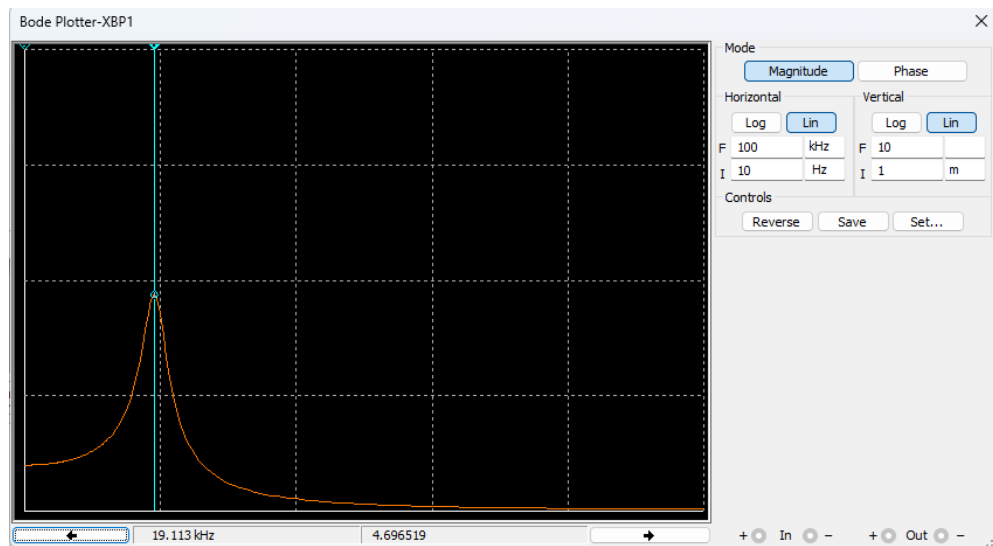


Рисунок 2.26 – Вплив індуктивності $L1$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.26 отримано резонанс амплітудою $U = 4,69$ В на частоті $f = 19,1$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 22$ мГн.

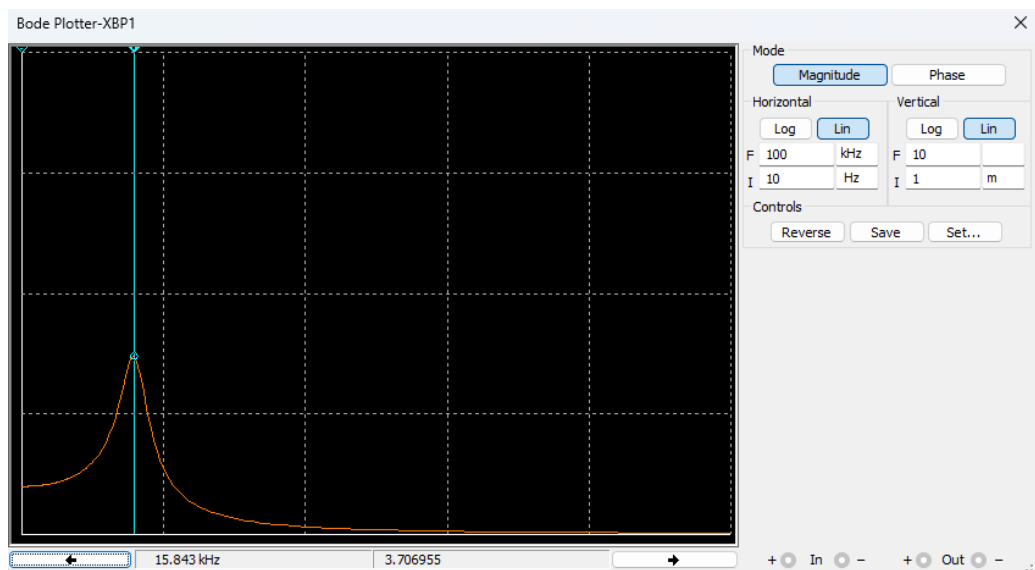


Рисунок 2.27 – Вплив індуктивності $L1$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.27 отримано резонанс амплітудою $U = 3,7$ В на частоті $f = 15,8$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 32,4$ мГн.

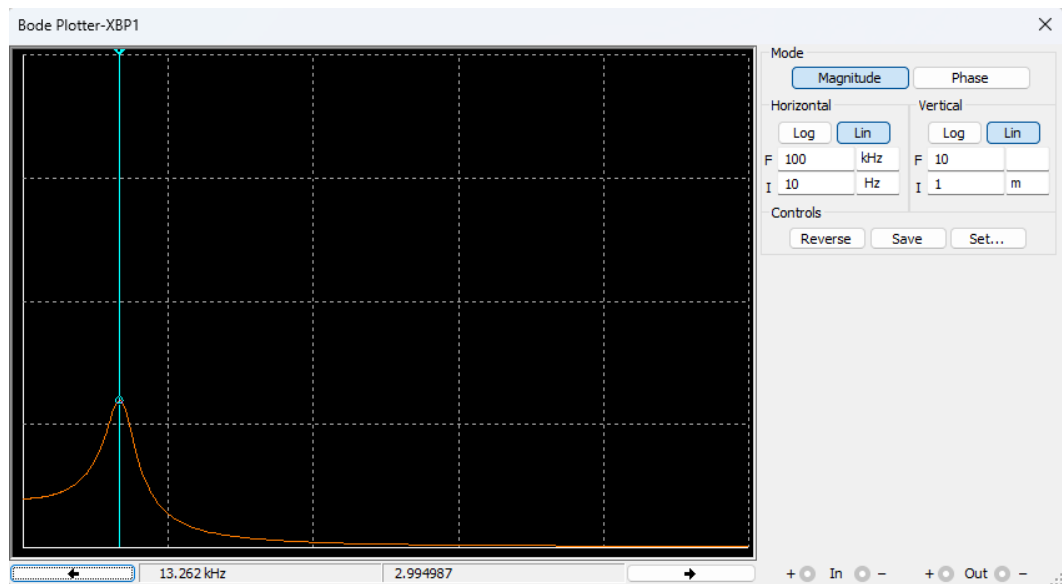


Рисунок 2.28 – Вплив індуктивності $L1$ на АЧХ в схемі 3

На рис. 2.28 отримано резонанс амплітудою $U = 3$ В на частоті $f = 13,2$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 45$ мГн. Структура графіків залишається наближеною одна до одної, та нагадує смуговий фільтр.

На рис. 2.29 – 2.37 зображено графіки впливу елементів схеми 4 на АЧХ.

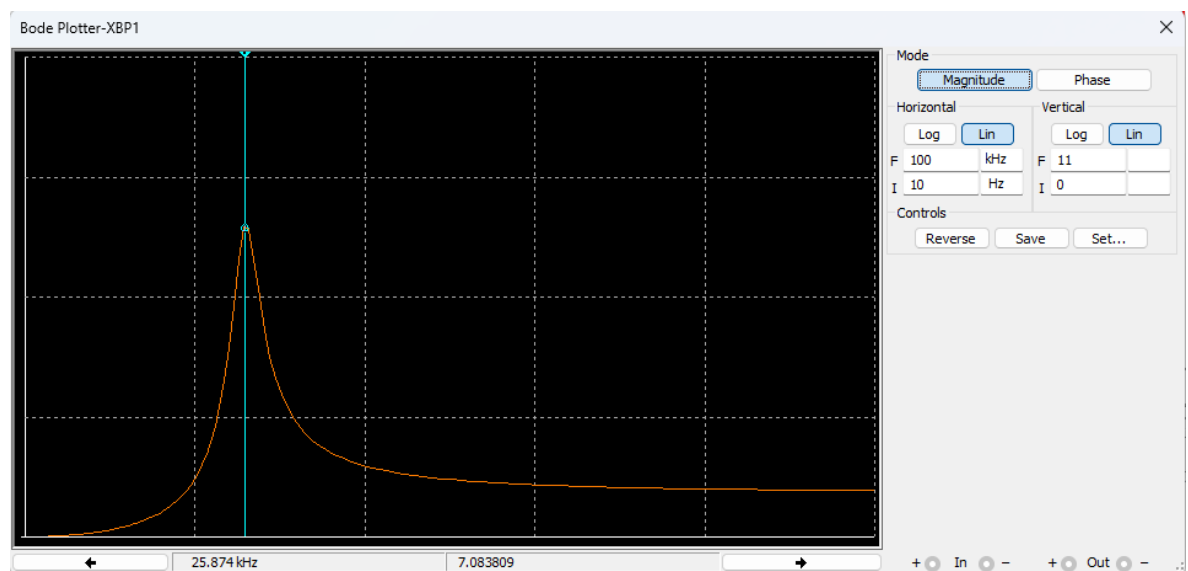


Рисунок 2.29 – Вплив індуктивності $L1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.29 отримано резонанс амплітудою $U = 7,08$ В на частоті $f = 25,9$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 11$ мГн.

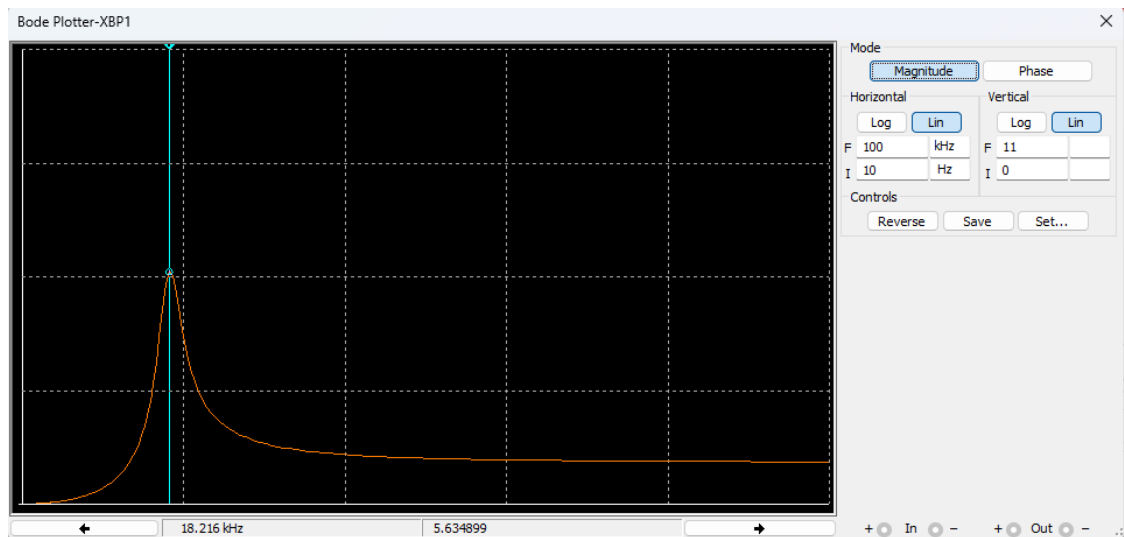


Рисунок 2.30 – Вплив індуктивності $L1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.30 отримано резонанс амплітудою $U = 5,63$ В на частоті $f = 18,2$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 22$ мГн.

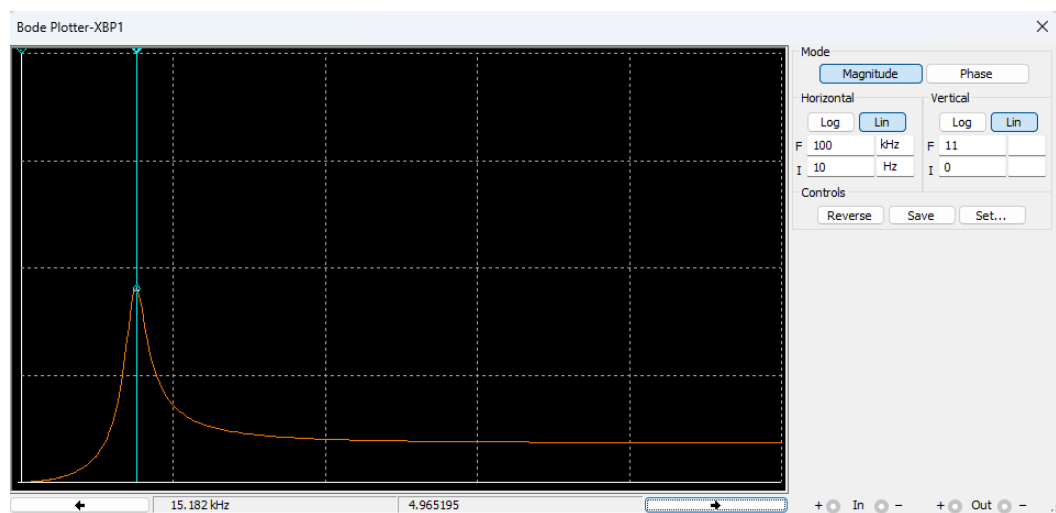


Рисунок 2.31 – Вплив індуктивності $L1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.31 отримано резонанс амплітудою $U = 4,96$ В на частоті $f = 15,2$ кГц. Значення ємності $C2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L1 = 32,4$ мГн.

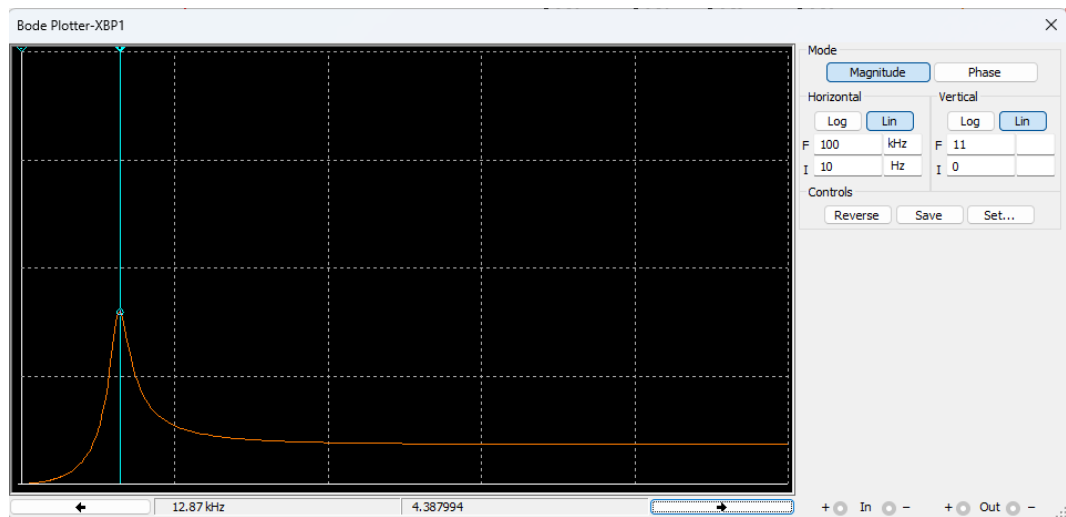


Рисунок 2.32 – Вплив індуктивності L_1 на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.32 отримано резонанс амплітудою $U = 4,38$ В на частоті $f = 12,87$ кГц. Значення ємності $C_2 = 3,3$ нФ, індуктивності $L_1 = 45$ мГн.

На рис. 2.33 та 2.34 зображено графіки впливу опорів R_2 та R_3 на рівень амплітуди на резонансній частоті схеми з ємностями спочатку.

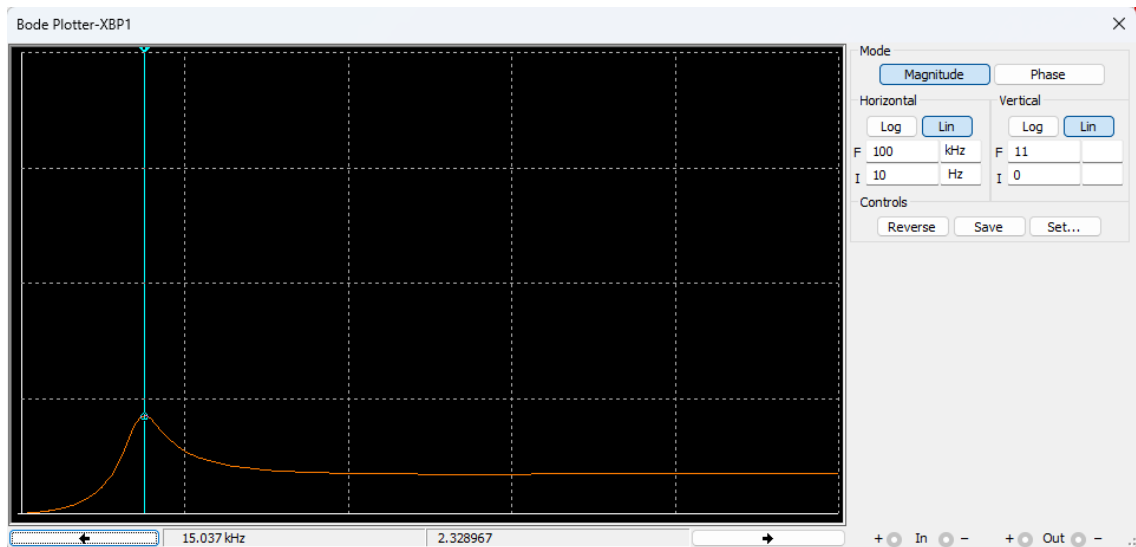


Рисунок 2.33 – Вплив опорів R_2 та R_3 на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.33 отримано резонанс амплітудою $U = 2,32$ В на частоті $f = 15$ кГц. Значення елементів схеми: $R_1 = 11$ кОм, $R_2 = 5,1$ кОм, $C_1 = 2,2$ нФ, $C_2 = 1$ нФ, $R_3 = 100$ Ом, $R_4 = 1,5$ кОм, $L_1 = 96$ мГн, $L_2 = 45$ мГн.

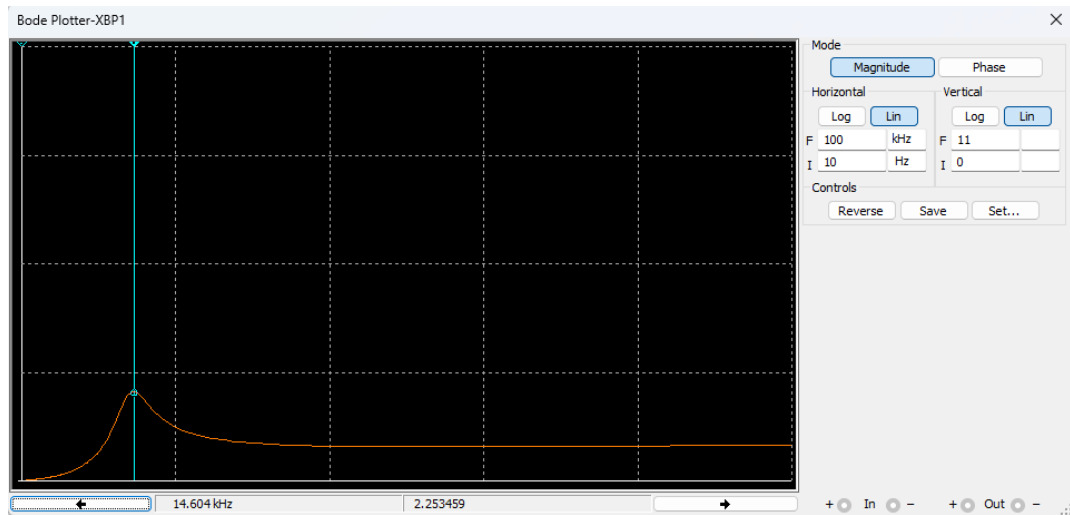


Рисунок 2.34 – Вплив опорів R2 та R3 на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.34 отримано резонанс амплітудою $U = 2,25$ В на частоті $f = 14,6$ кГц. Значення елементів схеми: $R1 = 11$ кОм, $R2 = 3$ кОм, $C1 = 2,2$ нФ, $C2 = 1$ нФ, $R3 = 20$ Ом, $R4 = 1,5$ кОм, $L1 = 96$ мГн, $L2 = 45$ мГн.

На рис. 2.35 – 2.38 представлено вплив ємності $C1$ на АЧХ в схемі 4.

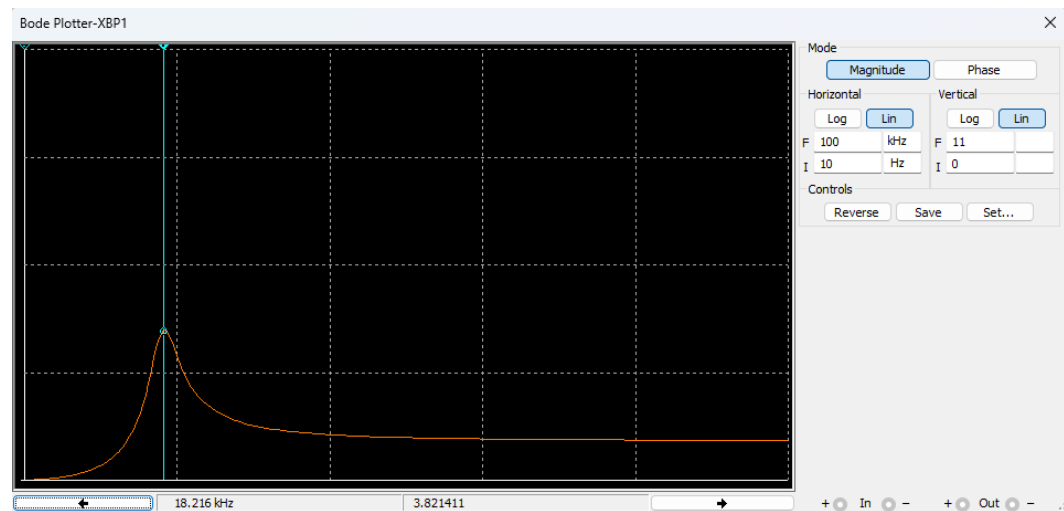


Рисунок 2.35 – Вплив ємності $C1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.35 отримано резонанс амплітудою $U = 3,82$ В на частоті $f = 18,2$ кГц. Значення ємності $C1 = 2,2$ нФ, індуктивності $L2 = 32,4$ мГн.

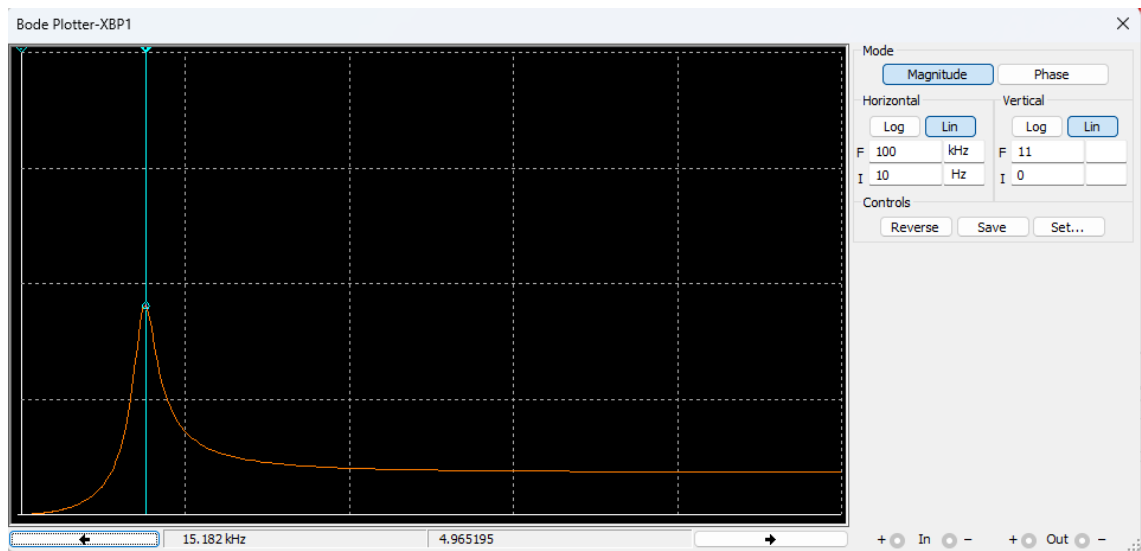


Рисунок 2.36 – Вплив ємності $C1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.36 отримано резонанс амплітудою $U = 4,96$ В на частоті $f = 15,2$ кГц. Значення ємності $C1 = 3,3$ нФ, індуктивності $L2 = 32,4$ мГн.

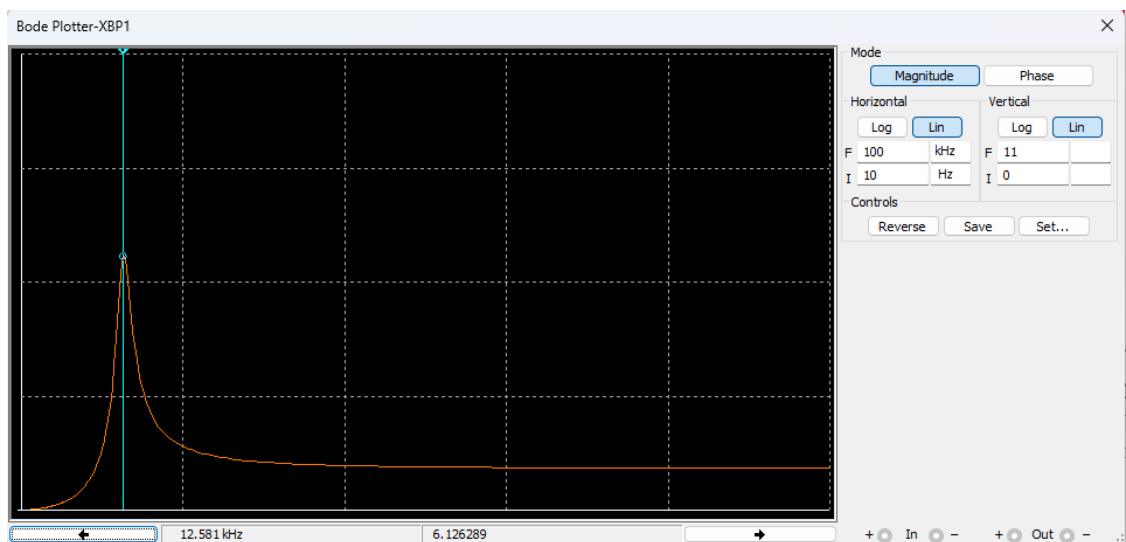


Рисунок 2.37 – Вплив ємності $C1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.37 отримано резонанс амплітудою $U = 6,12$ В на частоті $f = 12,6$ кГц. Значення ємності $C1 = 4,7$ нФ, індуктивності $L2 = 32,4$ мГн.

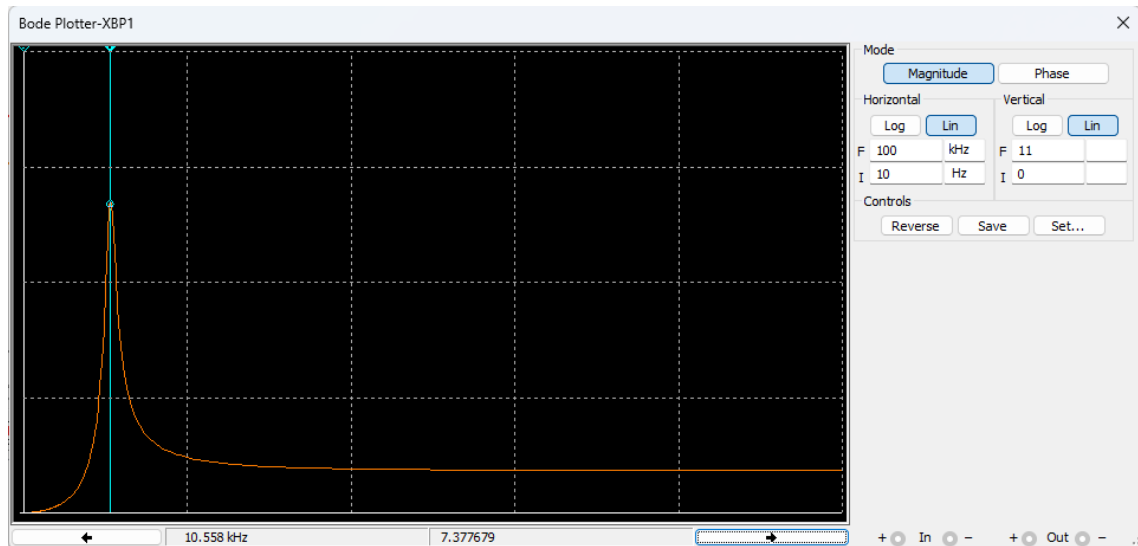


Рисунок 2.38 – Вплив ємності $C1$ на АЧХ в схемі 4

На рис. 2.38 отримано резонанс амплітудою $U = 7,37$ В на частоті $f = 10,5$ кГц. Значення ємності $C1 = 6,8$ нФ, індуктивності $L2 = 32,4$ мГн.

Як видно з усіх отриманих вище графіків, розроблені в Multisim схеми повністю відповідають функціональній структурі майбутнього лабораторного макета та дозволяють ще на етапі комп'ютерного моделювання перевірити працездатність усіх режимів роботи.

Отримані результати моделювання використовуються для подальшого порівняння з експериментальними вимірюваннями, що будуть виконані на фізично зібраному макеті. Таким чином, середовище Multisim виступає ключовим інструментом попередньої перевірки схеми, оптимізації параметрів та забезпечення достовірності майбутніх лабораторних досліджень.

2.3 Світлодіодна індикація та комутація елементів схеми

Для наочності під час моделювання пасивних мостових чотириполіусників у середовищі Multisim у схемі передбачено світлодіодну індикацію. Світлодіоди показують, який саме елемент магазину індуктивностей або ємностей підключений у даний момент до кола, що значно спрощує контроль режимів та зменшує ймовірність помилок під час

серійних вимірювань. Індикація реалізована за принципом кольорового кодування.

Індуктивності:

- синій — 10 мГн ідеальне; 11 мГн – реальне; червоний LED — 22 мГн;
- жовтий — 33 мГн ідеальне; 32,4 - реальне мГн;
- зелений — 47 мГн - ідеальне; 45 мГн – реальне;
- фіолетовий – 100 мГн ідеальне; 96 мГн – реальне. Дві послідовно

з'єднані котушки номіналами 22 та 33 мГн під'єднані до однієї контактної групи що і фіолетовий світлодіод.

Ємності:

- синій — 1 нФ;
- червоний — 2,2 нФ;
- жовтий — 3,3 нФ;
- зелений — 4,7 нФ;
- фіолетовий – 6,8 нФ.

Кожен світлодіод підключений через струмообмежувальний резистор для безпечної та стабільної роботи. Живлення світлодіодів у моделі здійснюється від окремого джерела постійної напруги 4,5 В, яке імітує живлення реального лабораторного макета від трьох батарей типу АА. Це дозволяє уникнути впливу індикації на роботу основної схеми та забезпечує яскраве світіння світлодіодів.

Для узгодженого перемикання елементів магазину та відповідних світлодіодів у моделі застосовано двопозиційний перемикач із п'ятьма контактними групами. Одна група контактів відповідає за підключення елементів магазину (індуктивностей або ємностей), інша — за підключення світлодіодів індикації. Наприклад, контакт 1 перемикача комутує індуктивність 10 мГн та синій LED, контакт 2 — індуктивність 22 мГн та червоний LED, контакт 3 — 33 мГн та жовтий LED, контакт 4 — 47 мГн та зелений LED 5 контакт – 100 мГн, або 55 мГн . Для магазину ємностей використано аналогічну логіку відповідності контактів і світлодіодів.

На рис. 2.39 зображена загальна для реалізації на друкованій платі.

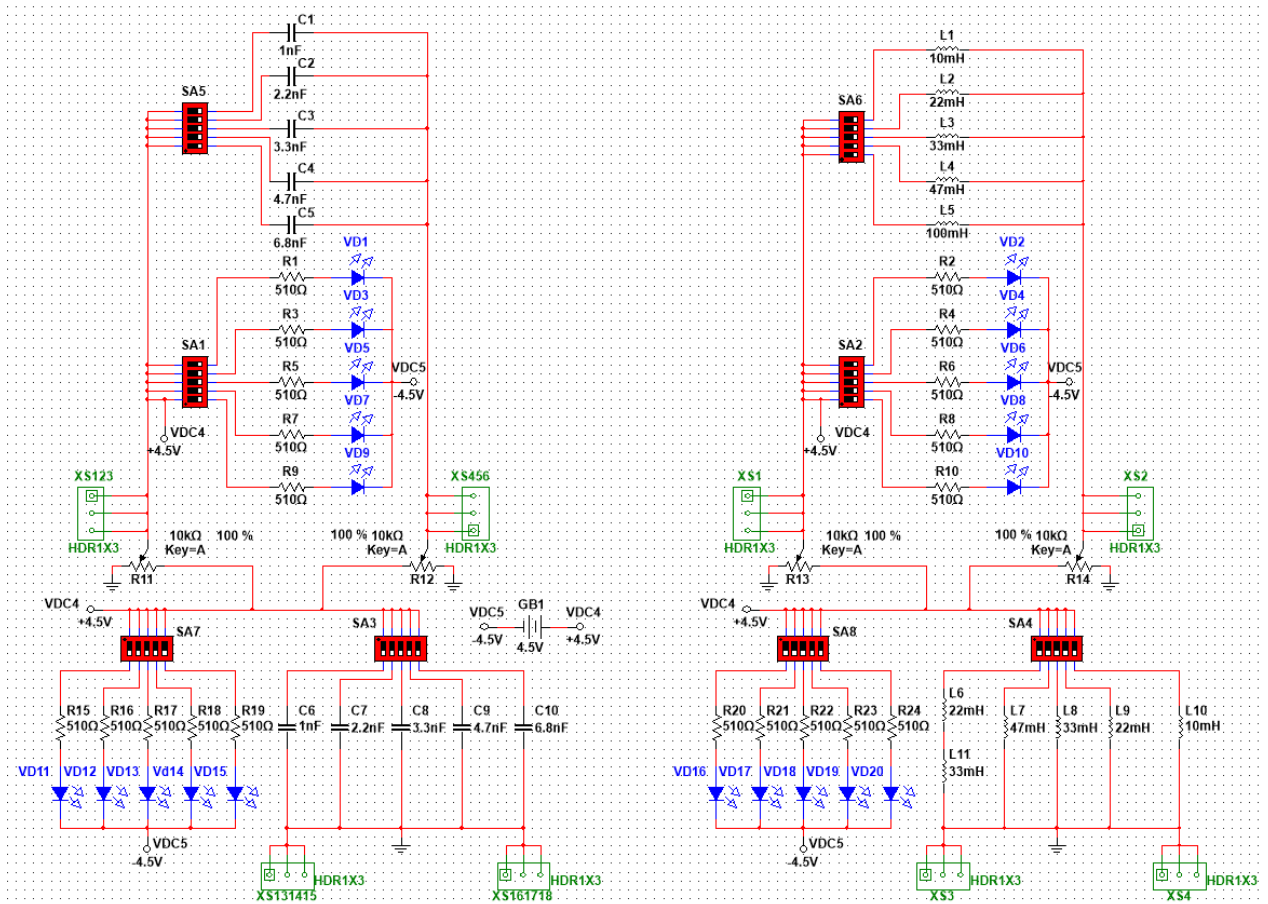


Рисунок 2.39 – Загальна схема пасивних чотириполюсників із магазинами індуктивності, ємності та світлодіодної індикації

Через нестачу в програмному середовищі Multisim необхідного перемикача, то в даній схемі присутні два перемикачі на кожний магазин, які відповідають один за перемикання між реактивними елементами (SA5, SA6, SA7, SA8), а інші (SA1, SA2, SA3, SA4) за світлодіодну індикацію. Також в цій схемі використано 3-контактний роз'єм замість 1-контактного.

В розділі 4 реалізовано схему електричну принципову, де буде виконано проєктування повноцінної схеми електричної принципової.

Щодо характеристик світлодіодів, принципу вибору резисторів та параметри перемикачів більш детально наведено у наступному розділі.

3. АНАЛІЗ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

Провівши аналіз загальної схеми з усіма компонентами, було визначено основні вимоги до вибору елементів для проєкту. Найважливішими критеріями стали наявність компонентів в Україні, надійність, розміри та вартість компонентів.

Також при підборі елементної бази враховувались технічні характеристики, практичність використання та фінансова ефективність, щоб забезпечити баланс між надійністю, розмірами та ціною. Для наочності було прийнято рішення використовувати вивідні (DIP) компоненти.

На ринку представлено широкий асортимент компонентів, необхідний для виготовлення лабораторного макету, основними магазинами електронних компонентів безпосередньо в яких купувались елементи були магазин «ІМРАД» [2] та «РКС Радіомаг». [3]

3.1 Резистори

Оскільки для даної схеми важливим є саме зміна номіналів та порівняння впливу величини опору на АЧХ схем, було прийнято рішення обирати змінні резистори (потенціометри). Найкращим варіантом став потенціометр 3590S-2-103L від компанії Bourne на 10 (кОм) (рис. 3.1).

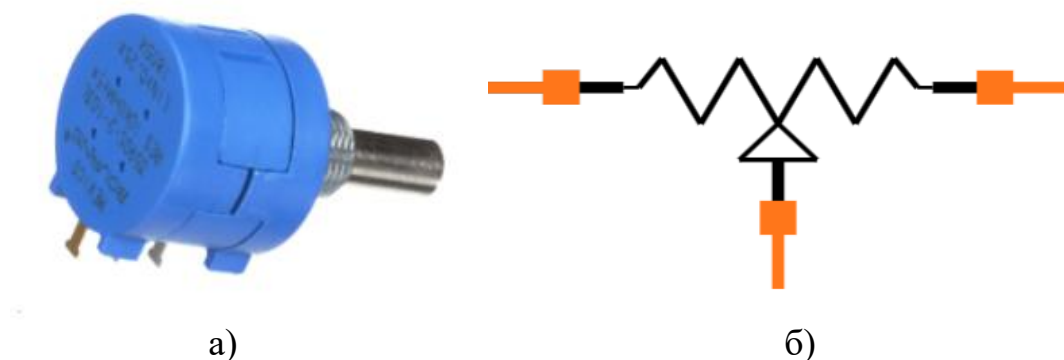


Рисунок 3.1 – Потенціометр 3590S-2-103L: а) фото ; б) умовне графічне позначення [13]

Також варто відмітити, незважаючи на те, що на самому лабораторному макеті (друкованій платі) відсутні вивідні резистори, для зручності виконання експериментального дослідження вимірювання АЧХ в пасивних чотириполюсниках на макетних платах було використано звичайні вивідні резистори максимальною потужністю 0,25 Вт таких номіналів: 5,1 Ом, 9,1 Ом, 20 Ом, 100 Ом, 510 Ом, 1,5 кОм, 3 кОм, 5,1 кОм, 7 кОм, 11 кОм.



Нижче представлено типовий вигляд DIP-резистора (рис. 3.2).

а)

б)

Рисунок 3.2 – Вивідний резистор: а) фото стандартного резистора;

б) умовне графічне позначення

В ході аналізу вибору резисторів та потенціометрів було оцінено основні технічні характеристики та особливості монтажу (Таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Порівняння параметрів резисторів та потенціометрів

Тип опору	Номінал, Ом	Тип	Допуск	Діапазон робочих температур	Максимальна потужність, Вт
Резистор вивідний	5,1; 9,1; 20; 100; 510; 1500 3000; 5100; 7000; 11000	DIP (вивідний)	$\pm 5\%$	$-55^{\circ}\text{C} \dots$ 155°C	0,25
Потенціометр	1 – 10000	DIP (вивідний)	$\pm 1\%$	$1^{\circ}\text{C} \dots$ 125°C	2

Дані опори було обрано, оскільки вони поєднують необхідні технічні характеристики, якість та надійність. Потенціометр 3590S-2-103L від компанії Voipms є дещо дорожчим за середній ціновий сегмент потенціометрів, проте він має набагато кращу довговічність, саме це стало основним критерієм при виборі потенціометра для майбутнього лабораторного макета.

3.2 Котушки індуктивності

З метою створення в схемах магазинів індуктивностей було обрано котушки індуктивності серед наступних вимог: наявність необхідного номіналу в магазинах електроніки, відносно низький внутрішній опір, стабільність у роботі, висока надійність, вивідний тип та доступний ціновий сегмент.

В результаті знайдено необхідні моделі індуктивностей, номіналами 10, 22, 33, 47, та 100 мГн та порівняно їх основні параметри із аналогами (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Порівняння параметрів індуктивностей

Назва, виробник	RCH895NP-473K, Sumida	DR 0912, Bochen	COIL1016, FERROCORE
Внутрішній опір, Ом	11	10	22
Вартість, грн	16,5	11	23
Максимальне значення струму, А	0,32	0,07	0,17
Розміри, мм (D, H)	7,5 × 9,5	9 × 12	11,5 × 17,5

Проаналізувавши можливі варіанти індуктивностей, які є на ринку прийнято рішення обрати індуктивності від компанії Bochen номіналами 10, 22, 33, 100 мГн та 47 мГн котушки Sumida. Основними критеріями стали внутрішній опір котушки та вартість.

Нижче зображено вигляд індуктивностей, які використовуватимуться у схемах (рис. 3.5).

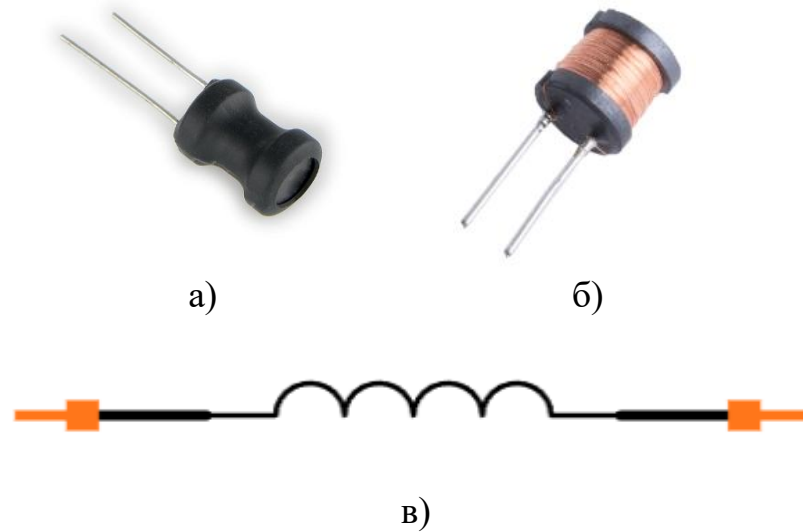


Рисунок 3.5 – Індуктивності, що використовуються в схемах: а) DR 0912, Bochen; б) RCH895NP-473K, Sumida; в) умовне графічне позначення

3.3 Конденсатори

В ході виконання розрахунків та моделювання схеми було визначено, які номінали конденсаторів для створення магазинів ємностей потрібно знайти, а саме 1, 2,2, 3,3, 4,7 та 6,8 нФ. Аналізуючи ринок наявність необхідних ємностей та враховуючи усі основні вимоги до вибору конденсаторів (ціна, наявність, необхідний номінал, стабільність, надійність) було прийнято рішення використовувати вивідні плівкові конденсатори. Вони прості при створенні плати та мають хорошу довговічність та працюють без урахування полярності у порівнянні з тими ж електролітичними конденсаторами.

В таблиці 3.6 приведено порівняння двох виробників плівкових конденсаторів, WIMA та EPCOS/TDK на прикладі ємності номіналом 2,2 нФ.

Таблиця 3.6 – Порівняння виробників плівкових конденсаторів

Виробник	WIMA	EPCOS/TDK
Номінал, нФ	2,2	2,2
Тип діелектрика	Поліпропілен	Поліпропілен
Робоча напруга, В	700	300
Допуск	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$
Вартість, грн	32,5	14
Габаритні розміри (L, W, H), мм	$26,5 \times 7 \times 16,5$	$11,5 \times 11,5 \times 17,5$
Робоча температура, °C	-55...+100	-40...+110

Проаналізувавши ці дві компанії, вирішено обрати конденсатори від компанії EPCOS/TDK, оскільки основним критерієм відбору є ціна, а саме конденсатори цієї фірми є дешевшими, проте одного номіналу на 6,8 нФ не було в наявності і довелось придбати більш дороговартісний конденсатор від WIMA.

Нижче на рис. 3.7 наведено фото та умовне графічне позначення обраних конденсаторів.

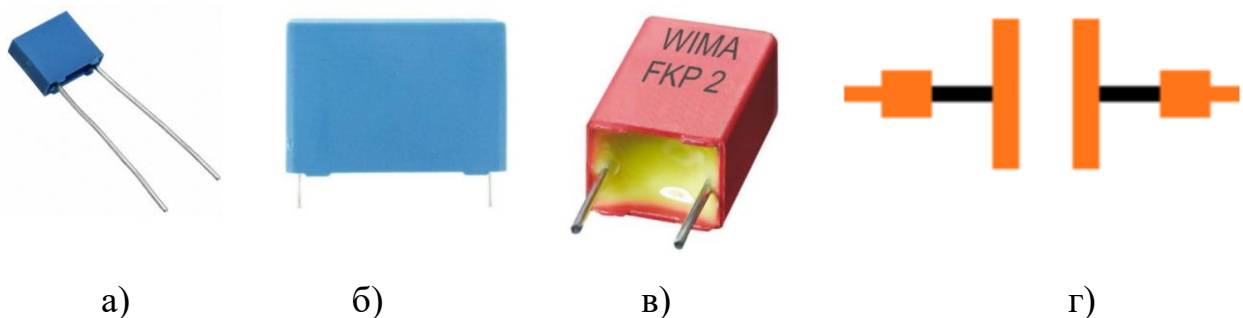


Рисунок 3.7 – Конденсатори, що використовуються в схемах: а) B32529C0102J289 (1 нФ, 4,7 нФ); б) B32021A3222M000 (2,2 нФ, 3,3 нФ); в) FKP2D016801G00HSSD (6,8 нФ); г) умовне графічне позначення

3.4 Перемикачі

У лабораторному макеті для вибору номіналів елементів у магазинах індуктивностей та ємностей використовуються 2-позиційні поворотні механічні перемикачі на 5 контактних груп (рисунок 3.8).

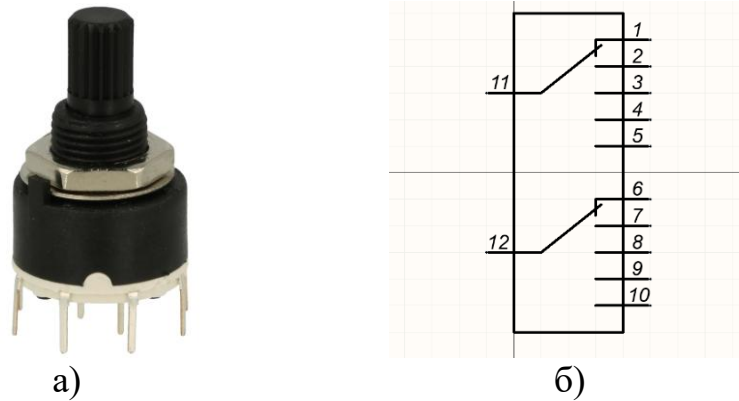


Рисунок 3.8 – Перемикач SR16A: а) фото перемикача; б) Умовне графічне позначення

Даний тип перемикача дозволяє одночасно комутувати п'ять електричних гілок, що забезпечує синхронне перемикання як самих елементів, так і відповідної світлодіодної індикації.

Кожна контактна група перемикача відповідає за окремий номінал елемента. При цьому перемикання здійснюється таким чином, що в кожний момент часу активним є лише один номінал, а решта відключені від електричного кола.

Для індуктивностей відповідність контактів має такий вигляд:

I — 10 мГн;

II — 22 мГн;

III — 33 мГн;

IV — 47 мГн;

V – 100 мГн (55 мГн – 22 і 33 мГн, з'єднані послідовно).

Аналогічний принцип використовується і для магазину ємностей:

I – 1 нФ;

- II — 2,2 нФ;
- III — 3,3 нФ;
- IV — 4,7 нФ;
- V — 6,8 нФ.

Таким чином, положення перемикача визначає не лише активний номінал елемента, а і відповідний світлодіод, що значно спрощує візуальний контроль режиму роботи лабораторного макету та покращує зручність використання.

3.5 Світлодіоди

Світлодіодна індикація в лабораторному макеті використовується для візуального контролю активного номіналу елементів у магазинах індуктивностей та ємностей під час дослідження мостових прохідних чотириполюсників.

Нижче представлено вигляд світлодіодів від компанії KINGBRIGHT ELECTRONIC (рис. 3.9).

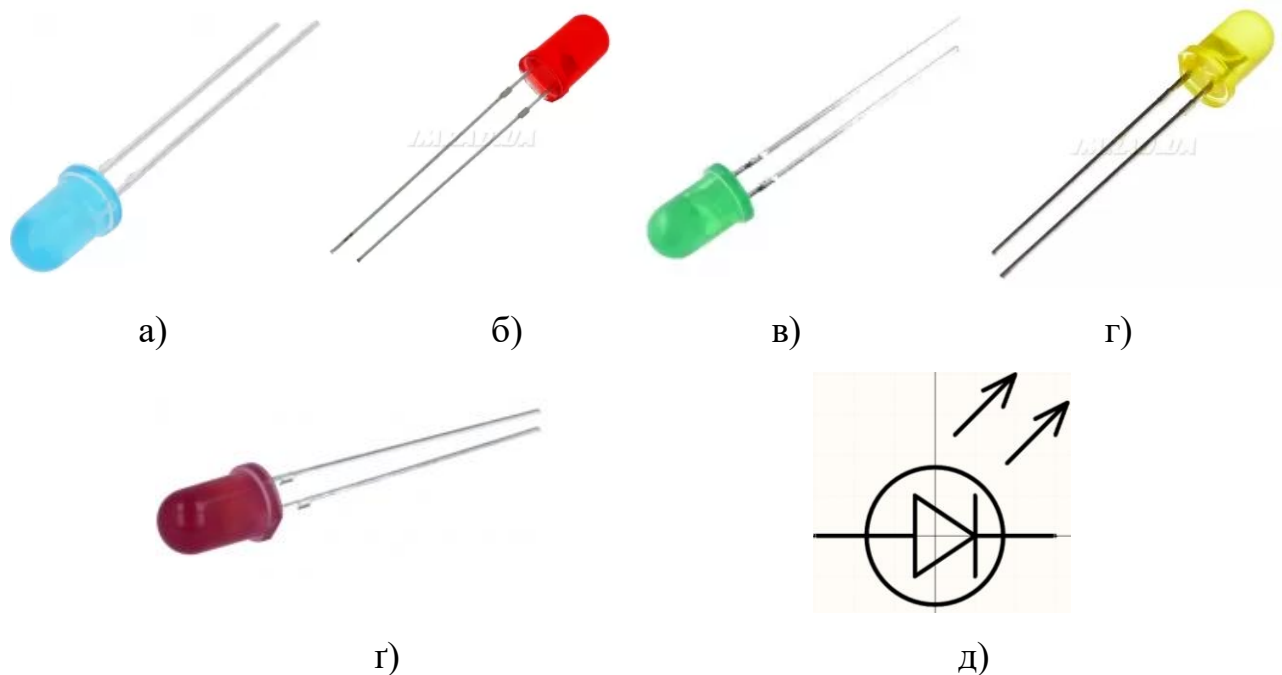


Рисунок 3.9 – Світлодіод KINGBRIGHT ELECTRONIC: а) синій; б) червоний; в) зелений; г) жовтий; г) фіолетовий; д) умовне графічне позначення

Світлодіоди вмикаються синхронно з відповідними котушками індуктивності та конденсаторами за допомогою 2-позиційного 5-контактного перемикача, що забезпечує однозначну відповідність між підключеним елементом і його світловою індикацією.

Підключення світлодіодів зроблено після кожного елемента магазину (котушки або конденсатора) через індивідуальні обмежувальні резистори номіналом 510 Ом. Таке рішення забезпечує стабілізацію струму, захист від перевантаження та підвищує ресурс світлодіода.

Живлення кола індикації здійснюється від автономного джерела напруги 4,5 В, сформованого за допомогою трьох батарейок типу АА у корпусі (рисунок 3.10).

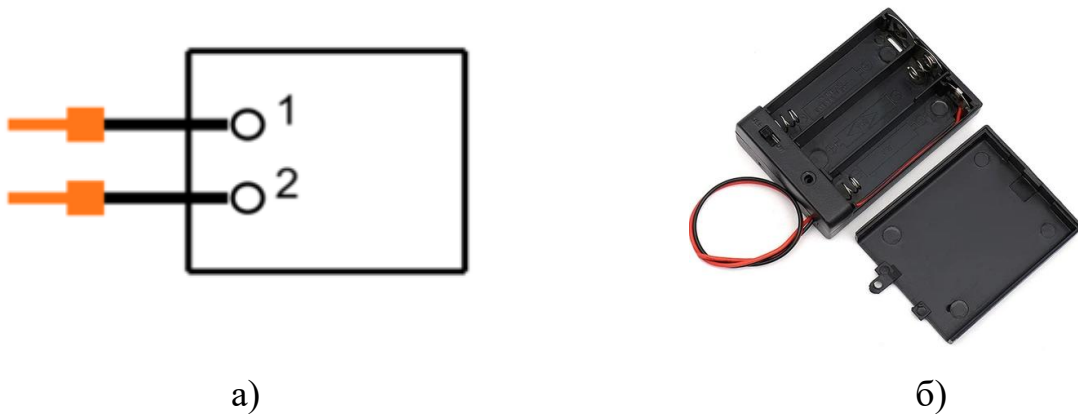


Рисунок 3.10 – Корпус під батарейки типу АА: а) Вигляд корпусу зверху; б) Умовне графічне позначення

Коло індикації є гальванічно відокремленим від основної досліджуваної схеми, що усуває вплив індикаторних струмів на результати вимірювань. Номінальний робочий струм застосованих світлодіодів становить 20 мА. Для визначення номіналу обмежувального резистора використано співвідношення:

$$R = \frac{U_{\text{живл}} - U_f}{I}, \quad (3.11)$$

де $U_{\text{живл}}$ — напруга живлення, U_f — пряма напруга світлодіода I - номінальний робочий струм світлодіодів.

Для світлодіодів різних спектральних діапазонів характерні такі значення прямої напруги:

1,8...2,2 В — для червоних та жовтих;

2,8...3,3 В — для синіх, зелених і фіолетових.

Підставимо середнє значення прямої напруги 2 В для червоних та жовтих світлодіодів у формулу (3.11):

$$R = \frac{4,5-2}{0,02} = 125 \text{ (Ом)} - \text{значення обмежувального опору для червоного та}$$

жовтого світлодіодів;

$$R = \frac{4,5-3}{0,02} = 75 \text{ (Ом)} - \text{значення обмежувального опору для синього,}$$

зеленого та фіолетового світлодіодів.

За номінального струму 20 мА розрахункове значення обмежувального опору перебуває в межах 75...125 Ом, однак у схемі застосовано резистори номіналом 510 Ом.

Аналогічно за законом Ома розрахуємо фактичний струм, яким буде живитись світлодіод:

$$I = \frac{U_{\text{живл}} - U_f}{R}, \quad (3.12)$$

$$I = \frac{4,5 \text{ В} - 2 \text{ В}}{510 \text{ Ом}} = 0,0049 \text{ (А)} \approx 5 \text{ (мА)} - \text{значення фактичного струму для}$$

червоного та жовтого світлодіодів;

$$I = \frac{4,5 \text{ В} - 3 \text{ В}}{510 \text{ Ом}} = 0,0029 \text{ (А)} \approx 3 \text{ (мА)} - \text{значення фактичного струму для}$$

синього, зеленого та фіолетового світлодіодів;

Як видно з розрахунку, опір на резисторі 510 Ом забезпечує фактичний струм близько 3 та 5 мА, що є безпечним режимом для безперервної роботи, достатнім за яскравістю та доцільним з точки зору енергоспоживання автономного джерела живлення.

Для покращення наочності, підвищення інформативності лабораторного макету, спрощення процесу проведення експериментів та зменшення ймовірності помилок під час перемикання режимів використано

кольорове кодування світлодіодів, яке відповідає конкретним номіналам елементів магазинів:

Для магазину індуктивностей:

синій — 10 мГн;

червоний — 22 мГн;

жовтий — 33 мГн;

зелений — 47 мГн;

фіолетовий — 55 мГн, 100 мГн.

Для магазину ємностей:

синій — 1 нФ;

червоний — 2,2 нФ;

жовтий — 3,3 нФ;

зелений — 4,7 нФ;

фіолетовий — 6,8 нФ.

3.6 Роз'єми

Для проведення вимірювань параметрів електричної схеми та забезпечення можливості підключення зовнішніх приладів, таких як генератор сигналів або вимірювальні прилади (осцилограф і мультиметр), у проєкті передбачено використання спеціальних роз'ємів на вході та виході кожної схеми. Вибір портів визначався головною вимогою, а саме необхідністю сумісності з наявними в лабораторіях вимірювальними приладами, зокрема осцилографами та генераторами Г4-18, щупи яких мають діаметр контакту близько 2 мм. Також не менш важливими аспектами для вибору конекторів є доступність, стабільність контактів, зручність монтажу та компактності розташування на платі.

У рамках проєкту було обрано порти типу «банан» (Banana socket), а для живлення світлодіодів для підключення корпусу з батарейками типу АА був використаний 2-контактний роз'єм. Вони дозволяють швидко та надійно

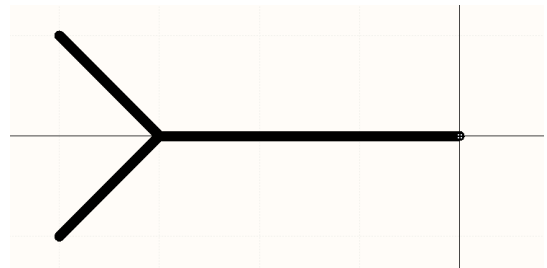
підключати дроти і щупи без використання додаткових інструментів, що значно спрощує процес експериментальних вимірювань. Крім того ці порти мають вертикальне виконання з однією позицією та двома позиціями відповідно для контакту діаметром 2 мм, а невеликі габарити портів забезпечують ефективне компонування на платі, залишаючи достатньо місця для інших елементів схеми.

На платі використано 25 портів. Дві схеми, для кожної схеми на вході та виході потрібно по три роз'єми (24 роз'єми), та один роз'єм в центрі плати. Дані конектори забезпечують живлення від світлодіодів від батарейок AA 4,5 В, підключення генератора, взаємодію двох схем об'єднаних каскадно, осцилографа та вольтметра

Конкретним вибором для проєкту стала модель KLS BAJ-001-NR (рис. 3.13 а, б) та DS1023-1_2S21 від фірми Connfly (рисунок 3.13 в, г).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.13 – Роз'єм BAJ-001-NR KLS: а) зображення роз'єму; б) умовне графічне позначення; Роз'єм DS1023-1_2S21: в) зображення роз'єму; г) умовне графічне позначення

Основні технічні характеристики роз'ємів наведені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Основні параметри роз'ємів

Назва, виробник	BAJ-001-NR KLS	DS1023-1_2S21 Connfly
Кількість контактів	1	2
Діаметр контакту, мм	2	2
Номинальний струм, А	10	1
Номинальна напруга, В	330	250
Робочий температурний діапазон, °С	-40... +70	-40... +105
Розміри, мм	25×10мм	3,2×8,5

Також варто задекларувати вартість усіх необхідних компонентів для створення одного лабораторного макету, нижче приведена таблиця цін компонентів (табл. 3.15). Оскільки вивідні резистори не будуть застосовуватись безпосередньо в лабораторному макеті, то їх у перелік компонентів не було додано. А також до загального списку компонентів було додано 2-контактних роз'єм для забезпечення живлення від батарейок до світлодіодів.

Таблиця 3.15 – Вартість компонентів для одного лабораторного макету

Назва та номінал компоненту	Найменування	Вартість за 1 шт., грн	Кількість
Потенціометр, 1-10000 Ом	3590S-2-103L	105	4
Індуктивність, 10 мГн	DR 0912 10mH Bochen	8	2
Індуктивність, 22 мГн	DR 0912 22mH Bochen	8	3
Індуктивність, 33 мГн	DR 0912 33mH Bochen	11,5	3
Індуктивність, 47 мГн	RCH895NP-473K	15	2
Індуктивність, 100 мГн	DR 0912 100mH Bochen	11,5	1
Конденсатор, 1 нФ	B32529C0102J289	6	2

Конденсатор, 2,2 нФ	B32021A3222M000	9	2
Конденсатор, 3,3 нФ	B32021A3332M000	13	2
Конденсатор, 4,7 нФ	B32529C3472K289	5	2
Конденсатор, 6,8 нФ	FKP2D016801G00HSSD	22	2
Перемикач поворотний 2- позиційний 5-ти контактний	SR16A-2-5-18T-15	54	4
Світлодіод синій	L-53P3C	6	4
Світлодіод червоний	L-53ID	6	4
Світлодіод зелений	L-53SGD	6	4
Світлодіод жовтий	L-53YD	6	4
Світлодіод фіолетовий	L-53SPD	6	4
Корпус для батарейок типу AA	Arduino kit	40	1
Роз'єм типу «Banana Jack»	BAJ-001-NR KLS	9	24
Роз'єм під живлення світлодіодів	DS1023-1_2S21 Connfly	2	1
Резистор вивідний	510 Ом, 0,25 Вт	1	20

Як видно з табл. 3.15 загальна ціна компонентів для одного лабораторного макету склала 1260 грн.

Наступним кроком виконання дипломного проєкту є експеримент з макетними платами і порівняння результатів, отриманих раніше.

4. ЕКСПЕРИМЕНТ ПРОЄКТУВАННЯ СХЕМ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА МАКЕТНИХ ПЛАТАХ

Результати комп'ютерного моделювання, отримані у програмному середовищі Multisim, потребують експериментального підтвердження. Саме тому у даному розділі виконано практичну перевірку частотних властивостей пасивних мостових чотириполіусників шляхом збирання досліджуваних схем на макетних платах та зняття їх амплітудно-частотних характеристик за допомогою реального вимірювального обладнання.

Експериментальні дослідження проводилися для чотирьох базових конфігурацій схем: малої схеми з ємностями, малої схеми з індуктивностями, великої схеми з первинним включенням індуктивностей та великої схеми з первинним включенням ємностей. Для кожної з конфігурацій досліджувався вплив номіналів реактивних елементів, а також опорів на форму АЧХ.

4.1 Збірка схем на макетних платах та зняття АЧХ

Для експериментального дослідження амплітудно-частотних властивостей пасивних мостових чотириполіусників використовувалися стандартні макетні плати на 830 контактних отворів. Такий тип плат забезпечує зручну компоновку елементів, швидку модифікацію схем та візуальний контроль з'єднань, що є важливим під час серійних вимірювань.

Живлення досліджуваних схем здійснювалося від функціонального генератора Siglent SDG6022X, який формував синусоїдальний сигнал з амплітудою 1 В. Вихідна напруга схем вимірювалася за допомогою цифрового осцилографа Siglent SDS2204X Plus. З'єднання генератора та осцилографа з макетною платою виконувалося через вимірювальні провідники з типу «крокодил».

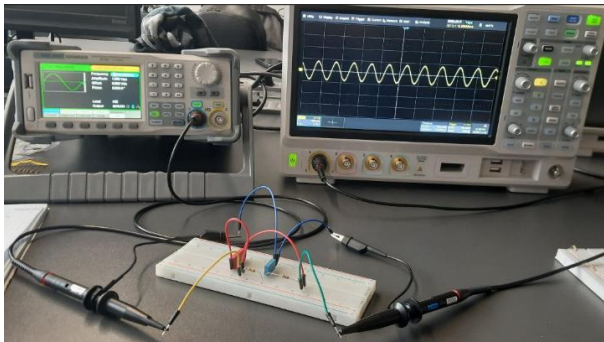
Для уніфікації експерименту була прийнята наступна система маркування підключень:

- синій провід — загальна «земля»;
- жовтий провід — вхідний сигнал від генератора;
- зелений провід — вихідний сигнал на осцилограф.

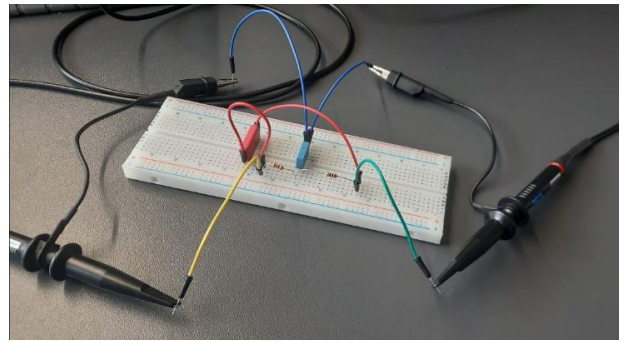
Дослідження схеми 1 (лише з ємностями).

На першому етапі була зібрана схема 1 (рис. 4.1), що містить лише резистивно-ємнісні елементи та перемикач.

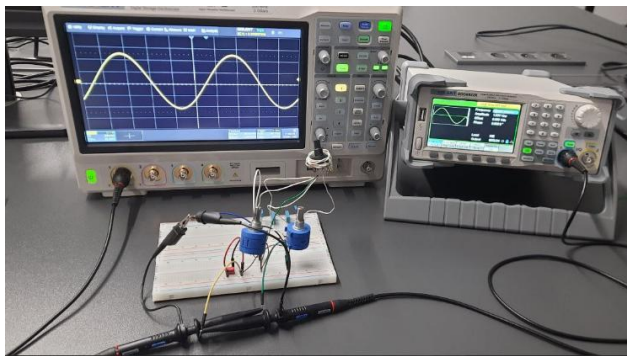
Для кожного номіналу проводилося пошарове зняття АЧХ у діапазоні частот від 1 кГц до 100 кГц шляхом ступінчастої зміни частоти генератора та фіксації амплітуди вихідного сигналу з осцилографа. Отримані значення для всіх схем, що попередньо розраховувались у Multisim, заносилися у таблиці, які перенесено у додаток А, та у підрозділі 4.2 висвітлено порівняльні графіки.



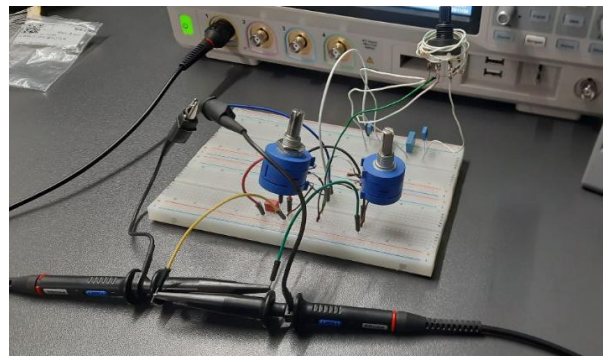
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.1 – Дослідження впливу ємності C_2 та опорів R_1 та R_2 на АЧХ схеми 1: а) процес зняття АЧХ початкової варіації схеми без потенціометрів та перемикачів; б) вигляд зібраної схеми на макетній платі з фіксованими номіналами елементів; в) процес зняття АЧХ схеми з додаванням

потенціометрів та комутаційного перемикача; г) вигляд зібраної модифікованої схеми на макетній платі

У межах експериментальних досліджень була зібрана схема 1 з використанням конденсаторів різних номіналів. Початкова конфігурація реалізовувалась без елементів комутації та регулювання і містила лише ємнісний елемент та вивідні резистори (рис. 4.1 а, б). У такому виконанні послідовно досліджувались номінали ємності $C1$ (1 нФ), $C2$ (1 нФ, 2,2 нФ, 3,3 нФ, 4,7 нФ, 6,8 нФ) та вплив опорів $R1$ (1,5 кОм, 3 кОм, 5,1 кОм, 7 кОм, 11 кОм) та $R2$ (9,1 Ом, 20 Ом, 100 Ом, 510 Ом).

Далі схема була модифікована шляхом додавання потенціометрів 10 кОм та п'яти-контактного перемикача (рис. 4.1 в, г), що забезпечило можливість оперативного перемикачання номіналів ємностей без демонтажу компонентів.

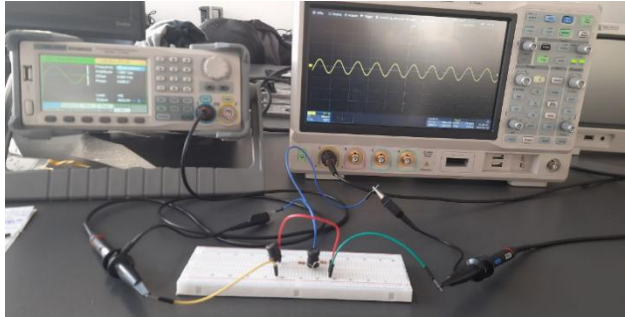
В результаті експериментального дослідження всі необхідні точки різних комбінацій номіналів елементів були записані та занесені до таблиці 4.20.

Дослідження схеми 2 (лише з індуктивностями).

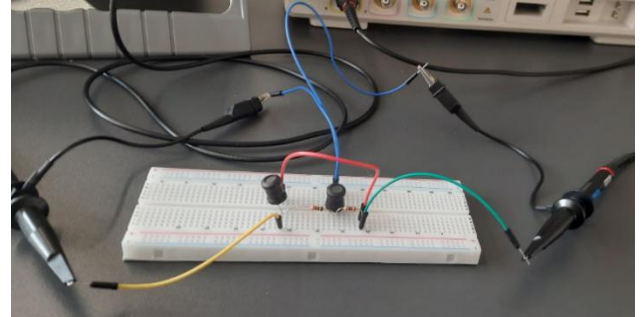
Аналогічно було зібрано схему 2 з використанням котушок індуктивності різних номіналів (рис. 4.2). Початкова конфігурація схеми реалізовувалась без елементів керування та комутації та містила лише індуктивний елемент і вивідні резистори різних номіналів для дослідження їх впливу на АЧХ (рис. 4.1. а, б). У цій конфігурації досліджувались номінали резисторів $R1$ (510 Ом, 1,5 кОм, 3 кОм), $R2$ (5,1 Ом, 9,1 Ом, 20 Ом), індуктивності $L1$ (100 мГн), $L2$ (10 мГн, 22 мГн, 33 мГн, 47 мГн та еквівалент 55 мГн).

Номінал 55 мГн було реалізовано шляхом послідовного з'єднання двох котушок 22 мГн та 33 мГн. Дані котушки були фізично рознесені на макетній платі для зменшення взаємного магнітного зв'язку та мінімізації впливу взаємоіндукції на результуюче значення індуктивності.

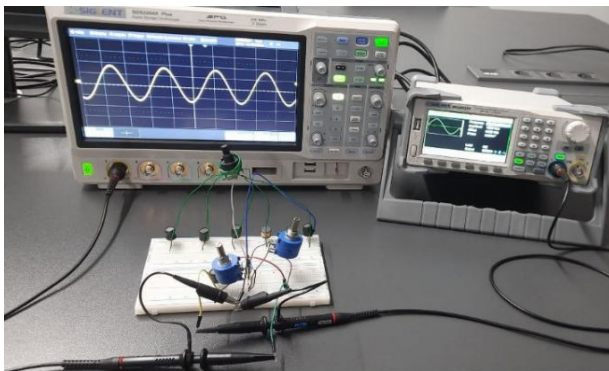
На наступному етапі в модифікованій схемі вивідні резистори R1 та R2 були замінені на потенціометри 10 кОм та був доданий аналогічно до схеми 1 двох-позиційний п'яти-контактний перемикач, що дозволило здійснювати комутацію індуктивностей без перепідключення елементів (рис. 4.2 в, г).



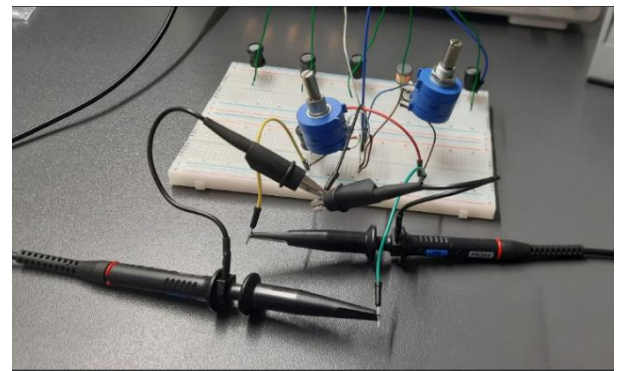
а)



б)



в)



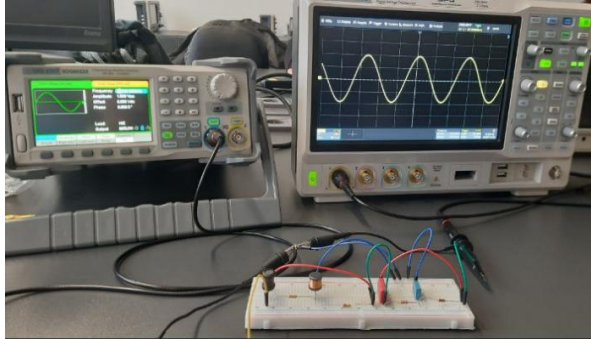
г)

Рисунок 4.2 – Дослідження впливу індуктивності L2 і опорів R1 та R2 на АЧХ схеми 2: а) процес зняття АЧХ для схеми з фіксованими котушками індуктивності; б) вигляд зібраної схеми на макетній платі з постійними номіналами індуктивностей та опорів; в) процес зняття АЧХ схеми з можливістю перемикання індуктивностей та опорів; г) вигляд модифікованої схеми з комутаційним перемикачем та потенціометрами.

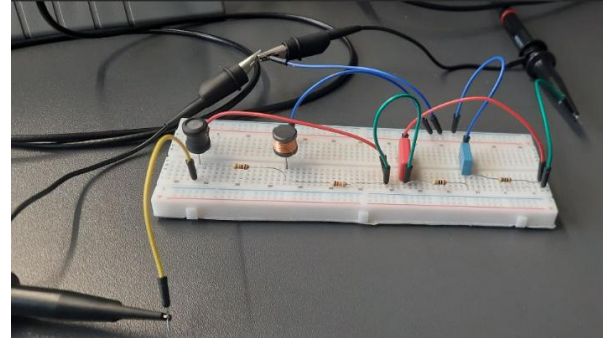
Дослідження схеми 3 (спочатку з індуктивностями)

Наступним етапом досліджувалася схема 3 (рис. 4.3), у якій первинно в коло включалися котушки індуктивності (схема 1), а після них каскад з ємнісними елементами (схема 2). У процесі експерименту окремо аналізувався вплив індуктивності L1 (10 мГн, 22 мГн, 33 мГн, 47 мГн), ємності C2 (2,2 нФ, 3,3 нФ, 4,7 нФ, 6,8 нФ), активних опорів R1 (5,1 Ом, 20 Ом, 100 Ом) та R4 (3 кОм, 5,1 кОм, 11 кОм).

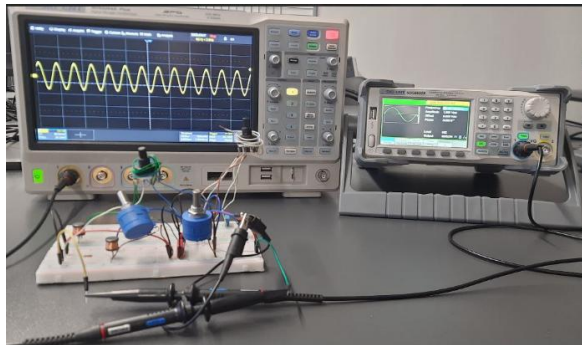
Для кожної з конфігурацій знімалася повна АЧХ у заданому частотному діапазоні. Оскільки ці всі конфігурації схем є типовими, то всі конфігурації схем висвітлювати недоцільно, необхідні графіки будуть зображені у підрозділі 4.2. Нижче зображено досліджувану схему 3 у двох варіаціях.



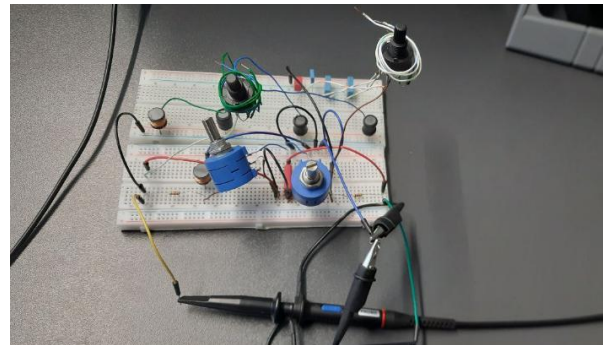
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.3 – Дослідження впливу номіналів елементів на АЧХ схеми 3: а) процес вимірювання початкової конфігурації без регулюючих елементів; б) вигляд зібраної початкової схеми на макетній платі; в) процес вимірювання АЧХ після додавання потенціометрів і перемикачів; г) вигляд модифікованої схеми

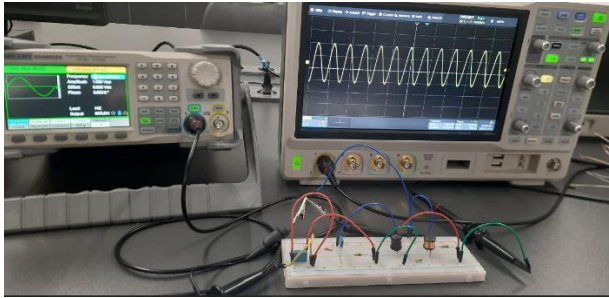
Дослідження схеми 4 (спочатку з ємностями)

По аналогії до минулої схеми 3, було замінено каскад індуктивностей (схема 2) та ємностей (схема 1) на макетній платі місцями, і створено схему 4 (рис. 4.4), номінали опорів при цьому при першочерговій збірці було замінено.

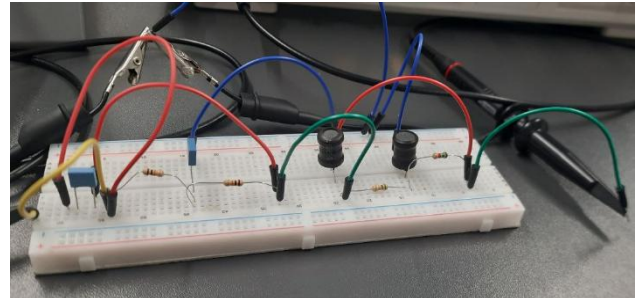
В даній схемі досліджувався вплив елементів R_2 (3 кОм, 5,1 кОм, 11 кОм), R_3 (5,1 Ом, 20 Ом, 100 Ом), C_1 (2,2 нФ, 3,3 нФ, 4,7 нФ, 6,8 нФ) і L_2 (10 мГн, 22 мГн, 33 мГн, 47 мГн).

В подальшому схема була доповнена аналогічно до попередніх потенціометрами та 5-позиційним перемикачем (рис. 4.4 в, г).

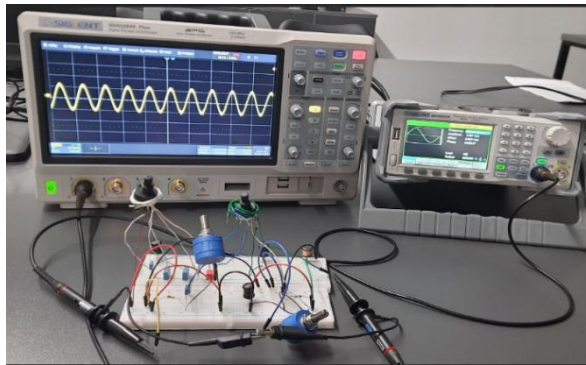
У модифікованому варіанті з'явилася можливість швидко перемикатися між різними номіналами ємностей та здійснювати плавне регулювання опору, що суттєво спростило проведення експериментів.



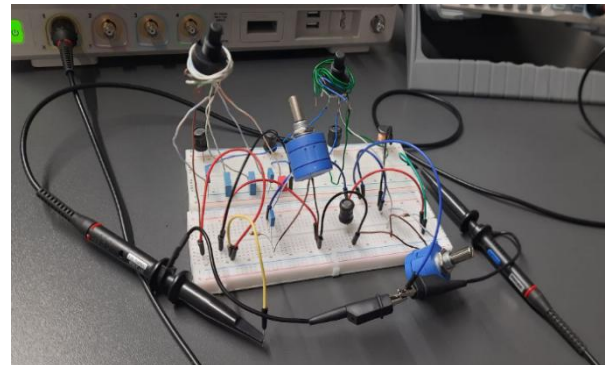
а)



б)



в)



г)

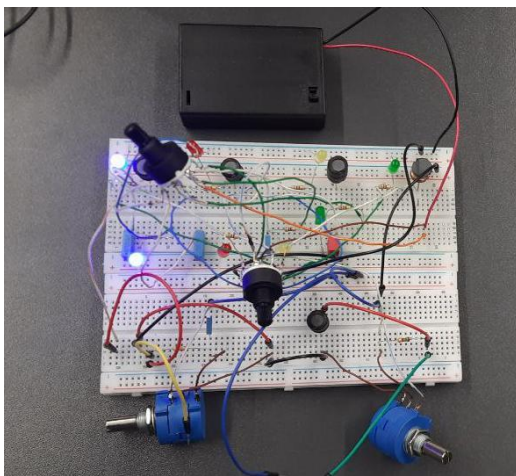
Рисунок 4.4 – Дослідження впливу номіналів елементів на АЧХ схеми 4: а) процес вимірювання початкової конфігурації без регулюючих елементів; б) вигляд зібраної початкової схеми на макетній платі; в) процес вимірювання АЧХ після додавання потенціометрів і перемикачів; г) вигляд модифікованої схеми

Важливо відмітити, що з метою візуального контролю активного номіналу елементів у процесі експериментальних досліджень у одну із схем, у всі немає сенсу, оскільки ціллю експерименту було вимірювання АЧХ схем, було введено світлодіодну індикацію (рис. 4.5). Світлодіоди встановлювалися на макетній платі після відповідних елементів магазинів індуктивностей та ємностей через струмообмежувальні резистори номіналом 510 Ом. Живлення ланцюга індикації здійснювалося від окремого автономного джерела напруги

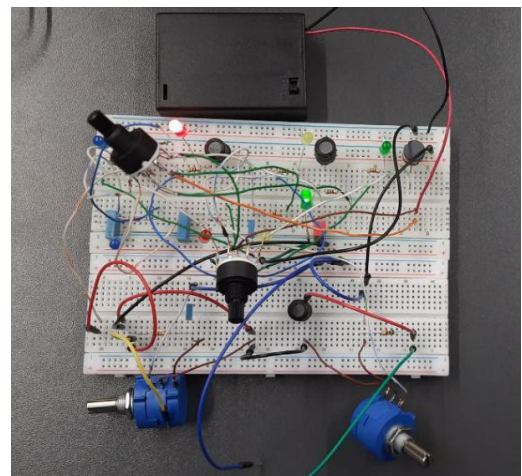
4,5 В, що дозволило повністю відокремити індикаційне коло від досліджуваної схеми та уникнути впливу світлодіодів на її електричні параметри.

Комутація світлодіодів виконувалася за допомогою перемикача з двома контактними групами, який забезпечував одночасне перемикання як силових елементів (котушок або конденсаторів), так і відповідних індикаторів. У кожному положенні ключа активізувався лише один світлодіод, що відповідав обраному номіналу елемента. Такий підхід дозволив наочно відслідковувати, який саме елемент у даний момент підключений до схеми, без необхідності візуальної перевірки з'єднань.

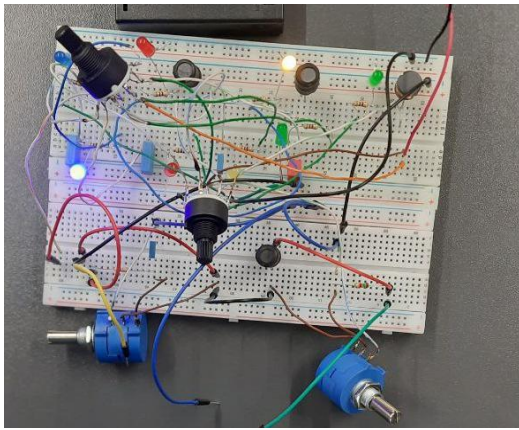
На рис. 4.5 зафіксовано роботу індикаторів у різних положеннях перемикача, де кожен колір світлодіода відповідає конкретному номіналу елемента. Перемикання супроводжується чіткою зміною активного світлодіода, що підтверджує коректність роботи схеми індикації та правильну синхронізацію між контактними групами перемикача.



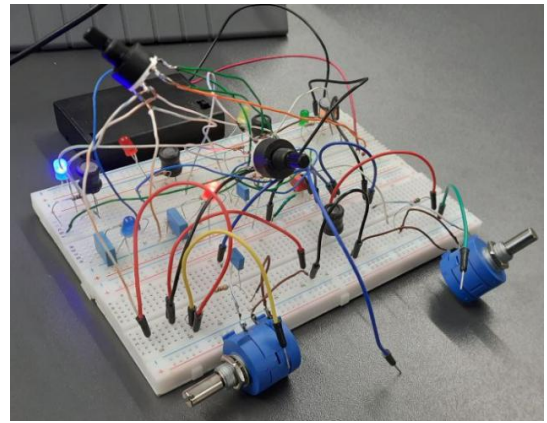
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.5 – Приклад зібраної схеми з світлодіодною індикацією, перемикачами та потенціометрами: а) схема дослідження з ввімкненими $C1 = 2,2 \text{ нФ}$ і $L2 = 10 \text{ мГн}$; б) схема дослідження з ввімкненими $C1 = 6,8 \text{ нФ}$ і $L2 = 22 \text{ мГн}$; в) схема дослідження з ввімкненими $C1 = 2,2 \text{ нФ}$ і $L2 = 33 \text{ мГн}$; г) схема дослідження з ввімкненими $C1 = 3,3 \text{ нФ}$ і $L2 = 10 \text{ мГн}$

4.2 Порівняння результатів частотних характеристик отриманих експериментально та у програмному середовищі Multisim

Для наочного порівняння амплітудно-частотних характеристик, отриманих експериментальним шляхом на макетних платах, та результатами комп'ютерного моделювання в середовищі Multisim було створено відповідні порівняльні графіки (рис. 4.6 – 4.14). Відповідні таблиці з даними графіків були перенесені до додатку А.

На графіках суцільною лінією зображено результати, отримані експериментально, а пунктирною — комп'ютерне моделювання в Multisim.

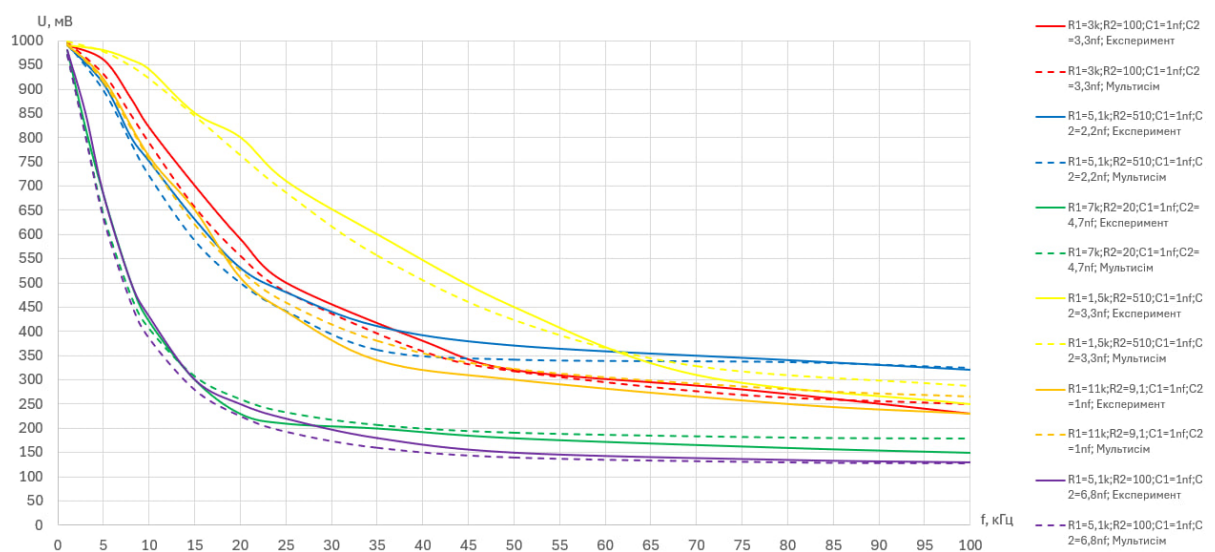


Рисунок 4.6 – Вплив номіналу ємності $C2$ на АЧХ в схемі 1 (з ємностями)

Комп'ютерне моделювання в цілому співпадає з отриманими експериментальними графіками. Аналізуючи графік видно, що зі збільшенням ємності відбувається зсув частоти зрізу в область нижчих частот. Експеримент підтверджує результати моделювання. Максимальні відхилення спостерігаються у зоні переходу та не перевищують 5 %.

Характер графіка дещо нагадує структуру фільтру нижніх частот (ФНЧ).

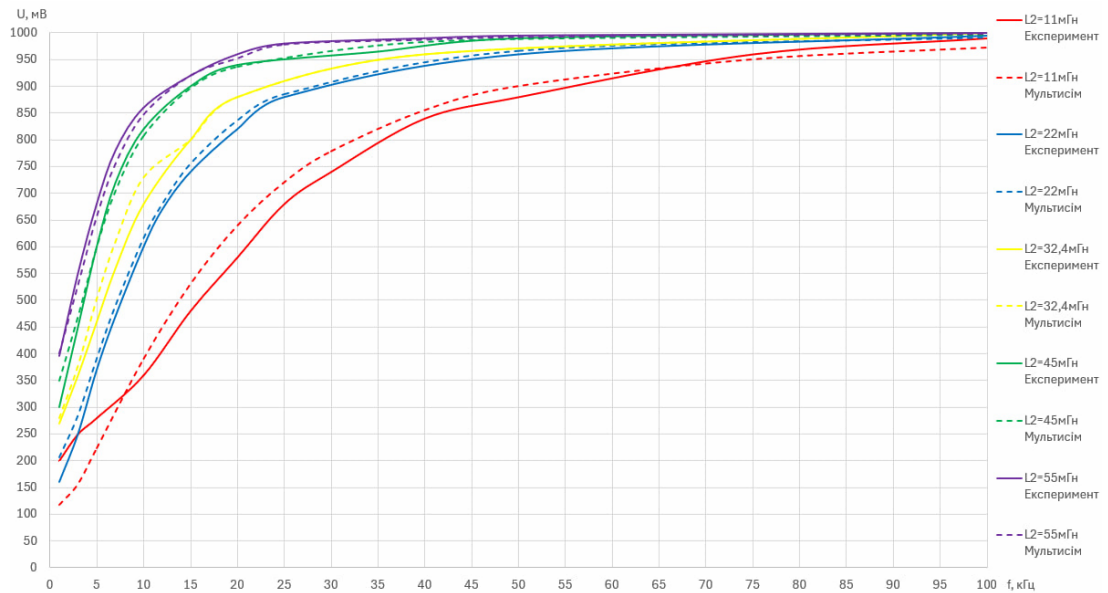


Рисунок 4.7 – Вплив номіналу індуктивності L2 на АЧХ в схемі 2 (з індуктивностями)

На наведеному графіку видно, що зі збільшенням індуктивності L2 гранична частота зміщується в область нижчих частот. Характер кривих, отриманих експериментально та методом комп'ютерного моделювання, є подібним, що підтверджує коректність моделі.

В окремих ділянках спостерігається розбіжність між кривими до 5 % у пікових значеннях, тоді як у середньому відхилення знаходиться в межах 2 %. Така різниця пояснюється:

- допуском номіналів котушок індуктивності,
- активними втратами в обмотках,
- впливом внутрішніх опорів вимірювальних приладів,
- паразитними параметрами макетної плати.
- Великою кількістю з'єднувальних дротів;

Очікується, що безпосередньо на друкованій платі похибка повинна стати дещо меншою за рахунок відсутності з'єднувальних дротів.

Характер графіка дещо нагадує структуру фільтру верхніх частот (ФВЧ).

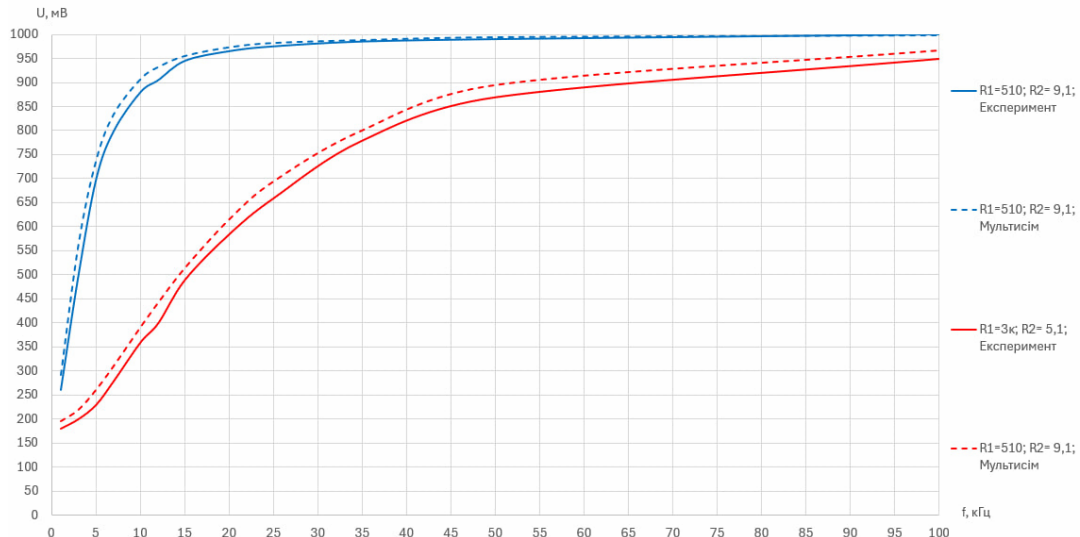


Рисунок 4.8 – Вплив номіналу опорів R1 та R2 на АЧХ в схемі 2

На наведеному графіку видно, що зі збільшенням активного опору зменшується амплітуда вихідного сигналу у всьому робочому частотному діапазоні (особливо помітно на нижніх частотах). Експериментальні та розрахункові криві мають однакову форму, а середня різниця між ними не перевищує 10 %, а в середньому приблизно 5 %, що знаходиться в межах допустимих похибок. Причиною цього є похибка у резисторах (відмінність реального значення від заявленого виробником).

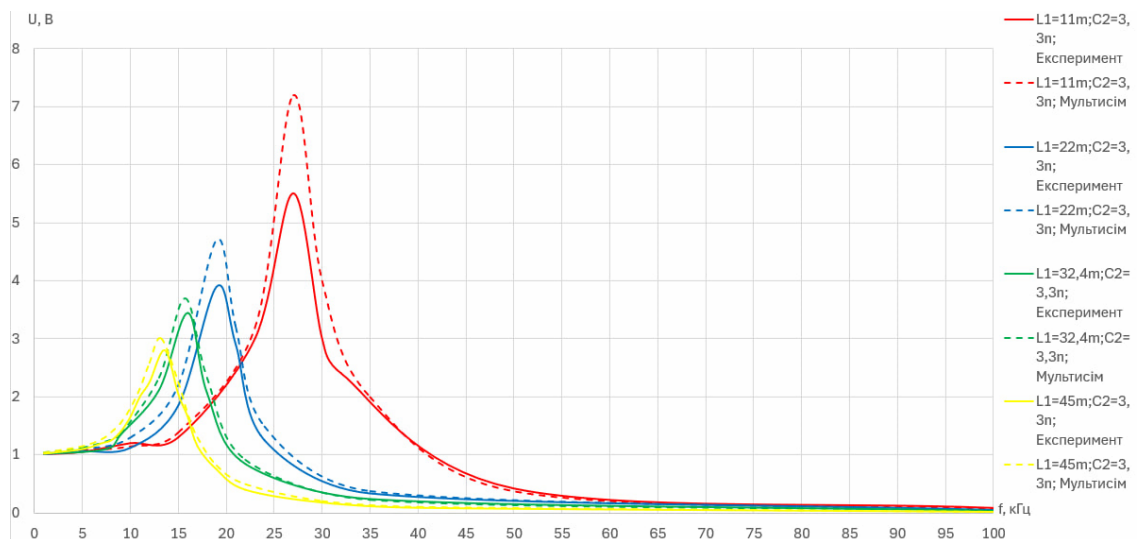


Рисунок 4.9 – Вплив номіналу індуктивності L1 на АЧХ у схемі 3 (спочатку з індуктивностями)

Аналізуючи даний графік, можна відстежити таку тенденцію, що зі збільшенням величини індуктивності на котушці L1, резонансна частота

зміщується в бік нуля, а також зменшується амплітуда сигналу. Найбільш це помітно на резонансній частоті. Також у деяких випадках, резонансна частота експерименту дещо змінюється на декілька сотень Герц.

Порівняння максимальних значень амплітуди сигналу для експерименту та комп'ютерного моделювання в залежності від номіналу котушки індуктивності наведено нижче.

Червоний графік ($L_1=11$ мГн) експеримент – 5,5 В; Multisim – 7,2 В (30,9%).

Синій графік ($L_1=22$ мГн) експеримент – 3,9 В; Multisim – 4,7 В (20,5%).

Зелений графік ($L_1=32,4$ мГн) експеримент 16 кГц – 3,45 В; Multisim – 15,7 кГц - 3,7 В (7,2%).

Жовтий графік ($L_1=45$ мГн) експеримент 13,6 кГц – 2,8 В; Multisim – 13,2 кГц - 3 В (16,3%).

Відмінності на графіку між результатами отриманими експериментально та у Multisim на резонансних частотах в середньому сягають близько 19%. Найбільша розбіжність у піку на червоному графіку 30,9%. У середньому ж по всій АЧХ на всіх графіках розбіжність близько 5%. Причини відмінностей аналогічні до попередніх графіків – це похибка реальних елементів.

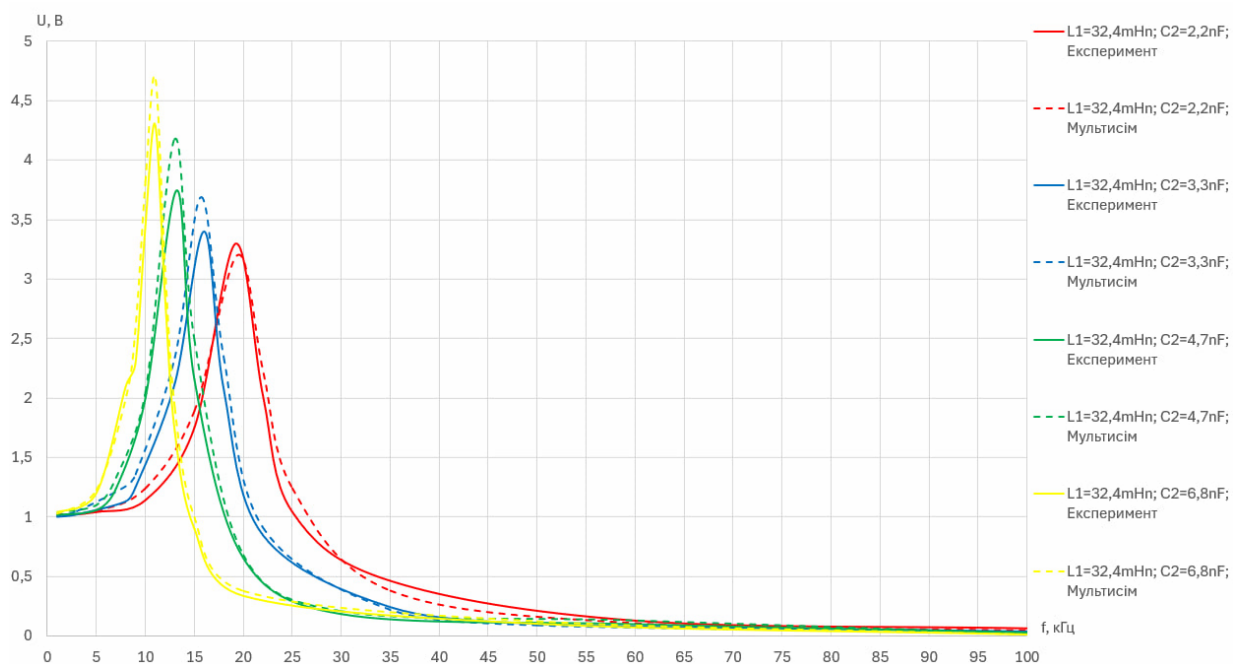


Рисунок 4.10 – Вплив номіналу конденсатора C_2 на АЧХ у схемі 3

Даний графік має дещо іншу структуру, порівняно з графіком 4.9, оскільки тут із збільшенням номіналу ємності C_2 резонансна частота зміщується так само до нуля, проте рівень амплітуди сигналу збільшується.

Порівняння максимальних значень амплітуди сигналу для експерименту та комп'ютерного моделювання в залежності від номіналу конденсатора C_2 наведено нижче.

Червоний графік ($C_2=2,2$ нФ) експеримент – 19,2 кГц – 3,3 В; Multisim – 19,4 кГц - 3,2 В (3%).

Синій графік ($C_2=3,3$ нФ) експеримент – 16 кГц – 3,4 В; Multisim – 15,7 кГц - 3,69 В (8,5%).

Зелений графік ($C_2=4,7$ нФ) експеримент 13,2 кГц – 3,75 В; Multisim – 13 кГц - 4,18 В (11,5%).

Жовтий графік ($C_2=6,8$ нФ) експеримент – 4,3 В; Multisim – 4,7 В (9,3%).

Похибка вимірювань даного графіку в піку складає до 11,5 % на резонансній частоті, порівняно із минулим графіком, де похибка досягала 20% у піку. В середньому ж похибка склала 8%. Висновок такий, що реальні ємності мають кращий допуск, аніж котушки індуктивності.

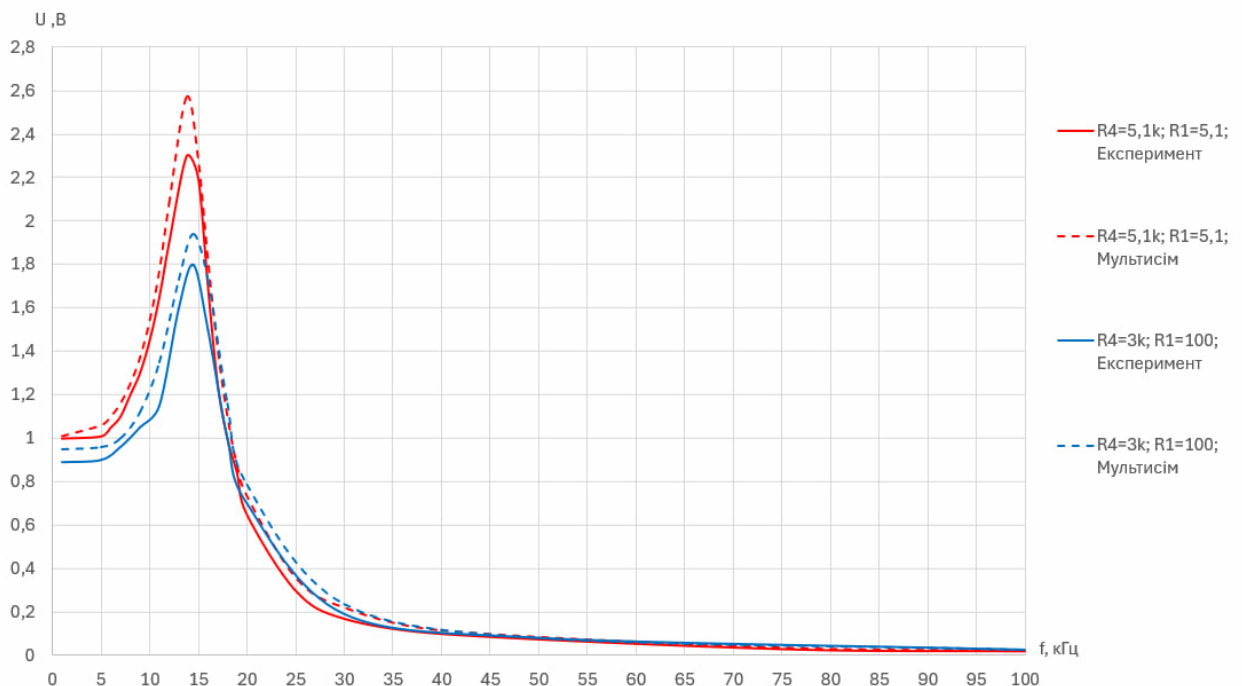


Рисунок 4.11 – Вплив номіналу опорів R_1 та R_4 на АЧХ в схемі 3

Із наведеного графіка видно, що зі збільшенням активного опору R_1 , і навпаки зменшенням опору R_4 зменшується амплітуда вихідного сигналу у всьому робочому частотному діапазоні (особливо помітно на резонансній частоті).

Порівняння максимальних значень амплітуди сигналу для експерименту та комп'ютерного моделювання в залежності від номіналу конденсатора C_2 наведено нижче.

Червоний графік ($R_4=5,1$ кОм, $R_1=5,1$ Ом) на 13,8 кГц експеримент – 2,3 В; Multisim – 2,57 В (11,7%).

Синій графік ($R_4=3$ кОм, $R_1=100$ Ом) на 14,5 кГц експеримент – 1,8 В; Multisim – 1,94 В (7,7%).

Як видно з результатів вимірювань даного графіку похибка в піку складає 11,7% на резонансній частоті. Причиною цього є допуск у резисторах (відмінність реального значення від заявленого виробником), а також наявність великої кількості дрітків у схемі, через що втрати в схемі збільшуються.

Резонансна частота на синьому графіку зі зміною опору також змінилась, збільшилась на 700 Гц, у порівнянні з червоним графіком.

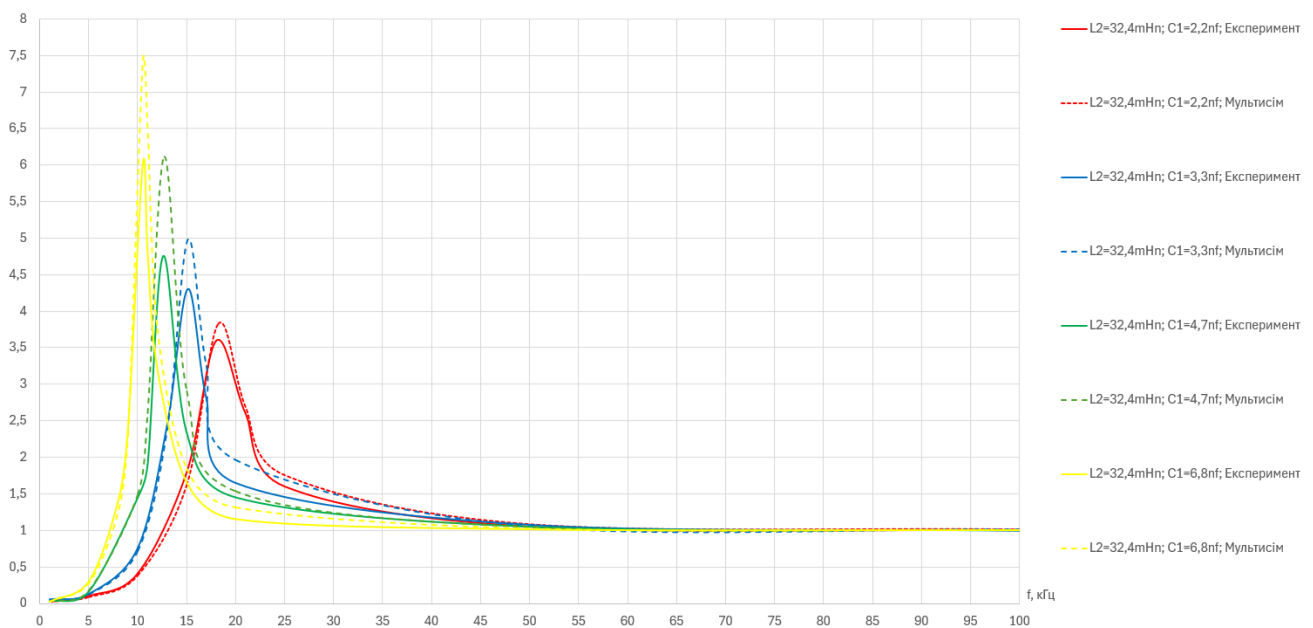


Рисунок 4.12 – Вплив номіналу конденсатора C_1 на АЧХ в схемі 4 (спочатку з ємностями)

На даному графіку видно, що аналогічно до рис 4.10 зі збільшенням ємності C_1 резонансна частота зміщується в бік нуля, проте рівень амплітуди сигналу зростає.

Нижче приведено порівняння максимальних значень амплітуди сигналу для експерименту та комп'ютерного моделювання в залежності від номіналу ємності C_1 .

Червоний графік ($C_1=2,2$ нФ) експеримент – 18 кГц – 3,6 В; Multisim – 18,2 кГц – 3,82 В (6,1%).

Синій графік ($C_1=3,3$ нФ) 15,1 кГц - експеримент – 4,3 В; Multisim – 4,98 В (15,8%).

Зелений графік ($C_1=4,7$ нФ) експеримент 12,6 кГц – 4,75 В; Multisim – 12,7 кГц – 6,11 В (28,6%).

Жовтий графік ($C_1=6,8$ нФ) 10,5 кГц - експеримент – 6 В; Multisim – 7,38 В (23%).

Похибка вимірювань даного графіку в піку складає до 28,6% на резонансній частоті. В середньому ж по всьому частотному діапазону похибка склала близько 7%.

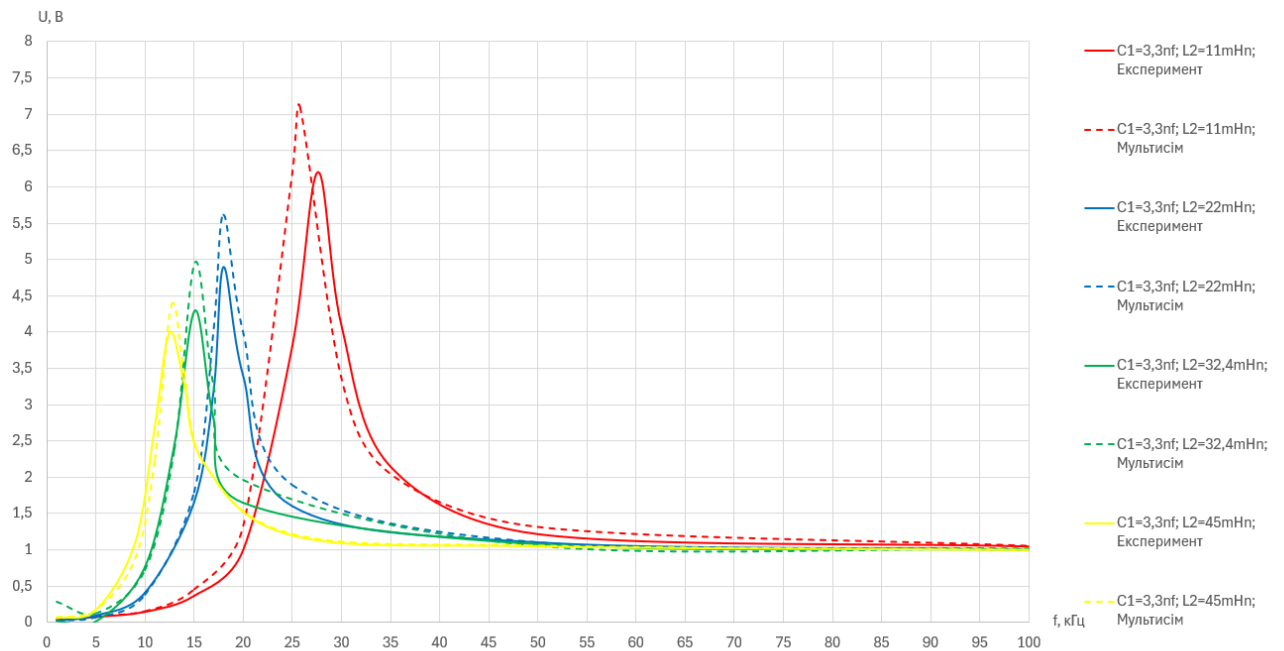


Рисунок 4.13 – Вплив номіналу індуктивності L_2 на АЧХ в схемі 4

Аналізуючи даний графік видно, що аналогічно до графіку 4.9 зі збільшенням величини індуктивності на котушці L_2 , резонансна частота зміщується в бік нуля, а також зменшується амплітуда сигналу. Найбільш це помітно на резонансній частоті.

Порівняння максимальних значень амплітуди сигналу для експерименту та комп'ютерного моделювання в залежності від номіналу індуктивності L_2 приведено нижче.

Червоний графік ($L_1=11$ мГн) експеримент – 27,6 кГц – 6,2 В; Multisim – 25,8 кГц – 7,09 В (14,3%).

Синій графік ($L_1=22$ мГн) 18 кГц - експеримент – 4,9 В; Multisim – 5,62 В (14,7%).

Зелений графік ($L_1=32,4$ мГн) 15,1 кГц експеримент – 4,3 В; Multisim – 4,96 В (15,3%).

Жовтий графік ($L_1=45$ мГн) експеримент 12,5 кГц – 4 В; Multisim – 12,7 кГц – 4,37 В (9,25%).

Відмінності на графіку між результатами отриманими експериментально та у Multisim на резонансних частотах в середньому сягають 13,4%. Найбільша розбіжність у піку на зеленому графіку 15,3%. У середньому ж по всій АЧХ на всіх графіках розбіжність близько 6%. Також різниця резонансний частот на червоному графіку становить 1,8 кГц.

Розбіжність резонансних частот (27,6 кГц експериментально і 25,8 кГц у моделюванні) відповідає зменшенню добутку $L \times C$ у реальній схемі приблизно на 12,6%. Найімовірніші причини — допуск номіналів пасивних елементів (особливо індуктивностей), а також відмінність реальних параметрів від ідеалізованих моделей Multisim.

Нижче на рис. 4.14 приведено графік впливу номіналу опорів R_2 та R_3 на АЧХ в схемі 4.

Аналогічно до графіку 4.11, порівнюючи червоний та синій графіки видно, що зі збільшенням опору R_3 збільшується амплітуда сигналу, і навпаки із зменшенням опору R_2 зменшується амплітуда вихідного сигналу у

всьому робочому частотному діапазоні (особливо помітно на резонансній частоті).

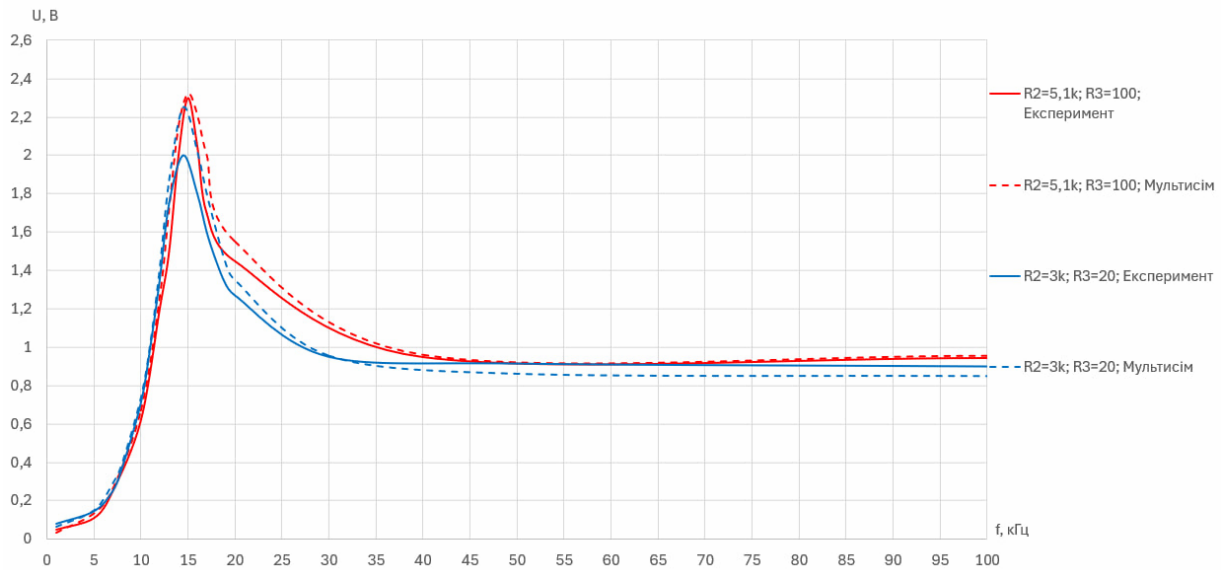


Рисунок 4.14 – Вплив номіналу опорів R2 та R3 на АЧХ в схемі 4

Червоний графік ($R_2=5,1 \text{ кОм}$, $R_3=100 \text{ Ом}$) на 15 кГц експеримент – 2,3 В; Multisim – 2,32 В (0,86%).

Синій графік ($R_2=3 \text{ кОм}$, $R_3=20 \text{ Ом}$) на 14,5 кГц експеримент – 2 В; Multisim – 2,25 В (12,5%).

Аналізуючи результати вимірювань даних графіків похибка в піку складає 12,5% на резонансній частоті. Причиною цього є допуск у резисторах (відмінність реального значення від заявленого виробником), а також наявність великої кількості дрітів у схемі, через що втрати в схемі збільшуються.

Резонансна частота на синьому графіку зі зміною опору також змінилась, зменшилась на 500 Гц, у порівнянні з червоним графіком.

Отже в даному розділі було успішно проведено експериментальне дослідження, збірку схем на макетних та платах порівняно отримані АЧХ з комп'ютерним моделюванням. Наступний розділ присвячений проектуванню друкованої плати у програмі Altium Designer та корпусу для неї у програмі для 3Д моделювання SolidWorks.

5. ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ТА КОРПУСУ

5.1 Проєктування друкованої плати в програмному середовищі Altium Designer

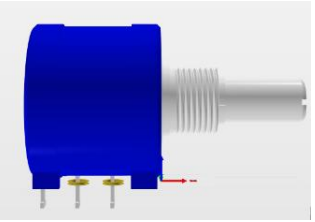
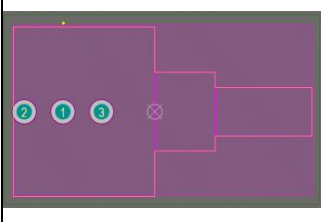
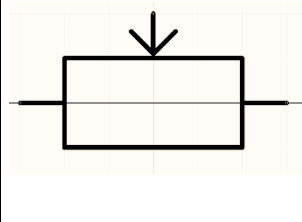
Проєктування ДП лабораторного макета виконувалося з використанням програми Altium Designer [11], в якому існує можливість реалізації повного циклу розробки електронних пристроїв — від створення бібліотек компонентів, до отримання файлів, необхідних для виготовлення плати та подальшого складання виробу.

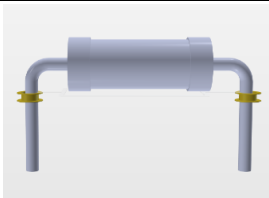
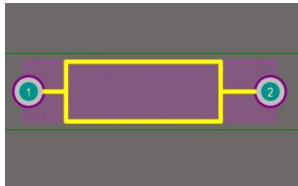
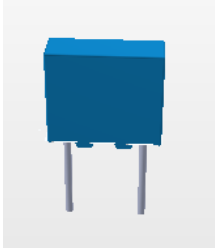
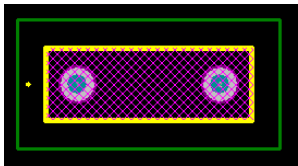
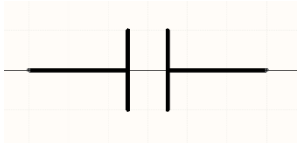
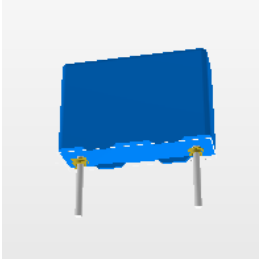
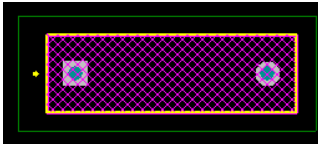
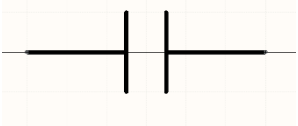
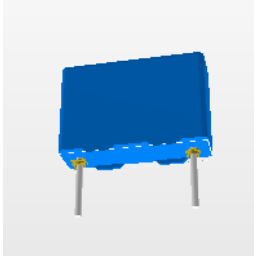
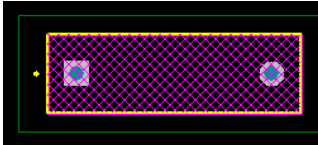
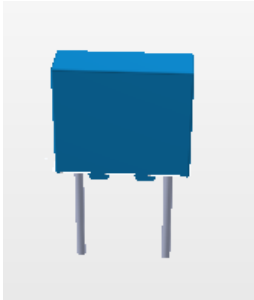
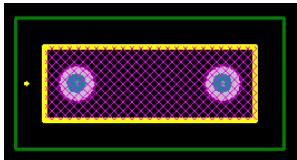
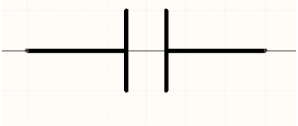
5.1.1 Бібліотека компонентів

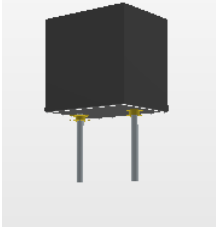
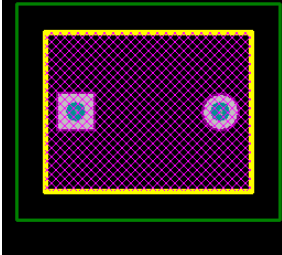
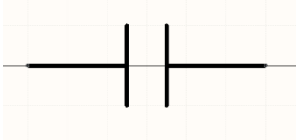
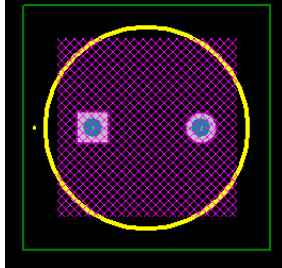
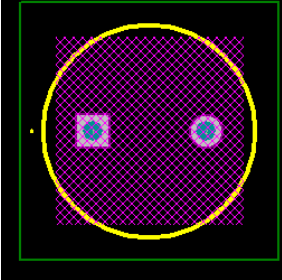
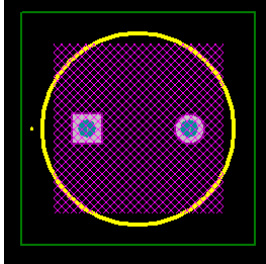
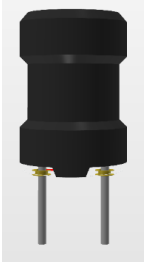
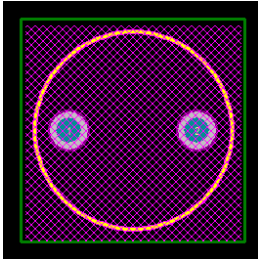
Оскільки кожен компонент повинен мати умовне графічне позначення згідно з єдиною системою конструкторської документації (у подальшому ЄСКД), посадкове місце та 3Д модель, то першочерговим етапом роботи в Altium є створення бібліотеки Schematic library (Sch library) для умовного графічного позначення на схемі компонентів, а також бібліотека Printed Circuit Board (у подальшому PCB) library, в якій повинні міститись 3Д моделі та footprint кожного компонента. [12]

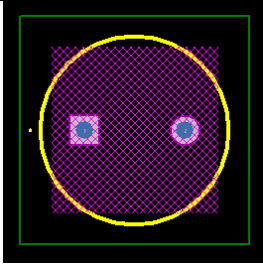
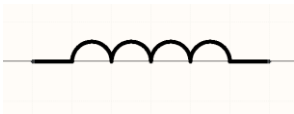
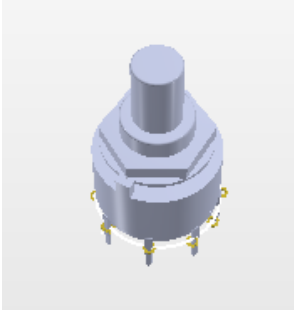
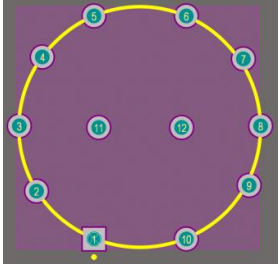
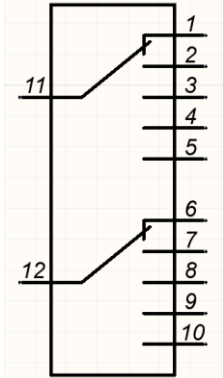
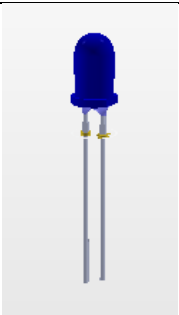
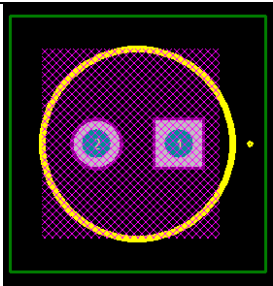
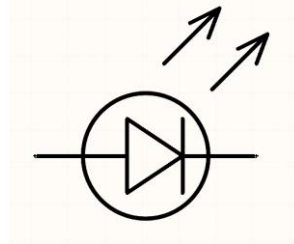
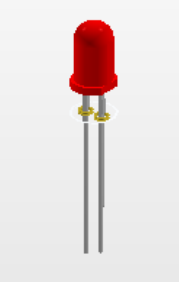
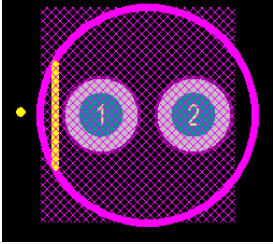
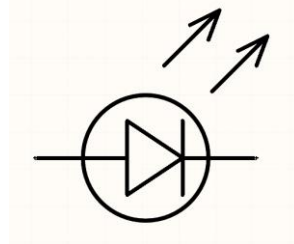
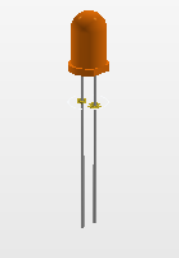
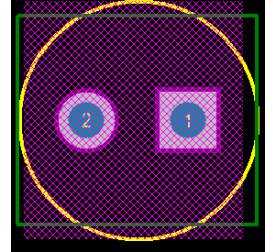
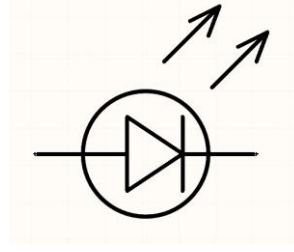
Нижче в таблиці 5.1 продемонстровано бібліотеки компонентів, які були використані при створенні ДП.

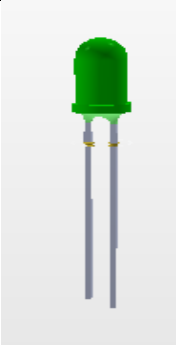
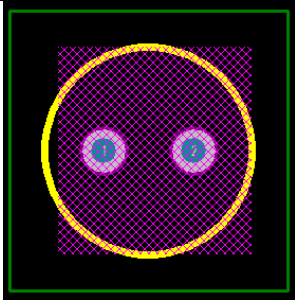
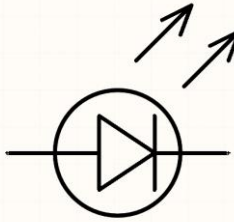
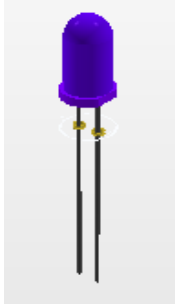
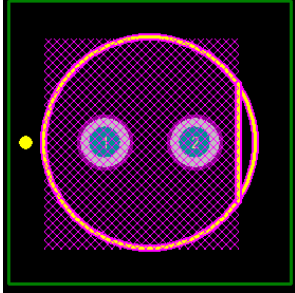
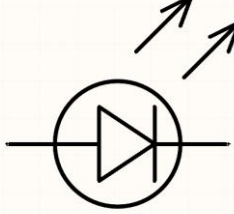
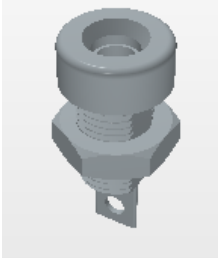
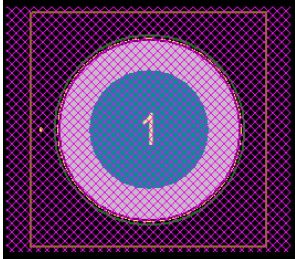
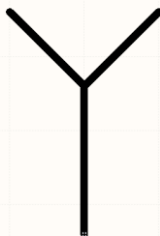
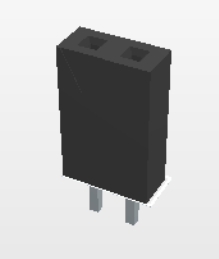
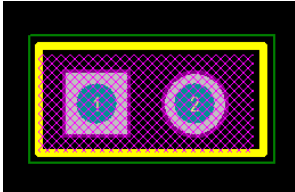
Таблиця 5.1 – Список компонентів, посадкове місце, 3Д-модель, УГП

Компонент	3Д-модель	Посадкове місце	Умовне графічне позначення
Потенціометр 10 кОм Bourns 3590S-103L			

Резистор вивідний 510 Ом, 0,25 Вт			
Конденсатори			
1 нФ, EPCOS/TDK B32529C0102J289			
2,2 нФ, EPCOS/TDK B32021A3222M00 0			
3,3 нФ, EPCOS/TDK B32021A3332M00 0			
4,7 нФ, EPCOS/TDK B32529C3472K28 9			

6,8 нФ, WIMA, FKP2D016801G00 HSSD			
Котушки індуктивності			
10 мГн, Bochen DR 0912			
22 мГн, Bochen DR 0912			
33 мГн, Bochen DR 0912			
47 мГн, Sumida RCH895NP-473K			

100 мГн, Vochen DR 0912			
Перемикач RS16- 5POS-2POL			
Світлодіоди			
Синій, KINGBRIGHT ELECTRONIC L- 53P3C			
Червоний, KINGBRIGHT ELECTRONIC L- 53ID			
Жовтий, KINGBRIGHT ELECTRONIC L- 53YD			

Зелений, KINGBRIGHT ELECTRONIC L53SGD			
Фіолетовий, KINGBRIGHT ELECTRONIC L53PD			
Роз'єм 2 мм, BAJ- 001-NR, KLS			
Роз'єм під живлення світлодіодів Connfly DS1023-1*2S21			

5.1.2 Створення схеми електричної принципової [4]

Після створення бібліотек було виконано розробку електричної принципової схеми лабораторного макета (рис. 5.2) з урахуванням структурної організації чотириполісників, правил оформлення конструкторської документації [5],[14], а також системи перемикавання номіналів елементів та кола світлодіодної індикації. СЕП було спроектовано у форматі A3 (додаток Б), орієнтуючись на схемах, виконаних у минулих розділах.

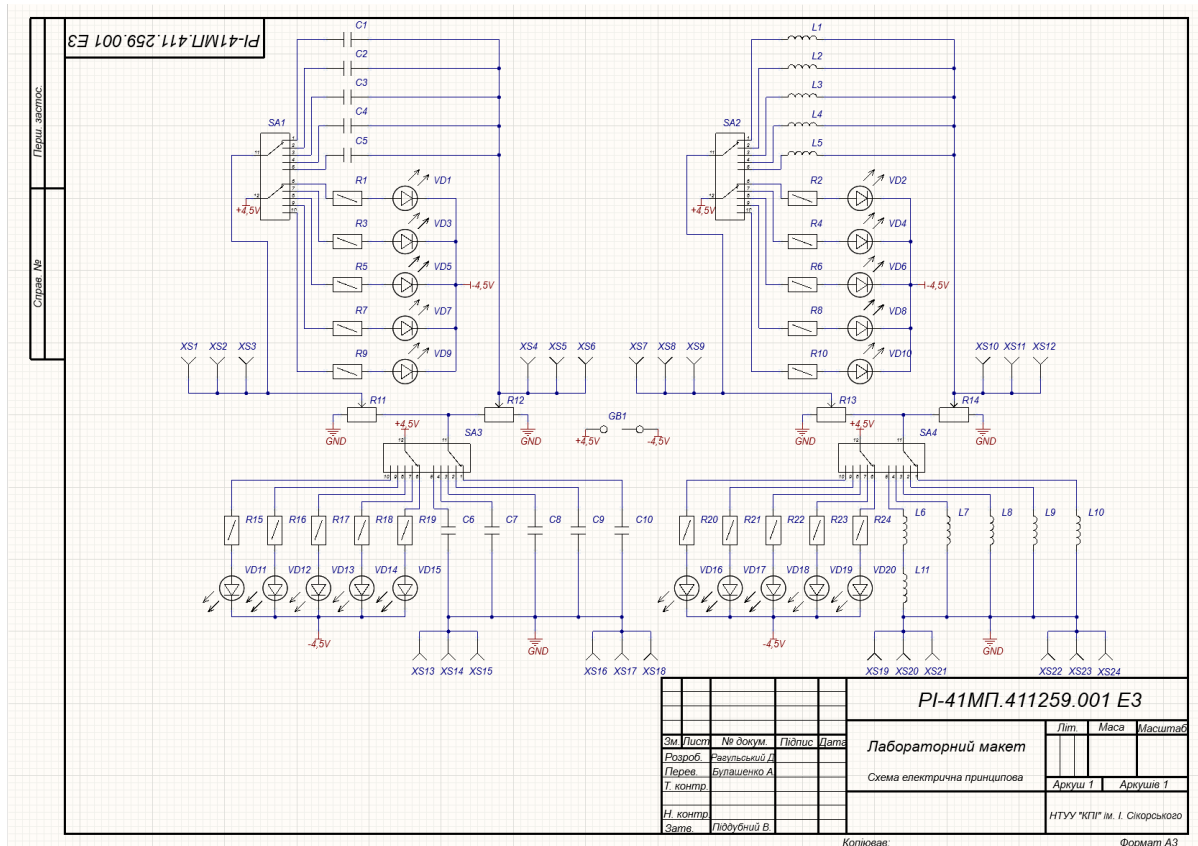


Рис. 5.2 – Схема електрична принципова лабораторного макету

Побудова принципової схеми виконувалася з дотриманням логічної структуризації: елементи згруповані за функціональним призначенням, ланцюги живлення та індикації виділені окремо, а сигнальні тракти розташовані таким чином, щоб забезпечити наочність схеми та спростити її аналіз. Такий підхід полегшує подальше трасування друкованої плати, зменшує ймовірність помилок при монтажі та сприяє зручності використання макета в навчальному процесі.

На основі СЕП здійснено перенесення компонентів у редактор друкованих плат з подальшим формуванням топології. Після створення схеми була проведена робота в редакторі РСВ, а саме виконано розміщення елементів, проведено трасування ДП, змінено параметри стеку плати (рис. 5.3), а саме виставлено матеріал діелектрика на склотекстоліт (FR-4) і змінено його ширину на 1,5 мм [20]. FR-4 має хорошу електроізоляцію, низький коефіцієнт теплового розширення, високу міцність, доступну ціну та низькі втрати. Даний матеріал пройшов випробовування часом та є основою для

більшості компаній, які спеціалізуються на розробці та технологічному виробленні ДП. Нижче приведено видозмінений стек ДП.

Рисунок 5.3 – Стек ДП лабораторного макету пасивних чотириполюсників

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.4mil	3.5	
1	Top Layer		Signal	1oz	1.4mil		
	Dielectric 1	FR-4	Dielectric		62mil	4.8	
2	Bottom Layer		Signal	1oz	1.4mil		
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.4mil	3.5	
	Bottom Overlay		Overlay				

5.1.3 Розрахунок оптимальних розмірів друкованої плати [7]

Вибір габаритних розмірів друкованої плати лабораторного макету здійснювався на основі аналізу елементної бази, особливостей компонування та вимог до наочності навчального обладнання. На відміну від промислових пристроїв, де пріоритетом є мінімізація площі, у даній роботі основний акцент зроблено на зручність візуального сприйняття схеми, доступність елементів та можливість аналізу топології з'єднань безпосередньо на платі. Крім того, плата була спроектована симетрично, оскільки макет містить чотири функціонально ідентичні частини. Така симетрія не лише покращує зовнішній вигляд пристрою, але й спрощує аналіз роботи схем та порівняння результатів під час лабораторних досліджень.

Окрему увагу було приділено розміщенню котушок індуктивності. Враховуючи наявність паразитних магнітних зв'язків між індуктивними елементами, котушки були просторово рознесені по платі та орієнтовані таким чином, щоб мінімізувати взаємний вплив їх магнітних полів. Такий підхід дозволяє зменшити похибки вимірювань частотних характеристик та підвищити повторюваність експериментальних результатів.

Для об'єктивного обґрунтування розмірів плати було виконано оцінку габаритів основних компонентів, що використовуються в лабораторному макеті, а також розрахунок їх сумарної займаної площі (таблиця 5.4) з

урахуванням монтажних зазорів, нанесення шарів полігону і трасування доріжок шириною 30 mil (0,76 мм).

Таблиця 5.4 – Оцінка займаної площі компонентів лабораторного макету

Компонент	Кількість, шт.	Розрахункові габарити, мм (L×W)	Площа одного елемента, мм ²	Сумарна площа, мм ²
Потенціометр Bourns 3590S-2-103L	4	25 × 25	625	2500
Індуктивність 10, 22, 33, 100 мГн Bochen DR0912	9	12 × 12	144	1296
Індуктивність 47 мГн Sumida RCH895NP-473K	2	13 × 13	169	338
Конденсатор 1 нФ, 4,7 нФ EPCOS/TDK B32529	4	18 × 7	126	504
Конденсатор 2,2 нФ, 3,3 нФ EPCOS/TDK B32021	4	10 × 6	60	240
Конденсатор 6,8 нФ WIMA FKP2	2	18 × 7	126	252
Перемикач поворотний SR16A-2-5-18T-15	4	20 × 15	300	1200
Світлодіоди KINGBRIGHT	20	5 × 5	25	500
Роз'єм живлення DS1023-1×2S21	1	10 × 5	50	50
Роз'єм типу «Banana Jack» BAJ-001-NR, KLS	24	9 × 10	90	2160
Резистор вивідний 510 Ом, 0,25 Вт	20	6 × 2	12	240

Після уточнення складу елементної бази було виконано перерахунок сумарної площі, займаної компонентами лабораторного макету. Розрахункові габарити елементів визначались з урахуванням монтажних зазорів, необхідних для ручного монтажу, зручності експлуатації та зменшення взаємного впливу між індуктивними елементами. Отже, сумарна зайнята площа компонентами складає $S_{\text{комп}} = 9924 \text{ мм}^2$.

На основі цього значення було обрано оптимальний розмір друкованої плати (рис. 5.5).

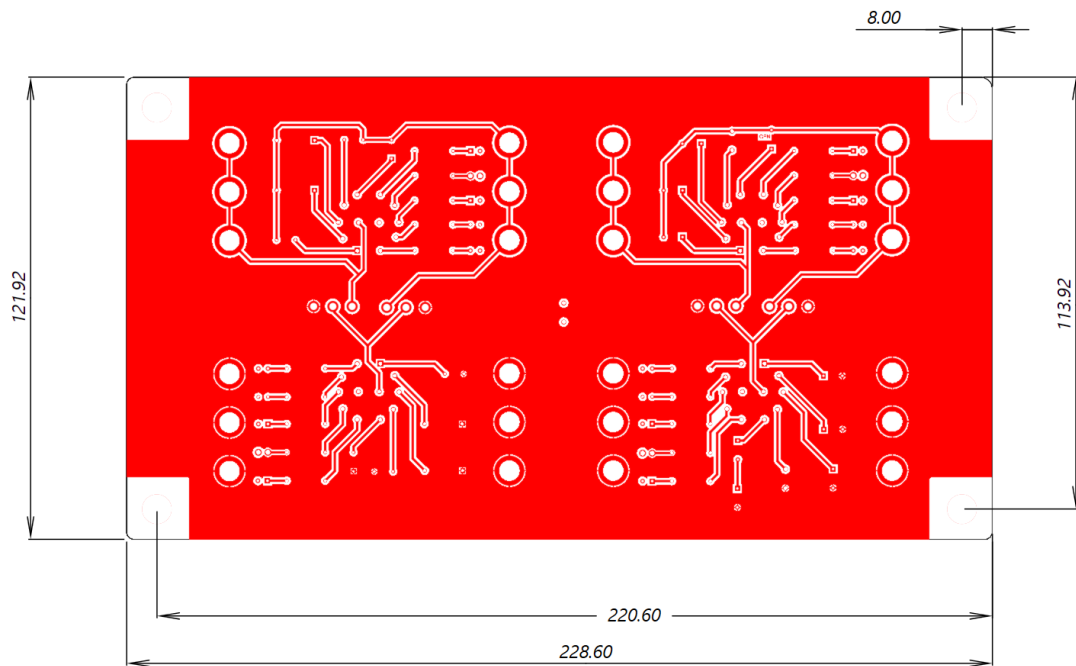


Рисунок 5.5. – Оптимальні габарити друкованої плати

На рис. 5.5 видно, що довжина L плати складає 228,6 мм, а ширина W – 121,92 мм. Площа плати визначається як: $S_{\text{ДП}} = L \times W = 228,6 \times 121,92 \approx 27871 \text{ мм}^2$.

Знаючи площу всіх компонентів, та знаючи площу обраної плати, був розрахований коефіцієнт заповнення друкованої плати за формулою:

$$K_{\text{зап}} = \frac{S_{\text{комп}}}{S_{\text{ДП}}} = \frac{9924}{27871} \times 100\% = 0,36 \times 100\% = 36\%. \quad (5.1)$$

Загальна площа, зайнята компонентами, становить близько 36 % площі ДП. Решта площі використовується для прокладання доріжок шириною 30 міл, формування заземлювальних полігонів та симетричного компонування функціональних вузлів. Такий підхід є доцільним для лабораторного

обладнання навчального призначення, оскільки забезпечує зручність експлуатації та візуального аналізу схеми.

5.1.4 Трасування друкованої плати

Після виконання розрахунків площ, наступним етапом проєктування ДП є трасування друкованої плати. Важливим аспектом перед початком розведення ДП є створення низки правил в проєкті Altium PCB. Основні правила, які були змінені це налаштування відступу полігону від інших елементів у 0,3 мм, щоб уникнути коротких замикань, також ширина провідників (обирається в залежності від типу ліній). Наприклад, якщо лінія є силовою, то її потрібно робити товщою а ніж сигнальну, оскільки струм на силовій лінії буде вищий, то відповідно в правилах були виставлені мінімальні розміри ліній 0,5 мм (20 mil), переважні 0,76 мм (30 mil), і максимальні 1,1 мм (40 mil).

Для того щоб визначитись, яку ширину провідників обирати, необхідно звернутись до калькулятора розрахунку ширин ліній в залежності від сили струму, що протікає по доріжкам. Проте оскільки в даній друкованій платі використовуються звичайні вивідні компоненти, які не сильно залежать від надзвичайно чіткого визначення ширини доріжки, то було прийняте рішення взяти середнє значення ширини ліній провідника, а саме 0,76 мм, оскільки таким чином можна поєднати принципово важливі аспекти лабораторного макету, а саме візуальну складову і технічну, адже 0,76 мм товщина доріжки є достатньою для силової лінії живлення напругою 4,5 В.

Ланцюги живлення світлодіодної індикації прокладалися на нижньому шарі ДП, тоді як сигнальні з'єднання реалізовувалися на верхньому шарі з дотриманням кутів повороту 45°, що забезпечує акуратну та наочну структуру топології.

Для зниження електромагнітних шумів на платі, зменшення паразитних впливів та для виконання заземлення після завершення розведення

провідників було сформовано полігони (ланцюг GND) у верхньому (рис. 5.6) та нижньому (рис. 5.7) шарах плати.

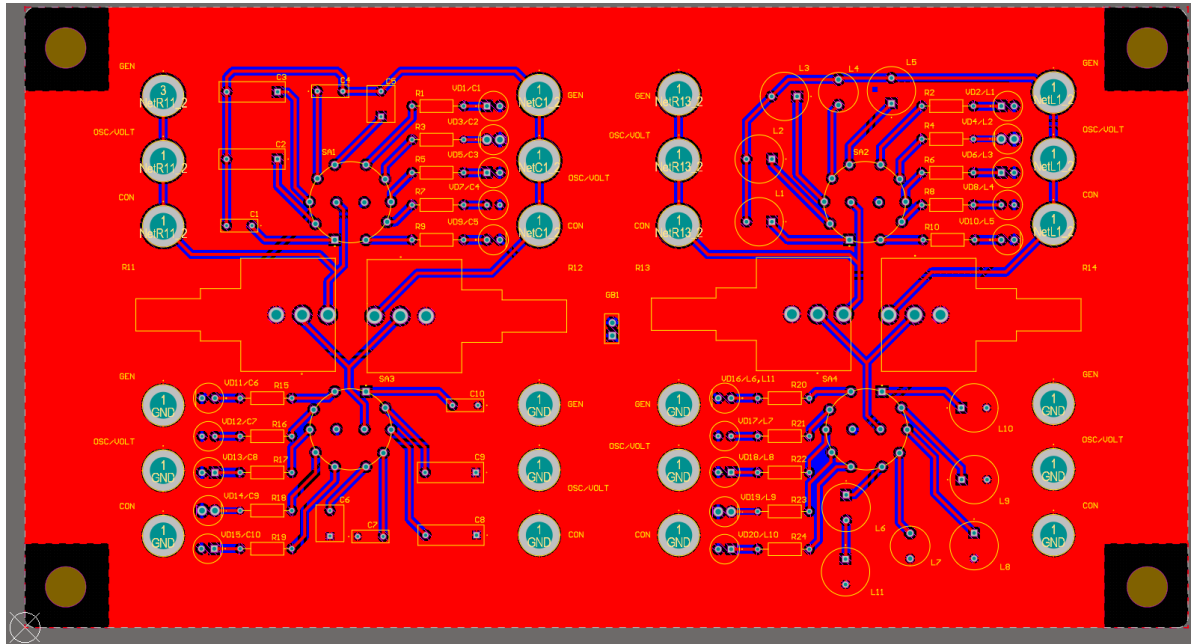


Рисунок 5.6 – Верхній шар друкованої плати

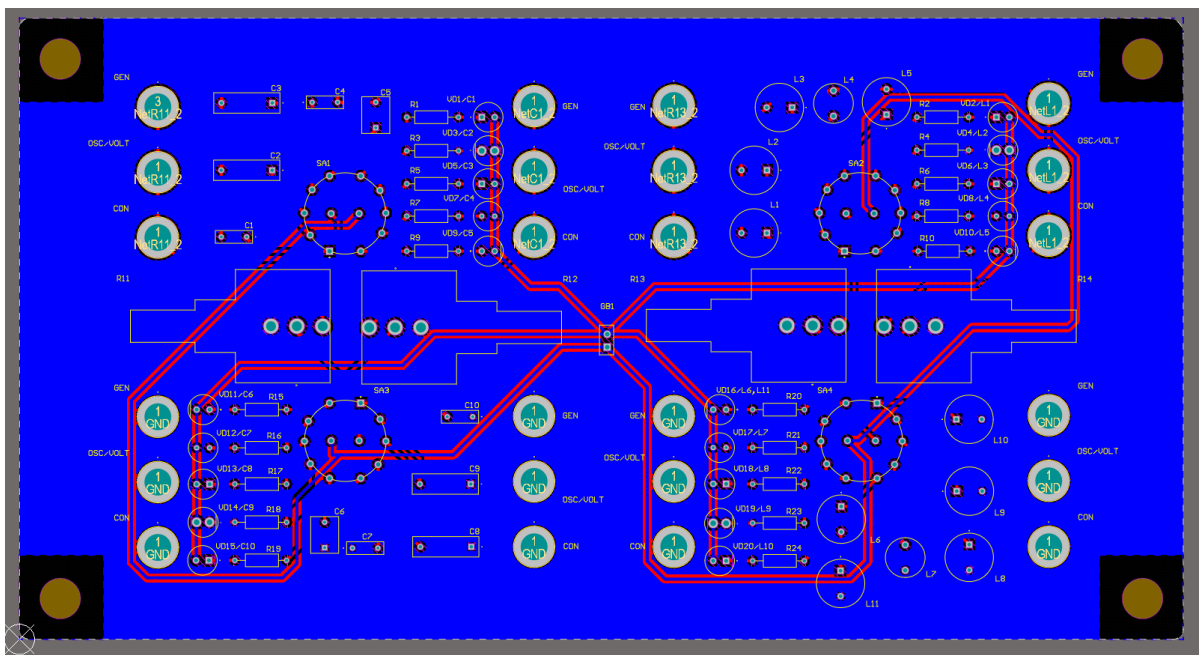


Рисунок 5.7 – Нижній шар друкованої плати

Для кращого розуміння призначення та розташування компонентів, було додано шар шовкографії поблизу компонентів. Нижче представлено зображення у 3Д вигляді друкованої плати (рис. 5.8).

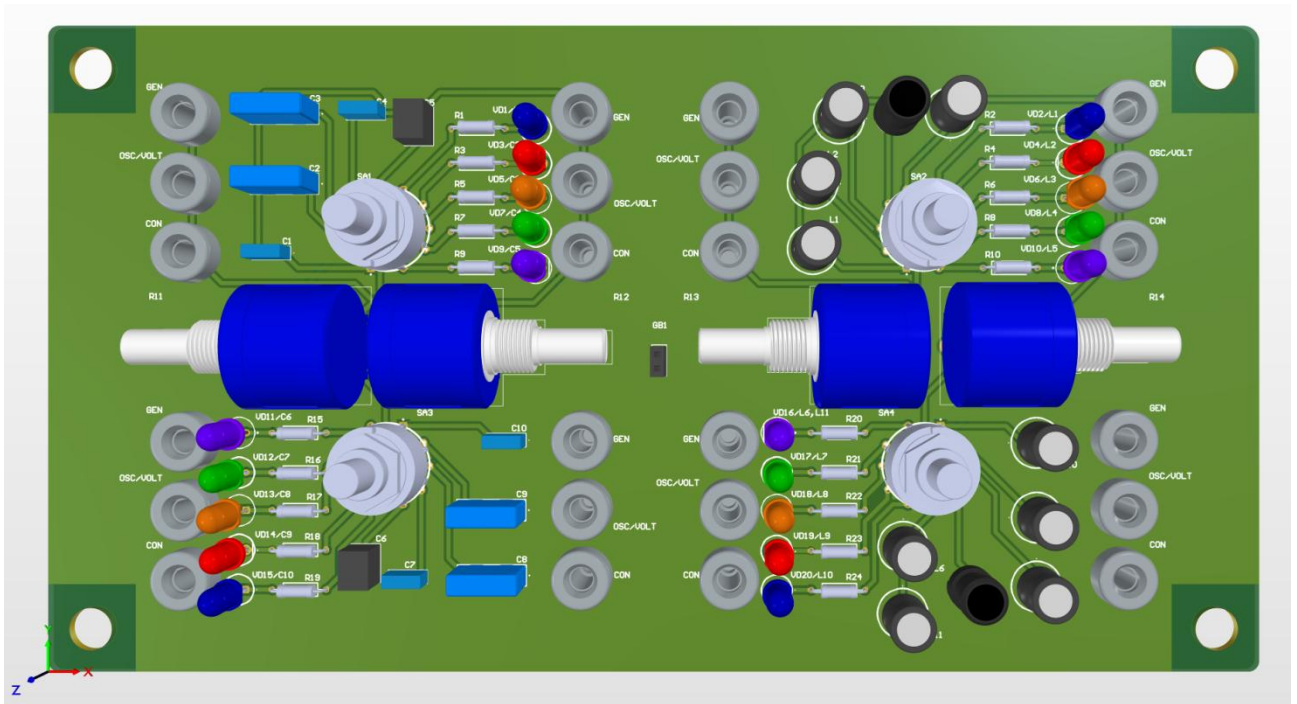


Рисунок 5.8 – 3Д-вигляд ДП зверху

А також 3Д-вигляд ДП знизу (рис. 5.9).

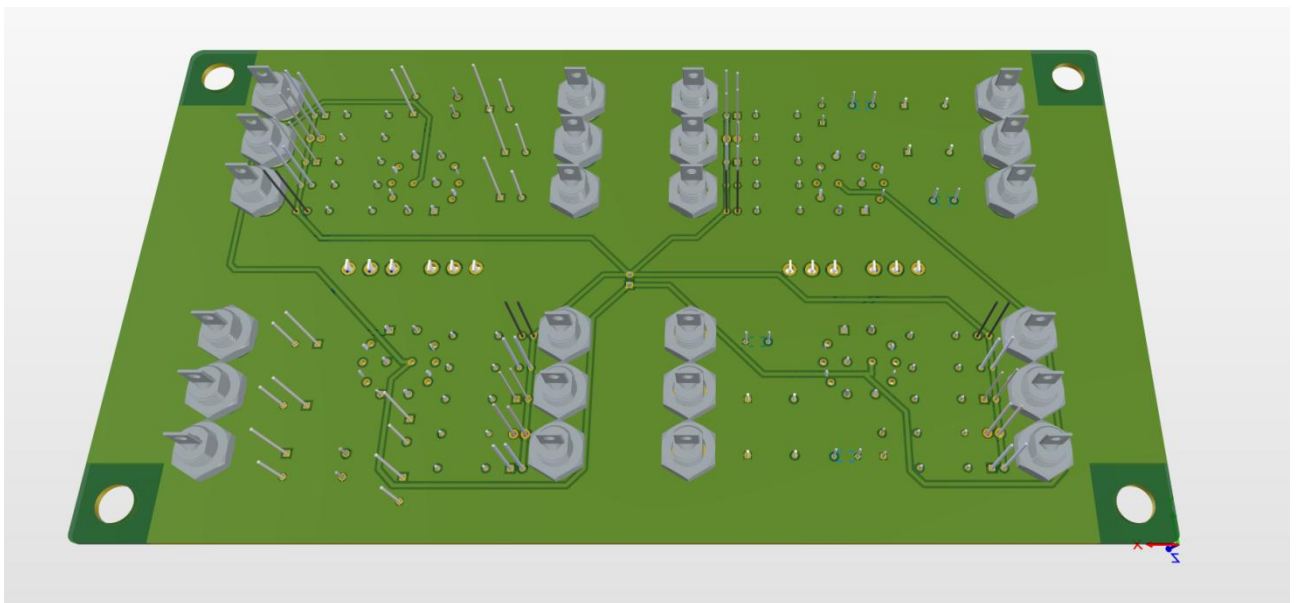


Рисунок 5.9 – 3Д-вигляд ДП знизу

З метою підвищення міцності та безпеки експлуатації друкованої плати її зовнішні кути були піддані фаскуванню з радіусом скруглення 2 мм. Це зменшує концентрацію механічних напружень на краях та запобігає утворенню сколів при монтажі та транспортуванні. Додатково, для надійної фіксації плати в корпусі пристрою по її периметру було розміщено монтажні отвори діаметром 8 мм під стандартні гвинти М8. Таке рішення забезпечує

зручність збірки, рівномірне розподілення кріпильного навантаження та захист від вібраційних впливів.

5.1.5 Створення файлів технологічного процесу

Після завершення розробки принципової схеми та трасування друкованої плати в середовищі Altium Designer було виконано підготовку файлів, необхідних для подальшого виготовлення плати. На цьому етапі проєкт переводиться з конструкторського вигляду у формат, зрозумілий для виробничого обладнання.

Основними файлами технологічного процесу є гербер-файли та файли свердління (NC Drill). Саме ці дані передаються виробнику друкованих плат та використовуються для формування мідних шарів, паяльної маски, маркування і виконання отворів. Гербер-файли містять інформацію про геометрію кожного шару плати окремо, що дозволяє точно відтворити топологію провідників і контактних майданчиків.

Для розробленої двошарової друкованої плати було сформовано гербер-файли для верхнього (рис. 5.10) та нижнього (5.11) провідних шарів, шару шовкотрафаретного маркування (рис. 5.12), а також файл контуру плати з урахуванням заокруглених країв. Окремо були згенеровані файли свердління, які містять координати та діаметри всіх отворів під вивідні елементи та монтажні з'єднання.

Формування технологічних файлів виконувалось стандартними засобами Altium Designer із попереднім налаштуванням одиниць вимірювання (міліметри) та параметрів експорту відповідно до вимог виробництва. Після створення файлів була проведена їх перевірка за допомогою перегляду гербер-даних, що дозволило переконатися у коректності відображення шарів, відсутності помилок трасування та правильності контуру плати.

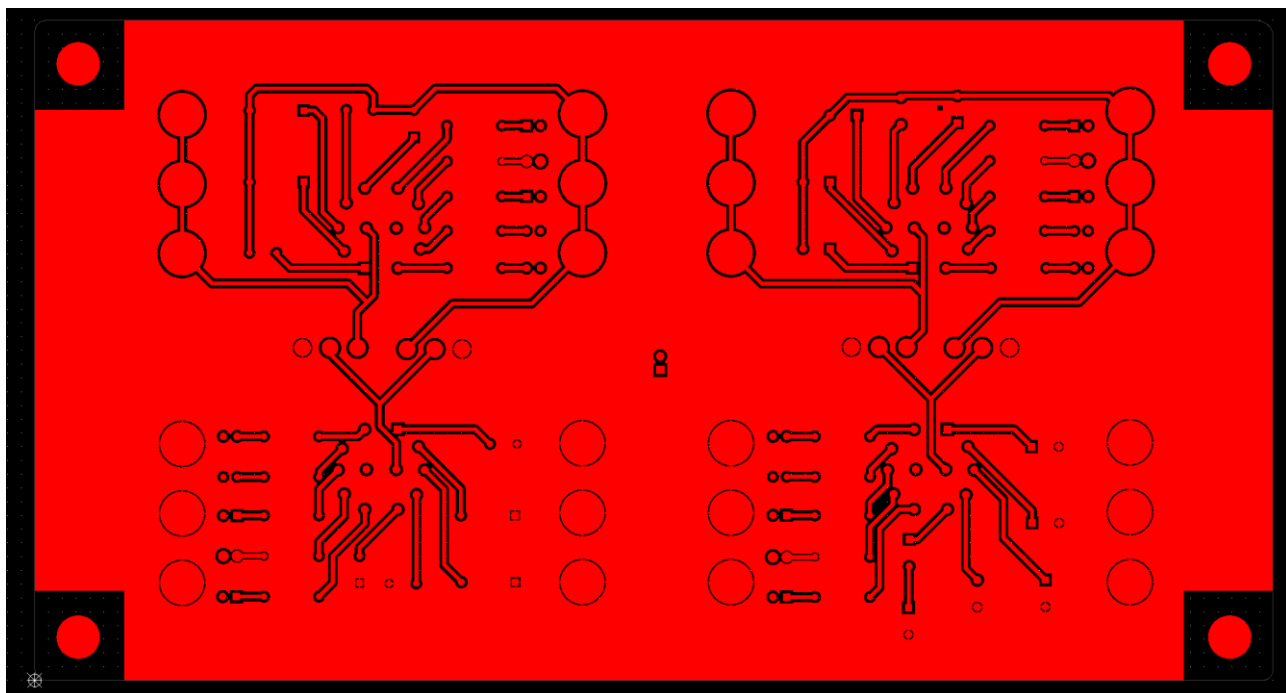


Рисунок 5.10 – Гербер-файл трасування верхнього шару лабораторного макету

Аналогічно зображено нижче нижній шар трасування.

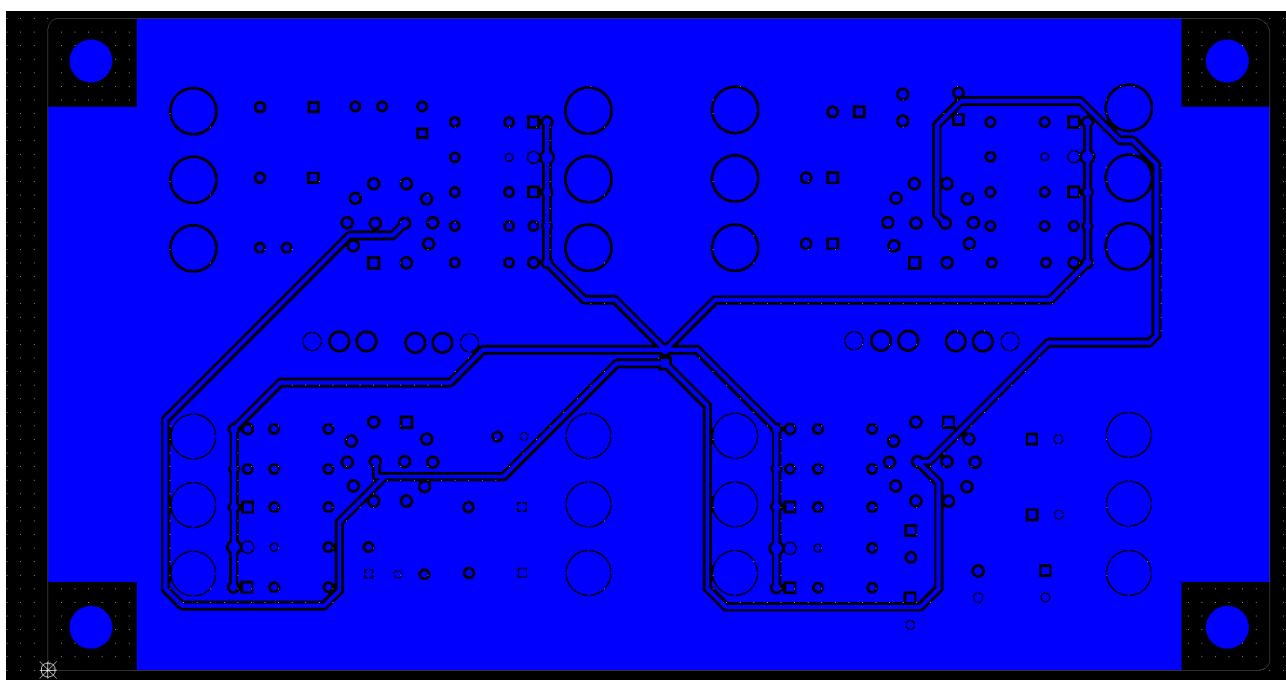


Рисунок 5.11 – Гербер-файл трасування нижнього шару ДП



Рисунок 5.12 – Файл DrillDrawing лабораторного макету

Файл DrillDrawing містить графічну інформацію про розташування та типи всіх отворів на друкованій платі, включно з координатами, діаметрами та прив'язкою до шарів плати. Він використовується для візуального контролю правильності свердління та перевірки відповідності отворів посадковим місцям компонентів. Даний файл є допоміжним технологічним документом і застосовується разом із файлом свердління (NC Drill) під час підготовки плати до виробництва.

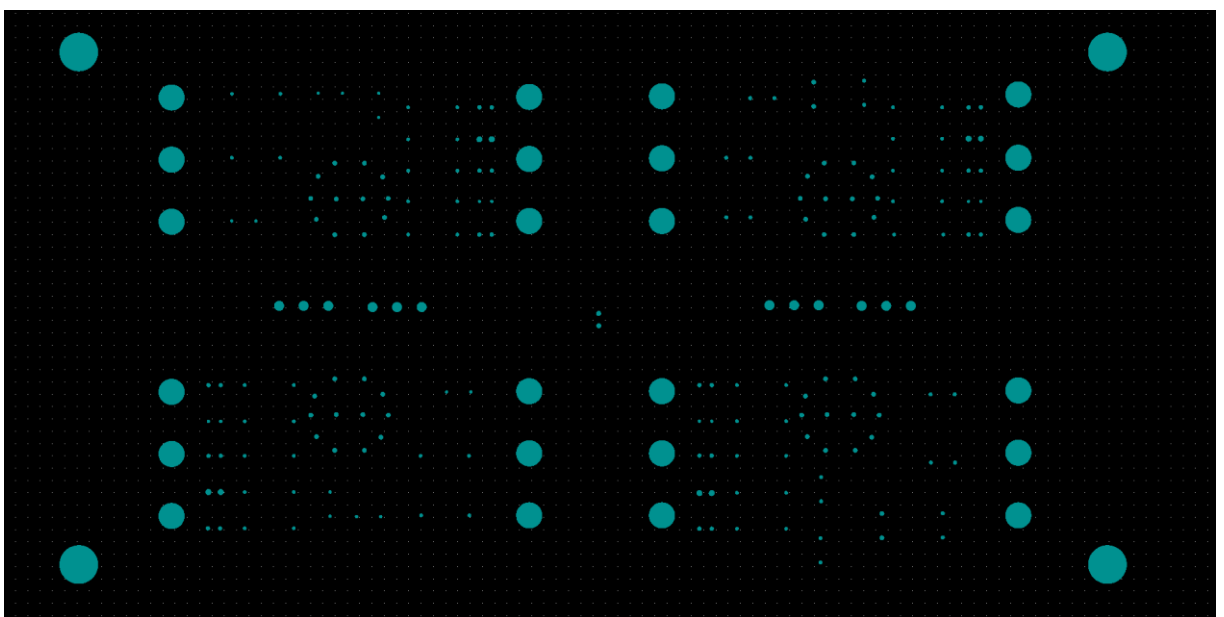


Рисунок 5.13 – файл сверління (NC Drill) для виготовлення макету

Для зручного користування ДП на верхній шар була нанесена шовкографія (рис. 5.13)

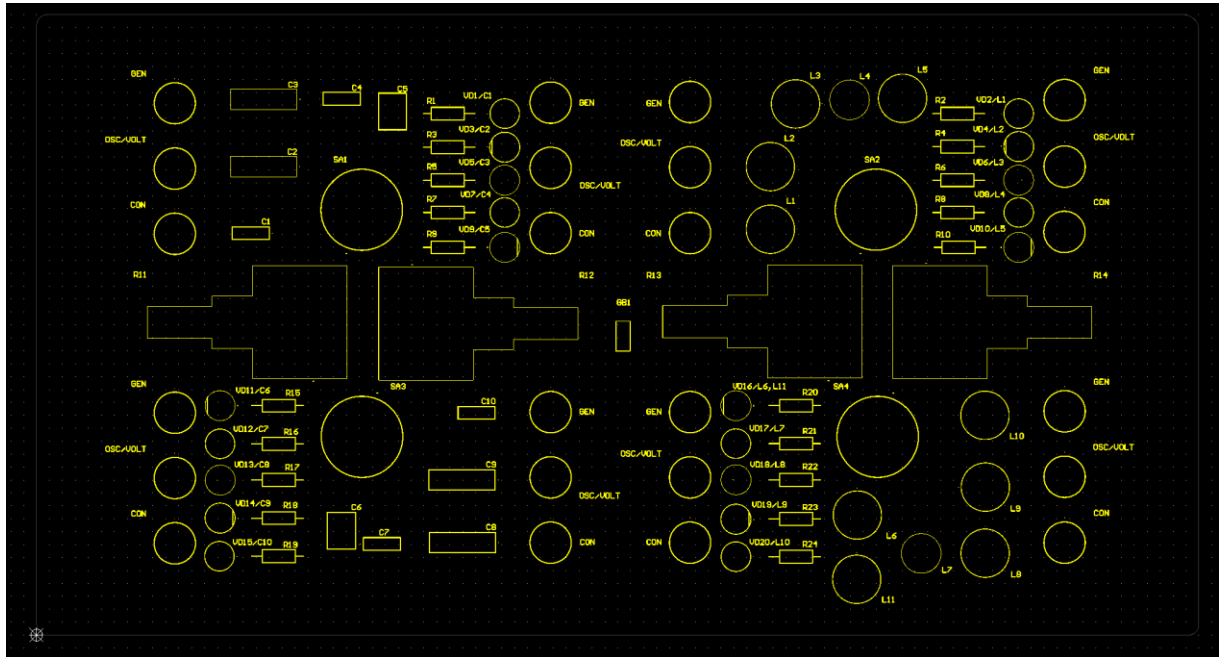
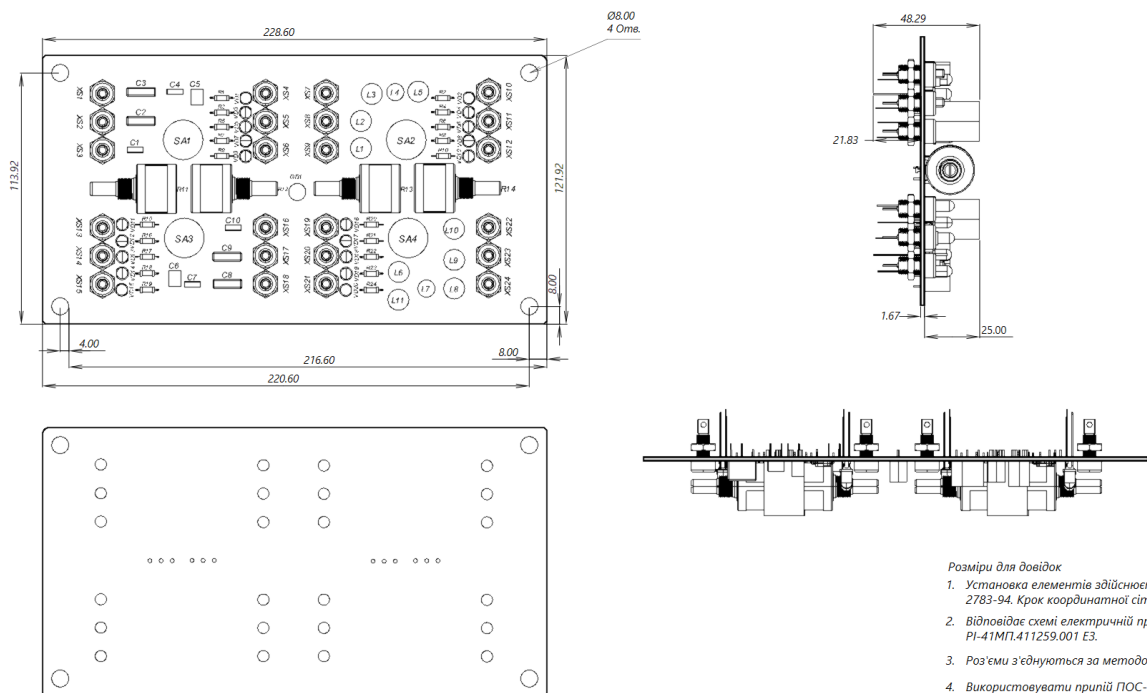


Рисунок 5.14 – файл шовкографії ДП

Нижче зображено на рис. 5.15 складальний кресленик друкованої плати, її вигляд зверху, знизу, зліва та ззаду. Всі необхідні складальні кресленики друкованої плати на форматі А3 знаходяться у додатку В. Перелік елементів перенесено до додатку Е.



- Розміри для довідок
1. Установка елементів здійснюється згідно ДСТУ 2783-94. Крок координатної сітки 1 мм.
 2. Відповідає схемі електричній принциповій РІ-41МП.411259.001 ЕЗ.
 3. Роз'єми з'єднуються за методом пайки.
 4. Використовувати припій ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
 5. Інші технічні вимоги по ОСТ4.ГО.070.015.

Рисунок 5.15 – Складальний кресленик друкованої плати

Підготовлений комплект файлів технологічного процесу забезпечує можливість виготовлення друкованої плати без додаткових доопрацювань та відповідає структурі розробленого проєкту [6]. Таким чином, даний етап є завершальним у процесі проєктування друкованої плати. Подальший розділ присвячений проєктуванню корпусу лабораторного макету.

5.2 Проєктування корпусу в програмному середовищі SolidWorks

Після завершення етапу проєктування друкованої плати в програмному середовищі Altium Designer було сформовано її тривимірну модель. Для подальшої розробки механічної частини лабораторного макету 3Д-модель плати була експортована з Altium Designer та імпортована в програмне середовище SolidWorks. Це дало можливість виконувати проєктування корпусу з урахуванням реальних габаритів плати, розташування елементів та монтажних отворів, без додаткових припущень і спрощень.

Проєктування корпусу виконувалося поетапно. На першому етапі була розроблена кришка корпусу (рис. 5.16), оскільки саме вона визначає зовнішній вигляд макету та зручність роботи з ним.

У кришці передбачені отвори для елементів керування, світлодіодної індикації та роз'ємів підключення. Розташування отворів вибиралося відповідно до компонування елементів на друкованій платі, що дозволило забезпечити коректну збірку та зручний доступ до всіх функціональних вузлів.

В конструкції кришки передбачені спеціальні пази по краях, які призначені для скріплення кришки та основи корпусу. Дані пази проходять крізь монтажні отвори друкованої плати та фіксуються в пазах основи корпусу.

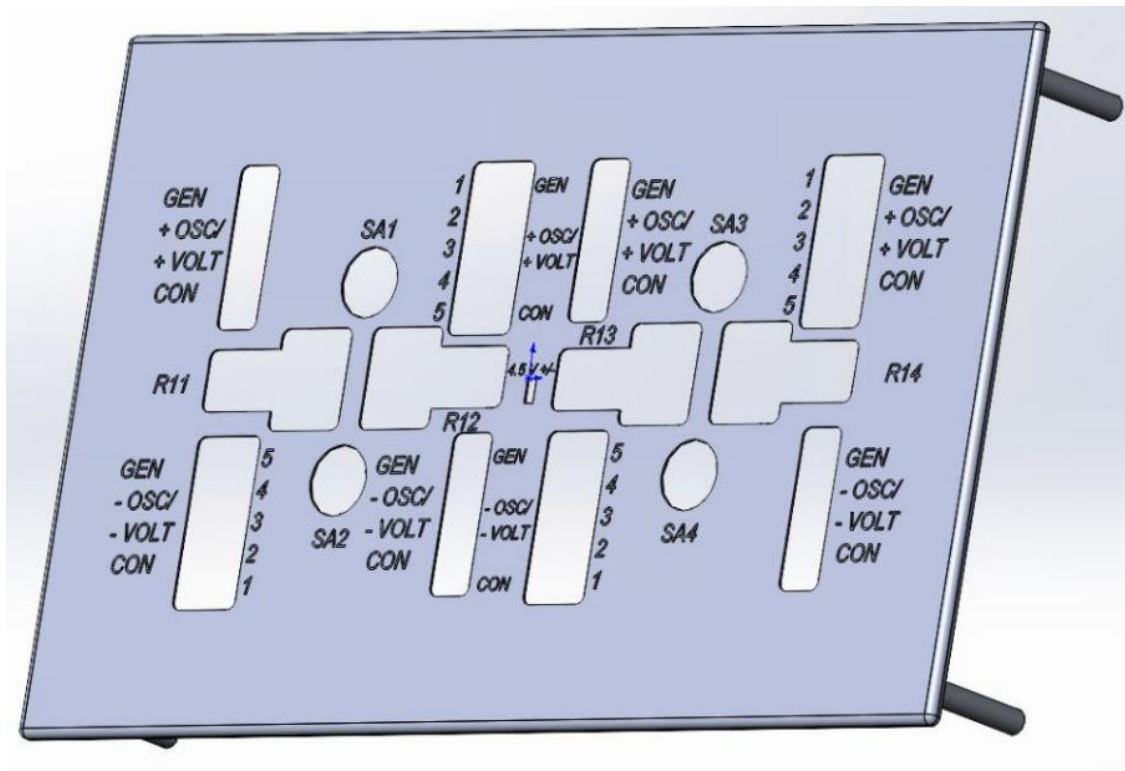


Рисунок 5.16 – Кришка для корпусу лабораторного макету

В якості матеріалу для виготовлення корпусу обрано ABS-пластик [21]. Даний матеріал має достатню механічну міцність, добре піддається обробці та широко використовується для виготовлення корпусів електронних пристроїв. Додатковою перевагою ABS-пластику є можливість нанесення гравіювання на кришку, яке планується використати для маркування світлодіодів у відповідності до магазину компонентів. Це підвищує наочність макету та спрощує його використання в навчальному процесі.

На наступному етапі була розроблена основа корпусу (рис. 5.17). В її конструкції передбачені спеціальні пази по краях, у які встановлюється друкована плата. Таке рішення дозволяє надійно зафіксувати плату без застосування додаткових кріпильних елементів. Також в основі реалізовано опорні виступи, на які плата спирається під час встановлення. Це забезпечує стабільне положення плати та зменшує механічне навантаження на неї під час експлуатації.

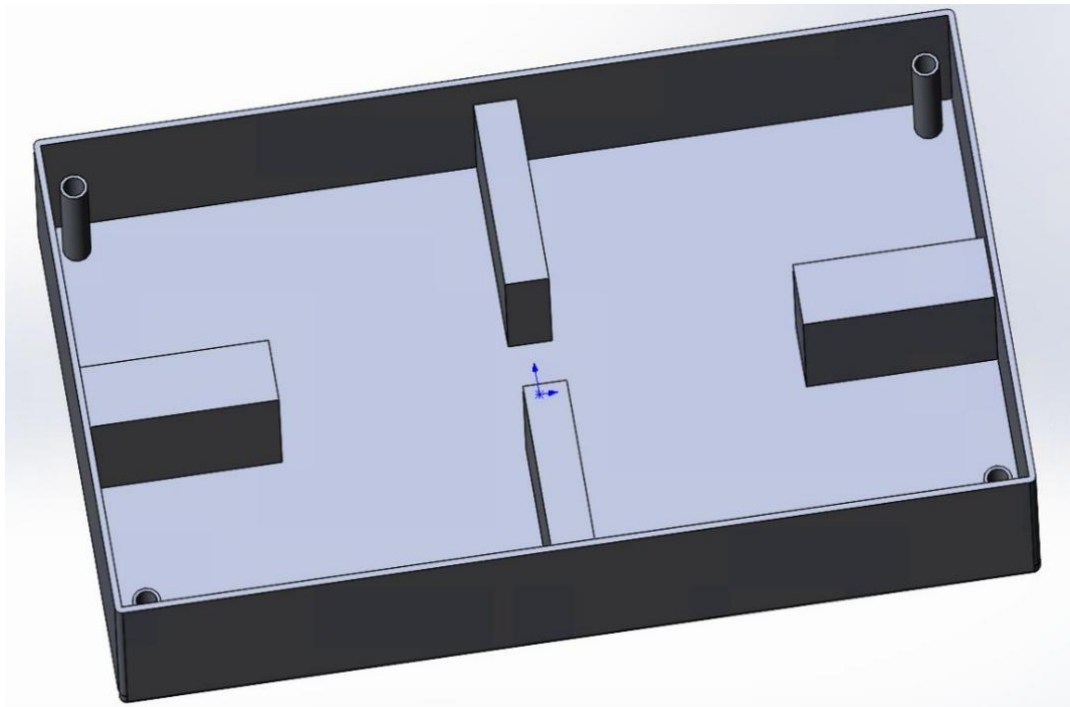


Рисунок 5.17 – Основа корпусу лабораторного макету

Для наочності на наступних зображеннях представлено лабораторний макет у розібраному (рис. 5.18) та зібраному (рис. 5.19) вигляді. На зображенні розібраного макету добре видно взаємне розташування друкованої плати, кришки та основи корпусу, а також спосіб фіксації плати відносно корпусу. Це дозволяє оцінити конструктивну логіку виробу та переконатися, що всі елементи узгоджені між собою за габаритами.

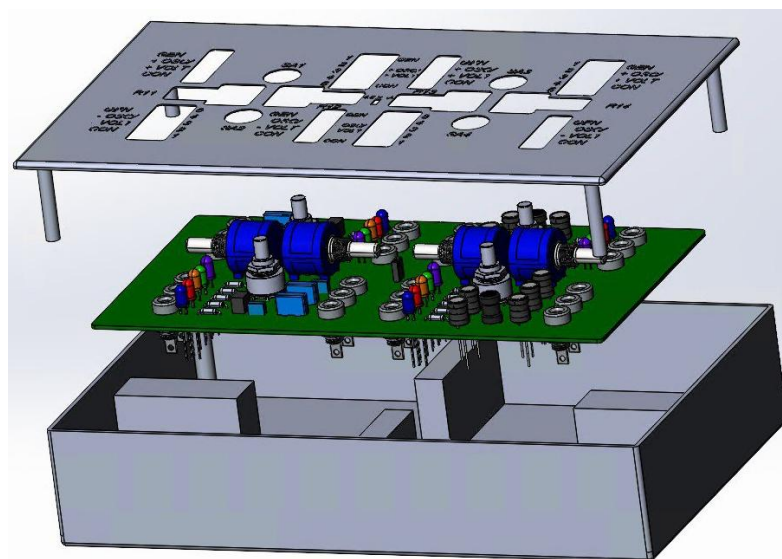


Рисунок 5.18 – Вигляд розібраного корпусу лабораторного макету

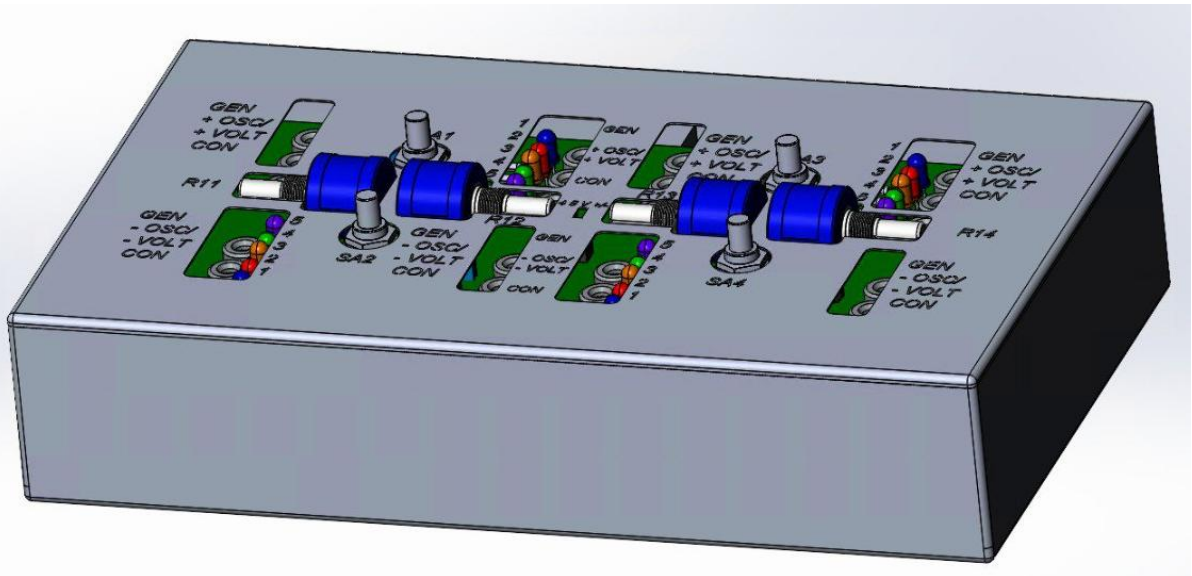


Рисунок 5.19 – Вигляд зібраного корпусу лабораторного макету

Після перевірки сумісності всіх елементів корпусу та друкованої плати були виконані креслення кришки (рис. 5.20) та основи корпусу (рис. 5.21).

Креслення наведені у трьох проекціях та відображають основні геометричні параметри деталей, розміщення отворів і конструктивні особливості корпусу.

Дані креслення дозволяють однозначно відтворити корпус та можуть бути використані для його виготовлення або подальшої модифікації.

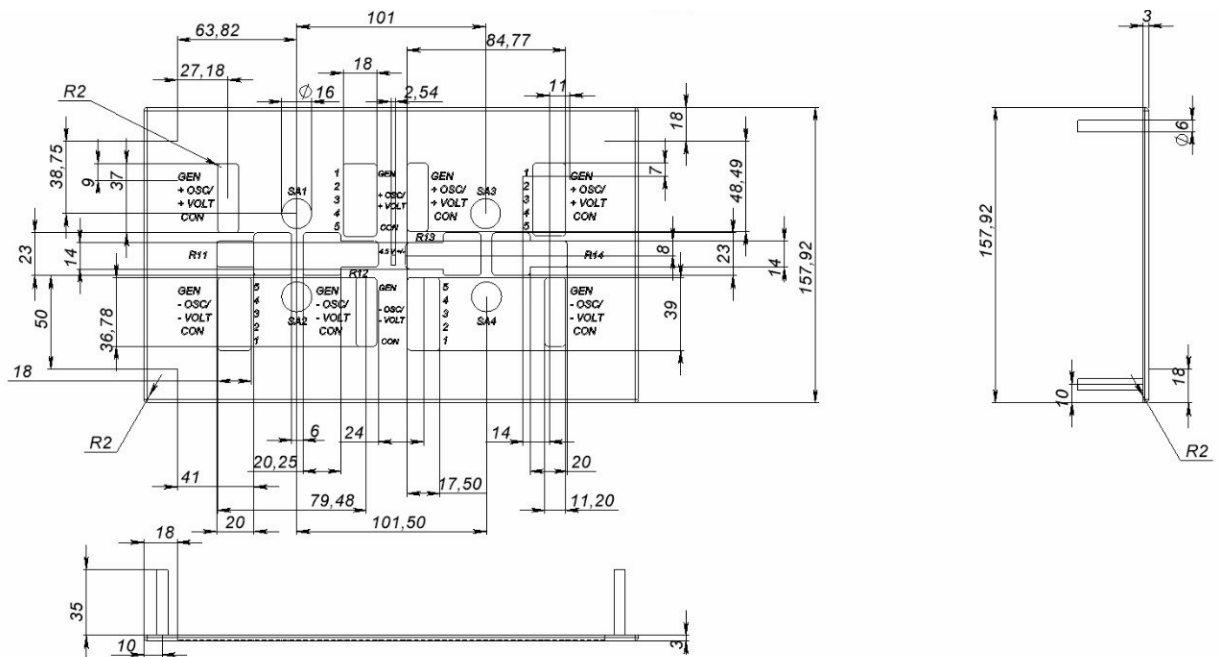


Рисунок 5.20 – Фрагмент креслення кришки лабораторного макету

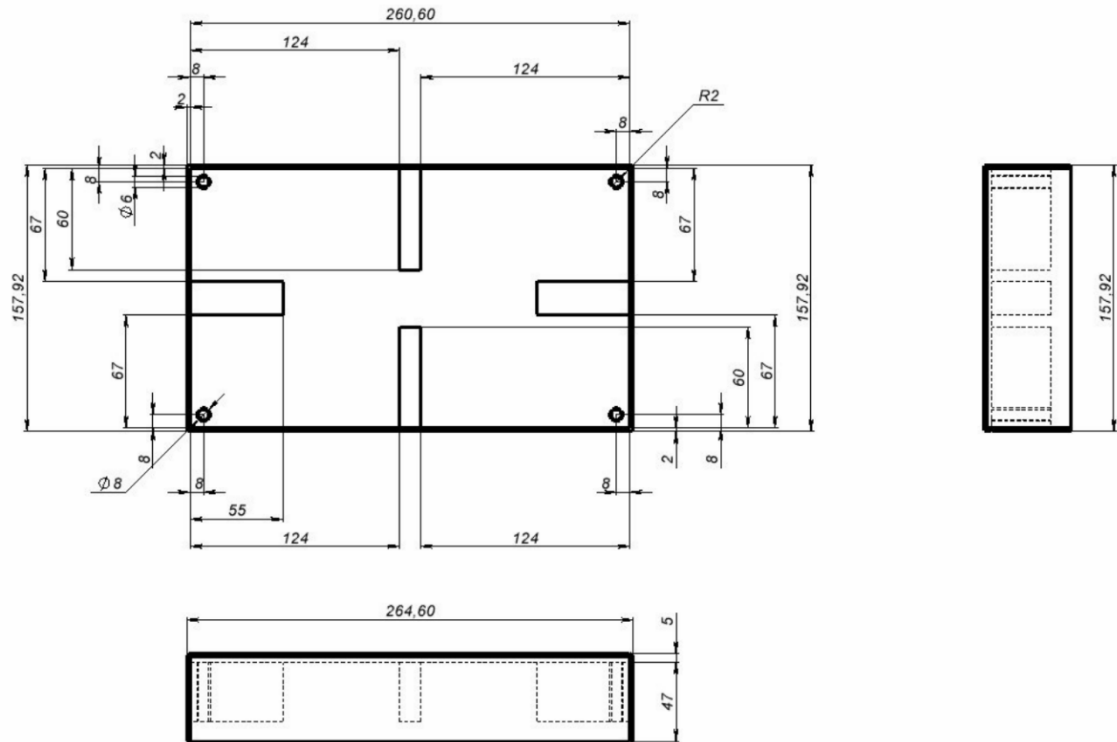


Рисунок 5.21 – Фрагмент креслення основи корпусу лабораторного макету

Розгорнуті креслення на форматі А3 перенесено у додаток Г.

Таким чином, у даному розділі завершено фінальний етап проєктування лабораторного макету — розробку корпусу, який забезпечує механічний захист друкованої плати, зручність використання та завершений вигляд пристрою.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації було розроблено лабораторний макет на сучасній компонентній базі для дослідження частотних властивостей мостових прохідних чотириполюсників.

В ході проведеного аналізу існуючих лабораторних стендів було сформовано вимоги до власного лабораторного макету. Розроблений макет дає можливість здійснювати дослідження АЧХ залежно від зміни числових значень елементів схеми в діапазоні частот від 100 Гц до 100 кГц.

Було здійснено розробку та моделювання схем пасивних мостових чотириполюсників у програмному середовищі Multisim, а також дослідження їх амплітудно-частотних характеристик.

Створено схеми чотириполюсників на макетних платах та експериментально знято реальні частотні характеристики та виконано їх порівняння з результатами моделювання. Виявлені розбіжності пояснюються впливом паразитних параметрів елементів, контактних опорів та похибок вимірювань. З метою кращої наочності для схем реалізована світлодіодна індикація.

Здійснено обґрунтований вибір елементної бази, що дозволило підібрати компоненти з урахуванням їх параметрів, доступності в Україні та доцільності використання в лабораторному макеті.

Виконано проєктування друкованої плати в програмі Altium Designer, включаючи створення бібліотек компонентів, розробку схеми електричної принципової, вибір оптимальних габаритних розмірів 228,6x122 мм та трасування двошарової плати.

Завершальним етапом стало проєктування корпусу для ДП в програмі SolidWorks із ABS пластику із габаритними розмірами 265x158x50 мм.

Отримані технологічні файли та файли конструкторської документації є достатніми для виготовлення прототипу лабораторного макету з впровадженням у навчальний процес, за наявності необхідних ресурсів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи теорії кіл: підручник для вищих навчальних закладів. [Електронний ресурс]: Ч.1 / Ю. А. Коваль, Л. В. Гринченко, І.О. Мілютченко, О. І. Рибін / за заг. ред. В.М. Шокола, В. І. Правди. – Харків: Компанія СМІТ, 2008. – 432с.
2. Основи теорії кіл. Лабораторний практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка /А.В. Булашенко, М.Ф. Мхейн. – Електронні текстові дані (1 файл 2,21 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 70с.
3. Основи теорії кіл: Підручник для вищих навчальних закладів. [Електронний ресурс]: Ч.2 / Ю. А. Коваль, Л. В. Гринченко, І.О. Мілютченко, О. І. Рибін / за заг. ред. В.М. Шокола, В. І. Правди. – Харків: Компанія СМІТ, 2008. – 560с.
4. Схеми електричні принципові. ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 та ЄСКД. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://dnaop.com/html/61479_2.html
5. ЄСКД. Основні написи ДП. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50953
6. IEC 60194:2015. Printed board design, manufacture and terms. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/>
7. IPC-2221B. Generic Standard on Printed Board Design. IPC Association. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221>
8. Johnson H., Graham M. *High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic*. Prentice Hall, 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pearson.com>
9. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.cambridge.org/art-of-electronics>
10. Floyd T. *Electronic Devices*. Pearson Education, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pearson.com>

11. Altium Limited. *Altium Designer Documentation*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.altium.com/documentation>
12. Електронні компоненти Component Search Engine. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://componentsearchengine.com/>
13. База даних електронних компонентів SnapMagic Search. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.snapeda.com/>
14. ДСТУ 2.701:2006. Єдина система конструкторської документації. Схеми. Види та типи. ДП «УкрНДНЦ». [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50972
15. Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні вимоги до монтажу виробів електронної техніки та електротехнічних на друковані плати. ДСТУ 2783-94. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=96130
16. Допуски. ISO 2768-1:2001. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=6882015
17. Припій ПОС-61. ГОСТ 21931-76. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=56159
18. Склотекстоліт FR4. ISO 9001:2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iso.org/>
19. ABS-пластик. ISO 1043-1:2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iso.org/>
20. Магістерська кваліфікаційна робота. зміст, оформлення та підготовка до захисту [Електронний ресурс]: навч. посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»; уклад. В.О. Чмельов, А.І. Онисько. – Електронні текстові дані (1 файл: 812,7 кБайт). – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023. – 30с.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	PI41-МП.411259.001 ПЗ	Пояснювальна записка	82	
3	A4	PI41-МП.411259.001	Специфікація на пристрій	1	
4	A3	PI41-МП.411259.001 СК	Складальний кресленик пристрою	1	
5	A4	PI41-МП.411259.002	Специфікація на друкований вузол	2	
6	A3	PI41-МП.411259.002 СК	Складальний	1	

			кресленик друкованого вузла		
7	A3	PI41-МП.411259.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
8	A4	PI-41МП.411259.001 ПЕ	Перелік елементів	2	
9	A3	PI41-МП.758752.001	Друкована плата	1	
10	A3	PI41-МП.741428.001	Кришка	1	
10	A3	PI41-МП.741428.002	Основа корпусу	1	

				PI-41МП.411259.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Лабораторний макет пасивних чотириполюсників	Лист	Листів
Розробн.	Рагульський Д.				1	1
Керівн.	Булашенко А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. РІ Гр. РІ-41мп	
Конс.						
Н/контр.	Піддубний В.					
Зав.каф.						

ДОДАТОК А. ТАБЛИЦІ ДО ГРАФІКІВ РОЗДІЛУ 4.2

Таблиця 1 – Дані для графіку «вплив номіналу ємності C2 на АЧХ схеми 1 (з ємностями)»

Номінали елементів	Експеримент частота, кГц	Експеримент напруга, мВ	Multisim частота, кГц	Multisim напруга, мВ
1) R1 = 3 кОм; R2 = 10 Ом; C1 = 1 нФ; C2 = 3,3нФ				
	1	990	1	996
	5	960	5	930
	8	880	8	846
	10	820	10	788
	15	700	15	655
	20	590	20	555
	25	500	25	481
	40	380	40	358
	50	320	50	317
	75	280	75	268
	100	230	100	249
2) R1 = 5,1 Ом; R2 = 510 Ом; C1 = 1 нФ; C2 = 2,2 нФ				
	1	990	1	995
	5	910	5	897
	8	800	8	789
	10	750	10	721
	15	630	15	587
	20	530	20	500
	25	480	25	442
	35	410	35	362
	50	370	50	342
	80	340	80	337
	100	320	100	325
3) R1 = 7 кОм; R2 = 20 Ом; C1 = 1 нФ; C2 = 4,7нФ				

	1	980	1	970
	3	820	3	805
	5	680	5	638
	8	500	8	472
	10	420	10	404
	15	300	15	306
	20	230	20	259
	25	210	25	232
	35	200	35	206
	50	180	50	190
	80	160	80	180
	100	150	100	178
4) R1 = 1,5 кОм; R2 = 510 Ом; C1 = 1 нФ; C2 = 3,3 нФ				
	1	990	1	999
	5	980	5	978
	8	960	8	948
	10	940	10	922
	15	850	15	845
	20	800	20	764
	2	710	25	687
	35	600	35	557
	50	450	50	424
	70	310	70	329
	100	250	100	288
5) R1 = 11 кОм; R2 = 9,1 Ом; C1 = 1 нФ; C2 = 1нФ				
	1	990	1	995
	5	920	5	914
	10	760	10	755
	15	650	15	620
	20	510	20	525
	25	440	25	459
	35	340	35	380
	50	300	50	322
	80	250	80	280
	100	230	100	265

6) $R1 = 5,1 \text{ кОм};$ $R2 = 100 \text{ Ом};$ $C1 = 1 \text{ нФ};$ $C2 = 6,8 \text{ нФ}$				
	1	980	1	970
	3	850	3	802
	5	680	5	630
	8	500	8	458
	10	430	10	385
	15	300	15	279
	20	250	20	225
	25	220	25	193
	35	180	35	160
	50	150	50	140
	80	135	80	130
	100	130	100	128

Таблиця 2 – Дані для «графік впливу номіналу індуктивності L2 на АЧХ схеми 2 (з індуктивностями)»

Номінали елементів	Експеримент частота, кГц	Експеримент напруга, мВ	Multisim частота, кГц	Multisim напруга, мВ
1) $L2 = 11 \text{ мГн}$				
	1	200	1	117
	3	250	3	156
	5	280	5	223
	10	360	10	390
	15	480	15	530
	20	580	20	639
	25	680	25	720
	30	740	30	778
	40	840	40	855
	50	880	50	900
	75	960	75	950
	100	990	100	972
2) $L2 = 22 \text{ мГн}$				
	1	160	1	206
	3	250	3	285
	5	370	5	391
	7	470	7	490
	10	600	10	616
	12	670	12	680
	15	740	15	755

	20	820	20	836
	25	880	25	885
	50	960	50	966
	100	995	100	991
3) $L2 = 32,4 \text{ мГн}$				
	1	270	1	280
	3	360	3	378
	5	460	5	503
	7	560	7	610
	10	680	10	730
	15	800	15	800
	20	880	20	880
	40	960	40	960
	100	1000	100	1000
4) $L2 = 45 \text{ мГн}$				
	1	300	1	350
	3	450	3	470
	5	600	5	600
	7	720	7	705
	10	820	10	808
	15	900	15	897
	20	940	20	937
	35	965	35	977
	50	990	50	989
	100	1000	100	997
5) $L2 = 55 \text{ мГн}$				
	1	395	1	400
	3	550	3	528
	5	680	5	656
	7	780	7	755
	10	860	10	847
	15	920	15	920
	20	960	20	952
	25	970	25	968
	30	980	30	978
	40	990	40	987
	50	995	50	992
	100	1000	100	998

Таблиця 3 – Дані для графіку «Вплив опорів R1 та R2 на АЧХ схеми 2»

Номінали елементів	Експеримент частота, кГц	Експеримент напруга, мВ	Multisim частота, кГц	Multisim напруга, мВ
1) R1 = 510 Ом; R2 = 9,1 Ом				
	1	260	1	292
	3	500	3	565
	5	700	5	740
	7	800	7	836
	10	880	10	908
	12	905	12	933
	15	945	15	956
	20	965	20	974
	25	975	25	983
	35	985	35	989
	50	990	50	995
	100	1000	100	999
2) R1 = 3 кОм; R2 = 5,1 Ом				
	1	180	1	196
	3	200	3	220
	5	230	5	262
	7	280	7	312
	10	360	10	392
	12	400	12	443
	15	490	15	515
	20	585	20	616
	25	660	25	695
	35	780	35	801
	50	870	50	895
	100	950	100	967

Таблиця 4 – Дані для графіку «Вплив номіналу індуктивності L1 на АЧХ схеми 3 (спочатку з індуктивностями)»

Номінали елементів	Експеримент частота, кГц	Експеримент напруга, В	Multisim частота, кГц	Multisim напруга, В
1) L1 = 11 мГн; C2 = 3,3 нФ				
	1	1,01	1	1,03

	5	1,05	5	1,08
	10	1,2	10	1,15
	15	1,3	15	1,39
	23	3	23	3,2
	27	5,5	27	7,2
	29	3,5	29	4,5
	32	2,4	32	2,13
	50	0,42	50	0,376
	100	0,085	100	0,074
2) L1 = 22 мГн; C2 = 3,3 нФ				
	1	1,01	1	1,03
	5	1,06	5	1,1
	10	1,12	10	1,3
	15	1,85	15	2,2
	19	3,9	19	4,7
	21	2,9	21	3,2
	24	1,25	24	1,49
	35	0,335	35	0,379
	100	0,05	100	0,039
3) L1 = 32,4 мГн; C2 = 3,3 нФ				
	1	1,03	1	1,04
	5	1,05	5	1,12
	8	1,13	8	1,26
	9	1,35	9	1,36
	13	2,12	13	2,33
	16	3,45	15,7	3,7
	18	2,07	18	2,33
	22	0,845	22	0,911
	35	0,24	35	0,221
	100	0,035	100	0,03
4) L1 = 45 мГн; C2 = 3,3 нФ				
	1	1,02	1	1,04
	5	1,1	5	1,15
	7	1,2	7	1,27
	8	1,25	8	1,39
	9	1,4	9	1,55
	10	1,65	10	1,8
	11	2	11	2,14
	12	2,25	12	2,58

	13,6	2,8	13,2	3
	15	2,05	15	2,25
	16	1,65	16	1,7
	17	1,15	17	1,3
	19	0,75	19	0,82
	22	0,4	22	0,5
	30	0,18	30	0,21
	40	0,09	40	0,11
	100	0,02	100	0,025

Таблиця 5 – Дані для графіку «Вплив конденсатора C2 на АЧХ схеми 3»

Номінали елементів	Експеримент, частота, кГц	Експеримент, напруга, В	Multisim частота, кГц	Multisim, напруга, В
1) L1 = 32,4 мГн; C2 = 2,2 нФ	1	1,01	1	1,02
	5	1,04	5	1,05
	10	1,14	10	1,24
	15	1,75	15	1,89
	19,2	3,3	19,4	3,2
	22	2,02	22	2,23
	25	1,04	25	1,24
	35	0,46	35	0,38
	60	0,125	60	0,107
	100	0,06	100	0,045
2) L1 = 32,4 мГн; C2=3,3н				
	1	1	1	1,01
	3	1,02	3	1,05
	8	1,13	8	1,26
	9	1,25	9	1,36
	13	2,12	13	2,34
	16	3,4	15,7	3,69
	18	2,07	18	2,34
	22	0,845	22	0,911
	35	0,24	35	0,221
	50	0,1	50	0,091
	100	0,035	100	0,03
3) L1 = 32,4 мГн; C2 = 4,7 нФ				
	1	1,02	1	1,04

	5	1,06	5	1,1
	7	1,24	7	1,33
	10	2	10	2,05
	13,2	3,75	13	4,18
	15	2,16	15	2,49
	20	0,655	20	0,680
	30	0,185	30	0,208
	60	0,1	60	0,13
	100	0,03	100	0,02
4) $L1 = 32,4$ мГн; $C2 = 6,8$ нФ				
	1	1,04	1	1,03
	5	1,2	5	1,23
	8	2,1	8	2
	9	2,18	9	2,6
	10	3,45	10	3,82
	11	4,3	10,8	4,7
	12	2,86	12	3,11
	13	1,72	13	1,92
	15	0,9	15	1
	20	0,335	20	0,38
	50	0,1	50	0,125
	100	0,01	100	0,014

Таблиця 6 – Дані для графіку «Вплив опорів R1 та R4 на АЧХ схеми 3»

Номінали елементів	Експеримент, частота, кГц	Експеримент, напруга, В	Multisim, частота, кГц	Multisim, напруга, В
1) $R3 = 11$ кОм; $R4 = 5,1$ кОм; $L1 = 32,4$ мГн; $L2 = 45$ мГн; $R1 = 5,1$ Ом; $R2 = 100$ Ом; $C1 = 1$ нФ; $C2 = 4,7$ нФ				
	1	1	1	1,01
	5	1,01	5	1,06
	6	1,05	6	1,1
	7	1,1	7	1,16
	8	1,2	8	1,25
	9	1,3	9	1,37

	10	1,45	10	1,54
	11	1,65	11	1,77
	12	1,9	12	2,08
	13,8	2,3	13,8	2,57
	15	2,2	15	2,28
	16	1,7	16	1,82
	17	1,25	17	1,41
	18	1	18	1,1
	19	0,84	19	0,874
	20	0,65	20	0,735
	25	0,3	25	0,36
	30	0,17	30	0,222
	40	0,1	40	0,117
	75	0,03	75	0,038
	100	0,02	100	0,025
2) $R3 = 11$ кОм; $R4 = 3$ кОм; $L1 = 32,4$ мГн; $L2 = 45$ мГн; $R1 = 100$ Ом; $R2 = 100$ Ом; $C1 = 1$ нФ; $C2 = 4,7$ нФ				
	1	0,89	1	0,95
	5	0,9	5	0,96
	7	0,96	7	1
	9	1,05	9	1,12
	11	1,15	11	1,35
	13	1,6	13	1,73
	14,5	1,8	14,5	1,94
	16	1,5	16	1,73
	18	1	18	1,16
	20	0,7	20	0,788
	30	0,19	30	0,238
	50	0,08	50	0,082
	100	0,025	100	0,028

Таблиця 7 – Дані для графіку «Вплив номіналу конденсатора C1 на АЧХ схеми 4 (спочатку з ємностями)»

Номінали елементів	Експеримент, частота, кГц	Експеримент, напруга, В	Multisim, частота, кГц	Multisim, напруга, В
1) C1 = 3,3 нФ; L2 = 11 мГн	1	0,03	1	0,045
	5	0,08	5	0,095
	10	0,15	10	0,16
	15	0,37	15	0,46
	20	1	20	1,33
	25	3,8	25	6,18
	27,6	6,2	25,8	7,09
	30	4,1	30	3,37
	35	2,15	35	2,05
	50	1,22	50	1,32
	100	1,05	100	1,06
2) C1 = 3,3 нФ; L2 = 22 мГн	1	0,02	1	0,034
	5	0,09	5	0,078
	10	0,405	10	0,39
	15	1,65	15	1,8
	17	3,2	17	4,05
	18	4,9	18	5,62
	20	3,4	20	4
	25	1,6	25	1,9
	50	1,1	50	1,11
	100	1	100	1,02
3) C1 = 3,3 нФ; L2 = 32,4 мГн	1	0,02	1	0,028
	5	0,135	5	0,12
	10	0,765	10	0,717
	13	2,45	13	2,38
	15,1	4,3	15,1	4,96
	17	2,8	17	3,25
	20	1,65	20	1,96
	50	1,08	50	1,05
	100	1	100	1,01
4) C1 = 3,3 нФ; L2 = 45 мГн				
	1	0,06	1	0,073

	5	0,172	5	0,175
	9	1,1	9	0,88
	11	2,7	11	2,24
	12,5	4	12,7	4,37
	14	3,3	14	3,45
	16	2,2	16	2,2
	25	1,2	25	1,22
	50	1,05	50	1,06
	100	1	100	1

Таблиця 8 – Дані для графіку «Вплив номіналу індуктивності L2 на АЧХ схеми 4»

Номінали елементів	Експеримент, частота, кГц	Експеримент, напруга, В	Multisim, частота, кГц	Multisim, напруга, В
1) L2 = 32,4 мГн; C1 = 2,2 нФ				
	1	0,02	1	0,02
	5	0,1	5	0,083
	10	0,41	10	0,38
	15	1,8	15	1,62
	18	3,6	18,2	3,82
	21	2,6	21	2,68
	25	1,6	25	1,75
	50	1,05	50	1,08
	100	1	100	1,01
2) L2 = 32,4 мГн; C1 = 3,3 нФ				
	1	0,06	1	0,047
	5	0,135	5	0,12
	10	0,765	10	0,717
	13	2,45	13	2,38
	15,1	4,3	15,1	4,98
	17	2,8	17	3,25
	20	1,65	20	1,96
	50	1,08	50	1,05
	100	1	100	1,01
3) L2 = 32,4 мГн; C1 = 4,7 нФ				
	1	0,03	1	0,026

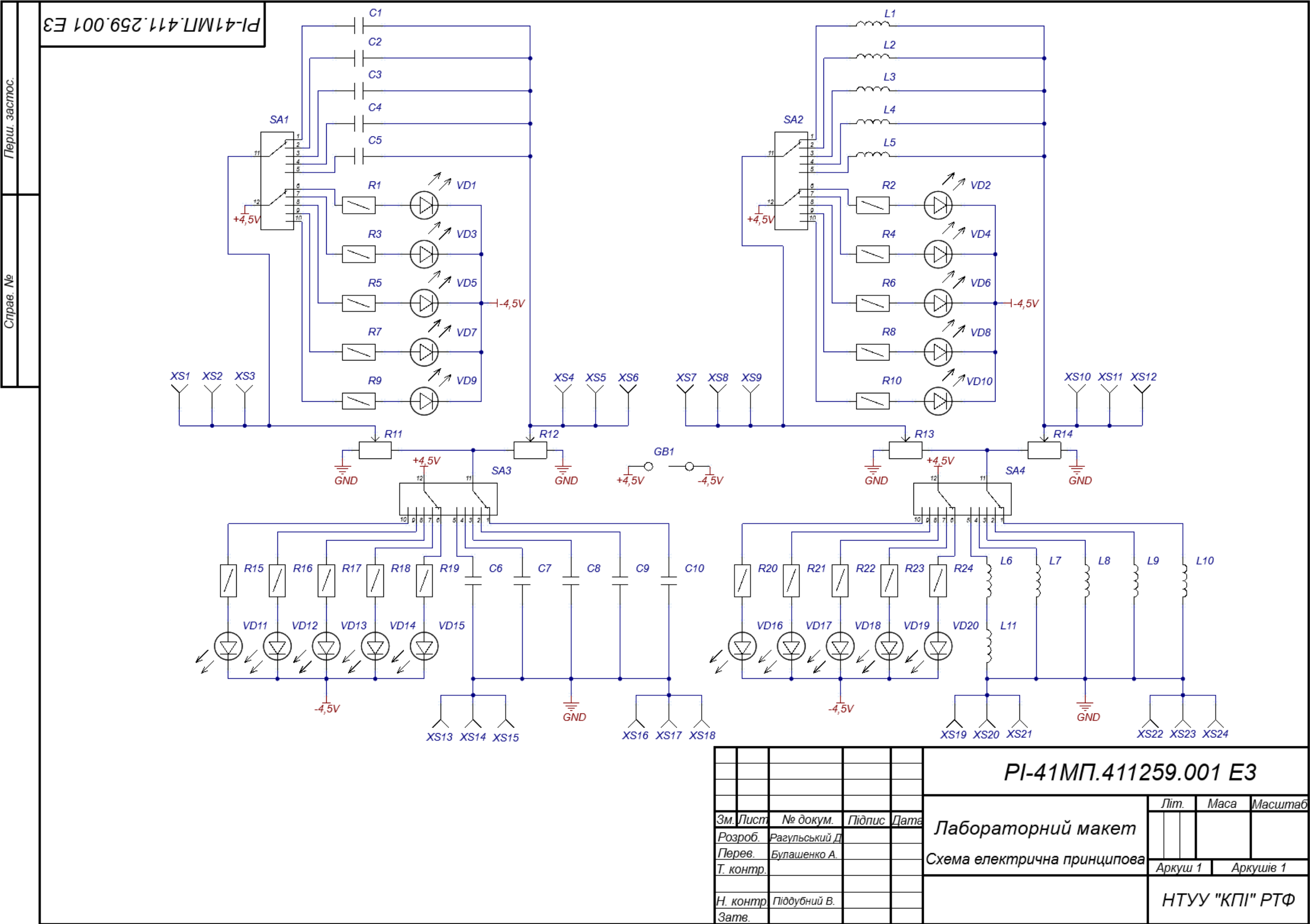
	5	0,165	5	0,175
	10	1,45	10	1,49
	11	1,9	11	2,6
	12,6	4,75	12,7	6,11
	15	2,33	15	2,9
	20	1,45	20	1,53
	50	1,05	50	1,04
	100	1	100	1
4) $L2 = 32,4$ мГн; $C1 = 6,8$ нФ				
	1	0,02	1	0,02
	5	0,3	5	0,275
	8	1,4	8	1,25
	9	2,4	9	2,32
	10,5	5,1	10,5	7,38
	11	4,8	11	6,5
	12	3,2	12	3,75
	15	1,65	15	1,84
	20	1,15	20	1,31
	50	1,01	50	1,02
	100	1	100	1

Таблиця 9 – Дані для графіку «Вплив опорів R2 та R3 на АЧХ схеми 4»

Номінали елементів	Експеримент частота, кГц	Експеримент напруга, В	Multisim частота, кГц	Multisim напруга, В
1) R1 = 11 кОм; R2 = 5,1 кОм; C1 = 2,2 нФ; C2 = 1 нФ; R3 = 100 Ом; R4 = 1,5 кОм; L1 = 96 мГн; L2 = 45 мГн				
	1	0,05	1	0,034
	5	0,11	5	0,134
	7	0,25	7	0,261
	10	0,62	10	0,67
	12	1,2	12	1,26
	13	1,5	13	1,72
	14	2	14	2,15

	15	2,3	15	2,32
	16	2,1	16	2,21
	17	1,85	17	2
	20	1,35	20	1,48
	40	0,95	40	0,96
	100	0,945	100	0,955
2) $R1 = 11 \text{ кОм};$ $R2 = 3 \text{ кОм};$ $C1 = 2,2 \text{ нФ};$ $C2 = 1 \text{ нФ};$ $R3 = 20 \text{ Ом};$ $R4 = 1,5 \text{ кОм};$ $L1 = 96 \text{ мГн};$ $L2 = 45 \text{ мГн}$				
	1	0,08	1	0,065
	5	0,145	5	0,151
	7	0,25	7	0,29
	8	0,37	8	0,395
	10	0,71	10	0,737
	11	1	11	1,02
	12	1,35	12	1,41
	13	1,75	13	1,87
	14,5	2	14,5	2,25
	16	1,8	16	2,02
	17	1,6	17	1,8
	18	1,45	18	1,61
	19	1,23	19	1,44
	20	1,2	20	1,35
	30	0,95	30	0,956
	50	0,915	50	0,862
	100	0,9	100	0,85

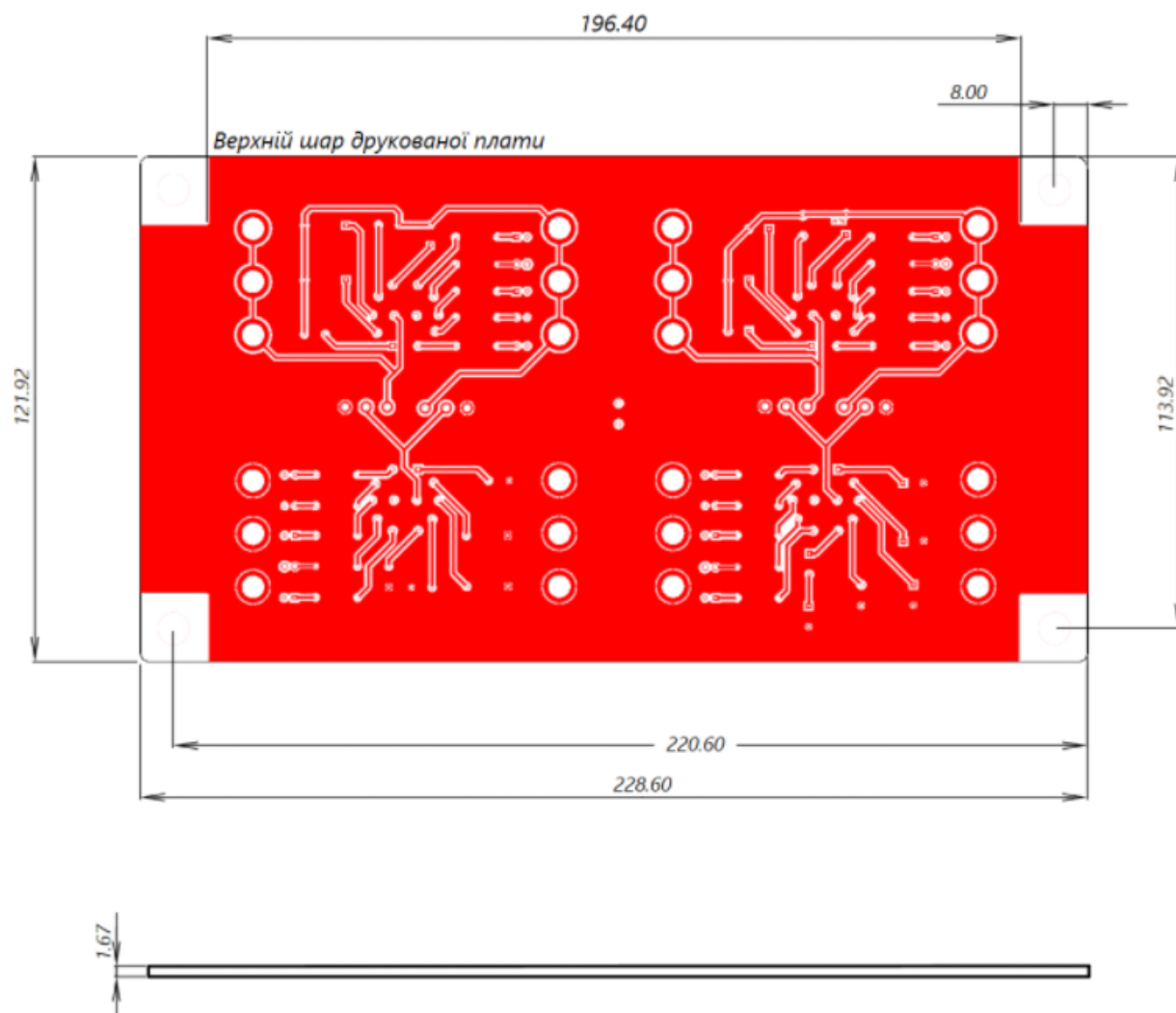
ДОДАТОК Б. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА



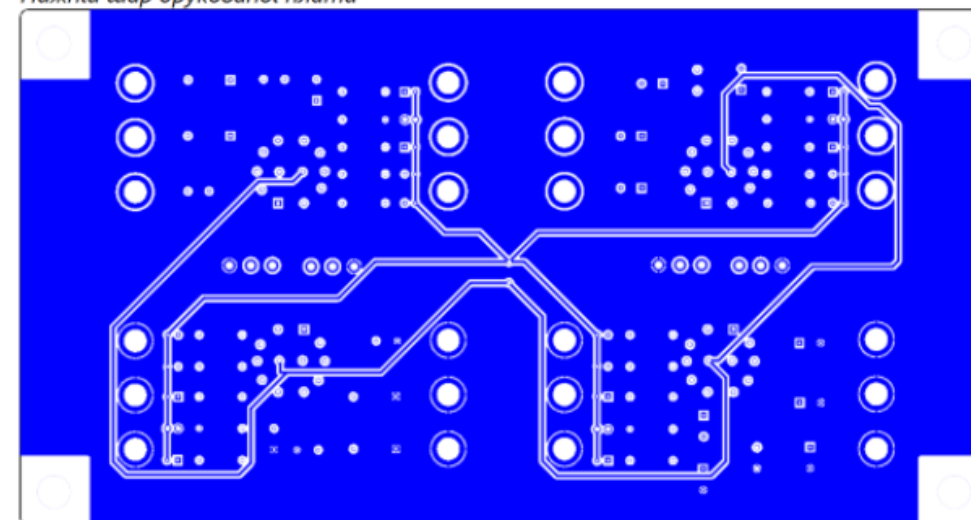
Перш. застос.

Справ. №

PI-41МП.411259.002 СК



Нижній шар друкованої плати

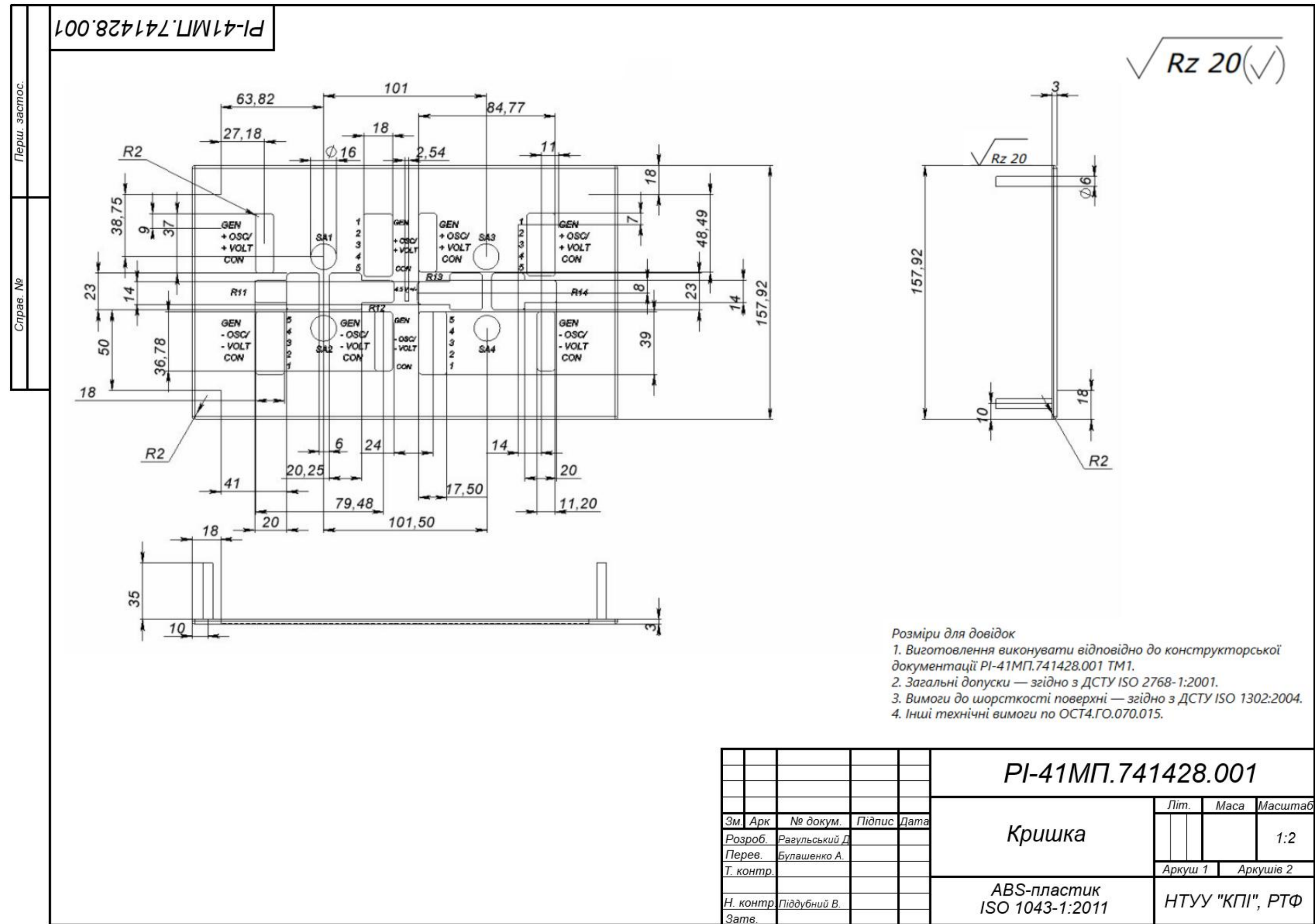


- Розміри для довідок
1. Товщина друкованої плати 1,67 мм.
 2. Отвори: монтажні по краям плати Ø8 мм.
 3. Шар міді: 35 мкм.
 4. Паяльна маска: зелена, шовкографія жовта.
 5. Матеріал плати: склотекстоліт FR4 ISO09001:2008
 6. Інші вимоги по ОСТ 4ГО.070.015

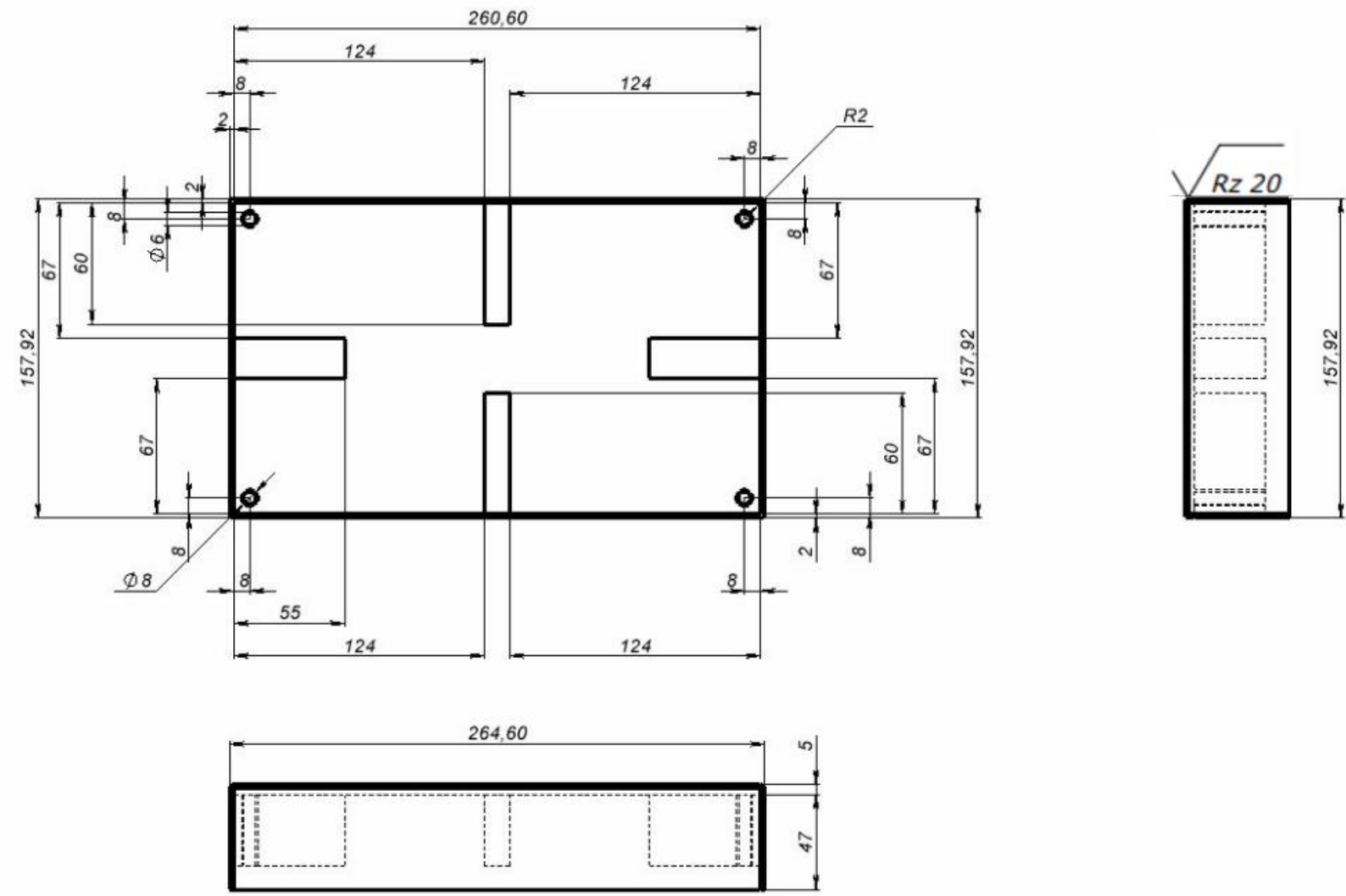
					PI-41МП.411259.002 СК							
					Друкована плата			Лім.	Маса	Масштаб		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								2:3
Розроб.	Рагульський Д.											
Перев.	Булашенко А.				FR-4 ISO 9001:2008			Аркуш 2		Аркушів 2		
Т. контр.								НТУУ "КПІ" РТФ				
Н. контр.	Піддубний В.											
Зам.												

Копіював:

Формат А3



ДОДАТОК Г. КРЕСЛЕННЯ КОРПУСА [16], [17], [19]

ПІ-41МП.741428.002		√ Rz 20(√)																																
Справ. №	Перш. застос.																																	
Розміри для довідок 1. Виготовлення виконувати відповідно до конструкторської документації ПІ-41МП.741428.001 ТМ1. 2. Загальні допуски — згідно з ДСТУ ISO 2768-1:2001. 3. Вимоги до шорсткості поверхні — згідно з ДСТУ ISO 1302:2004. 4. Інші технічні вимоги по ОСТ4.ГО.070.015.																																		
<table><tr><td colspan="5">ПІ-41МП.741428.002</td></tr><tr><td colspan="5">Основа корпусу</td></tr><tr><td colspan="5">ABS-пластик</td></tr><tr><td colspan="5">ISO 1043-1:2011</td></tr></table>					ПІ-41МП.741428.002					Основа корпусу					ABS-пластик					ISO 1043-1:2011														
ПІ-41МП.741428.002																																		
Основа корпусу																																		
ABS-пластик																																		
ISO 1043-1:2011																																		
<table><tr><td>Зм.</td><td>Арк.</td><td>№ докум.</td><td>Підпис</td><td>Дата</td></tr><tr><td>Розроб.</td><td>Розульський Д.</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Перев.</td><td>Булашенко А.</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Т. контр.</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Н. контр.</td><td>Піддубний В.</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Затв.</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>					Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розроб.	Розульський Д.				Перев.	Булашенко А.				Т. контр.					Н. контр.	Піддубний В.				Затв.				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата																														
Розроб.	Розульський Д.																																	
Перев.	Булашенко А.																																	
Т. контр.																																		
Н. контр.	Піддубний В.																																	
Затв.																																		
<table><tr><td>Літ.</td><td>Маса</td><td>Масштаб</td></tr><tr><td></td><td></td><td>1:2</td></tr><tr><td colspan="2">Аркуш 2</td><td>Аркушів 2</td></tr></table>					Літ.	Маса	Масштаб			1:2	Аркуш 2		Аркушів 2																					
Літ.	Маса	Масштаб																																
		1:2																																
Аркуш 2		Аркушів 2																																
НТУУ "КПІ", РТФ																																		

ДОДАТОК І. СПЕЦИФІКАЦІЯ

Форм.	Зона	Поз.	Позначення			Найменування	Кіл.	Прим.
						Документація		
A3			PI-41МП.411259.001 СК			Складальний кресленик	1	
A4			PI-41МП.411259.001 ПЗ			Пояснювальна записка	1	
			PI-41МП.741428.001 ТМ1			Машинна таблиця		
						(Зд-друк. Кришка)	1	
			PI-41МП.741428.001 ТМ2			Машинна таблиця		
						(Маркування. Кришка)	1	
			PI-41М.741428.002 ТМ1			Машинна таблиця		
						(Зд-друк. Основа корпусу)	1	
						Складальні одиниці		
A3			PI-41МП.411259.001 СК			Друкований вузол	1	
						Деталі		
A3			PI-41МП.741428.001			Кришка	1	
A3			PI-41МП.741428.002			Основа корпусу	1	
Зм.	Арк	№ докум.	Підп	Дата				
Розроб		Рагульський Д.			Лабораторний макет пасивних чотириполюсників	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Булашенко А.					1	1
Т.конт.						НТУУ "КПІ", РТФ		
Н.конт.		Піддубний В.						
Затв.								

ДОДАТОК Д. СПЕЦИФІКАЦІЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кількіс ть	Прим.	
				Документація			
A3			PI-41МП.411259.002 СК	Складальний кресленик	1		
				плати			
A3			PI41-МП.411259.001 ЕЗ	Схема електрична	1		
				принципова			
A4			PI-41МП.411259.001 ПЕ	Перелік елементів	1		
			PI-41МП.758752.001 ТМ1	Машинна таблиця			
				(Gerber)			
				Деталі			
		1	PI-41МП.758752.001	Друкована плата	1		
				Інші вироби			
				Резистор 510 Ом			
				±5%, 0,25 Вт	20	R1-R10, R15-R24	
				Потенціометр 10 кОм			
				3590S-2-103L, ±5%	4	R11-R14	
				PI-41МП.411259.002			
Зм.	Арк	№ докум.	Підп	Дата	Друкований вузол		
Розроб.	Рагульський Д.						
Перев	Булашенко А.						
Т.конт							
Н.конт	Піддубний В.						
Затв							
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						1	2
					НТУУ "КПІ", РТФ		

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				Конденсатор 1 нФ		
				B32529C0102J289, ±5%	2	C1,C10
				Конденсатор 2,2 нФ		
				B32021A3222M000, ±20%	2	C2,C9
				Конденсатор 3,3 нФ		
				B32021A3332M000, ±20%	2	C3,C8
				Конденсатор 4,7 нФ		
				B32529C3472K289, ±10%	2	C4,C7
				Конденсатор 6,8 нФ		
				FKP2D016801G00HSSD, ±2,5%	2	C5,C6
				Дросель 10 мГн, 120 мА		
				DR 0912, ±10%	2	L1,L10
				Дросель 22 мГн, 70 мА		
				DR 0912, ±10%	3	L2,L6,L9
				Дросель 33 мГн, 65 мА		
				DR 0912, ±10%	3	L3,L8,L11
				Дросель 47 мГн, 55 мА		
				RCH895NP-473K, ±10%	2	L4,L7
				Дросель 100 мГн, 40 мА		
				DR 0912, ±10%	1	L5
				Перемикач SR16-5Pos-2Pol	4	SA1-4
				Світлодіод L-53P3C	4	VD1-2, VD15, VD20
				Світлодіод L-53ID	4	VD3-4, VD14, VD19
				Світлодіод L-53YD	4	VD5-6, VD13, VD18
				Світлодіод L-53SGD	4	VD7-8, VD12, VD17
				Світлодіод L53PD	4	VD9-10 VD11, VD16
				Роз'єм BAJ-001-NR	24	XS1-XS24
				Роз'єм DS1023-1_2S21	1	GB1
				Корпус для батарейок АА	1	
				Матеріали		
				Мідний провід ПВ-3		
				Припій ПОС-61		
				PI-41МП.411259.002		2

ДОДАТОК Е. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R1-R10, R15-R24	510 Ом±5%, 0,25 Вт	20	
	<u>Потенціометри</u>		
R11-R14	3590S-2-103L, Bourns, 10кОм, ±5%	4	
	<u>Конденсатори</u>		
C1,C10	B32529C0102J289 – EPCOS/TDK, 1нФ, ±5%	2	
C2,C9	B32021A3222M000 – EPCOS/TDK, 2,2 нФ, ±20%	2	
C3,C8	B32021A3332M000 – EPCOS/TDK, 3,3 нФ, ±20%	2	
C4,C7	B32529C3472K289 – EPCOS/TDK, 4,7 нФ, ±10%	2	
C5,C6	FKP2D016801G00HSSD – WIMA, 6,8 нФ, ±2,5%	2	
	<u>Дроселі</u>		
L1,L10	DR 0912 – Bochen, 10 мГн, 120 мА, ±10%	2	
L2,L6,L9	DR 0912 – Bochen, 22 мГн, 70 мА, ±10%	3	
L3,L8,L11	DR 0912 – Bochen, мГн, 65 мА, ±10%	3	
L4,L7	RCH895NP-473K – Sumida, 47 мГн, 55 мА, ±10%	2	
L5	DR 0912 – Bochen, 100 мГн, 40 мА, ±10%	2	
	<u>Перемикачі</u>		
	SR16-5Pos-2Pol	4	
	</		

[illegible]

ДОДАТОК Ж. РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕДАЧІ СХЕМ У ПРОГРАМІ MATHCAD

Схема 1

Початкові дані до схеми 1

$$R1 := 3 \cdot 10^3 \quad R2 := 100 \quad C1 := 1 \cdot 10^{-9} \quad C2 := 3.3 \cdot 10^{-9}$$

Розрахунок провідностей елементів:

$$g1 := \frac{1}{R1} = 3.333 \times 10^{-4} \quad g2 := \frac{1}{R2} = 0.01$$

Сформуємо матрицю провідностей згідно методу вузлових напруг

$$Y(p) := \begin{pmatrix} g1 + p \cdot C1 & -g1 & -p \cdot C1 \\ -g1 & g1 + g2 + p \cdot C2 & -g2 \\ -p \cdot C1 & -g2 & g2 + p \cdot C2 \end{pmatrix}$$

$$Y(p) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{p}{1000000000} + 0.0003333333333333332 & -0.0003333333333333332 & -\frac{p}{1000000000} \\ -0.0003333333333333332 & 3.3e-9 \cdot p + 0.0103333333333333332 & -0.01 \\ -\frac{p}{1000000000} & -0.01 & 3.3e-9 \cdot p + 0.01 \end{pmatrix}$$

Розрахуємо визначники матриці:

$$\Delta_{11}(p) := \text{submatrix}(Y(p), 1, 2, 1, 2) \rightarrow \begin{pmatrix} 3.3e-9 \cdot p + 0.0103333333333333332 & -0.01 \\ -0.01 & 3.3e-9 \cdot p + 0.01 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{13}(p) := \text{submatrix}(Y(p), 1, 2, 0, 1) \rightarrow \begin{pmatrix} -0.0003333333333333332 & 3.3e-9 \cdot p + 0.0103333333333333332 \\ -\frac{p}{1000000000} & -0.01 \end{pmatrix}$$

Визначимо коефіцієнт передачі

$$Ku(p) := \frac{|\Delta_{13}(p)|}{|\Delta_{11}(p)|} \rightarrow \frac{3.3e-18 \cdot p^2 + 1.0333333333333332e-11 \cdot p + 0.00000333333333333332}{1.089e-17 \cdot p^2 + 6.70999999999999956e-11 \cdot p + 0.00000333333333333332}$$

$$Ku(w) := \frac{3.3e-18 \cdot (w \cdot i)^2 + 1.0333333333333332e-11 \cdot (w \cdot i) + 0.00000333333333333332}{1.089e-17 \cdot (w \cdot i)^2 + 6.70999999999999956e-11 \cdot (w \cdot i) + 0.00000333333333333332}$$

$$Ku(f) := \frac{3.3e-18 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 + 1.0333333333333332e-11 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i) + 0.00000333333333333332}{1.089e-17 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 + 6.70999999999999956e-11 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i) + 0.00000333333333333332}$$

Схема 2

Початкові дані до схеми 2

$$R1 := 1.5 \cdot 10^3 \quad R2 := 20 \quad L1 := 196 \cdot 10^{-3} \quad L2 := 32.4 \cdot 10^{-3} \quad R3 := 105 \quad R4 := 30$$

Розрахунок провідностей елементів:

$$g1 := \frac{1}{R1} = 6.667 \times 10^{-4} \quad g2 := \frac{1}{R2} = 0.05 \quad g3 := \frac{1}{R3} = 9.524 \times 10^{-3} \quad g4 := \frac{1}{R4} = 0.033$$

$$Y1(p) := \frac{1}{R3 + p \cdot L1} \quad Y2(p) := \frac{1}{R4 + p \cdot L2}$$

Сформуємо матрицю провідностей згідно методу вузлових напруг

$$Y(p) := \begin{pmatrix} g1 + Y1(p) & -g1 & -Y1(p) \\ -g1 & g1 + g2 + Y2(p) & -g2 \\ -Y1(p) & -g2 & g2 + Y1(p) \end{pmatrix}$$

$$Y(p) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{49 \cdot p}{250} + 105} + 0.0006666666666666664 & -0.0006666666666666664 & -\frac{1}{\frac{49 \cdot p}{250} + 105} \\ -0.0006666666666666664 & \frac{1}{0.0324 \cdot p + 30} + 0.0506666666666666664 & -0.05 \\ -\frac{1}{\frac{49 \cdot p}{250} + 105} & -0.05 & \frac{1}{\frac{49 \cdot p}{250} + 105} + 0.05 \end{pmatrix}$$

Розрахуємо визначники матриці:

$$\Delta_{11}(p) := \text{submatrix}(Y(p), 1, 2, 1, 2) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{0.0324 \cdot p + 30} + 0.0506666666666666664 & -0.05 \\ -0.05 & \frac{1}{\frac{49 \cdot p}{250} + 105} + 0.05 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{13}(p) := \text{submatrix}(Y(p), 1, 2, 0, 1) \rightarrow \begin{pmatrix} -0.0006666666666666664 & \frac{1}{0.0324 \cdot p + 30} + 0.0506666666666666664 \\ -\frac{1}{\frac{49 \cdot p}{250} + 105} & -0.05 \end{pmatrix}$$

Визначимо коефіцієнт передачі

$$Ku(p) := \frac{|\Delta_{13}(p)|}{|\Delta_{11}(p)|} \rightarrow \frac{3.307499999999998677e19 \cdot p^2 + 3.048437499999999793e23 \cdot p + 4.10156249999999922e26}{3.307499999999998677e19 \cdot p^2 + 1.836093749999999979e24 \cdot p + 1.23046874999999992e27}$$

$$Ku(w) := \frac{3.307499999999998677e19 \cdot (w \cdot i)^2 + 3.048437499999999793e23 \cdot (w \cdot i) + 4.10156249999999922e26}{3.307499999999998677e19 \cdot (w \cdot i)^2 + 1.836093749999999979e24 \cdot (w \cdot i) + 1.23046874999999992e27} \quad w \cdot i$$

$$Ku(f) := \frac{3.307499999999998677e19 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 + 3.048437499999999793e23 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i) + 4.10156249999999922e26}{3.307499999999998677e19 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 + 1.836093749999999979e24 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i) + 1.23046874999999992e27} \quad 2 \cdot \pi \cdot f$$

Схема 3

Початкові дані до схеми 3

$$\begin{array}{llllll} \underline{R1} := 11 \cdot 10^3 & \underline{R2} := 11 \cdot 10^3 & \underline{R3} := 11 \cdot 10^3 & \underline{R4} := 11 \cdot 10^3 & \underline{R5} := 27 & \underline{R6} := 45 \\ \underline{L1} := 22 \cdot 10^{-3} & \underline{L2} := 45 \cdot 10^{-3} & \underline{C1} := 1 \cdot 10^{-9} & \underline{C2} := 3.3 \cdot 10^{-9} & & \end{array}$$

Розрахунок провідностей елементів:

$$\begin{aligned} \underline{g1} &= \frac{1}{R1} = 9.091 \times 10^{-5} & \underline{g2} &= \frac{1}{R2} = 9.091 \times 10^{-5} & \underline{g3} &= \frac{1}{R3} = 9.091 \times 10^{-5} & \underline{g4} &= \frac{1}{R4} = 9.091 \times 10^{-5} \\ \underline{g5} &= \frac{1}{R5} = 0.037 & \underline{g6} &= \frac{1}{R6} = 0.022 \\ \underline{Y1(p)} &= \frac{1}{R5 + p \cdot L1} & \underline{Y2(p)} &= \frac{1}{R6 + p \cdot L2} \end{aligned}$$

Сформуємо матрицю провідностей згідно методу вузлових напруг

$$Y_{\text{out}}(p) = \begin{bmatrix} g_3 + Y_1(p) & -g_3 & -Y_1(p) & 0 & 0 \\ -g_3 & g_3 + g_4 + Y_2(p) & -g_4 & 0 & 0 \\ -Y_1(p) & -g_4 & g_4 + p \cdot C_1 + g_1 + Y_1(p) & -g_1 & -p \cdot C_1 \\ 0 & 0 & -g_1 & g_1 + g_2 + p \cdot C_2 & -g_2 \\ 0 & 0 & -(p \cdot C_1) & -g_2 & g_2 + p \cdot C_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
Y(p) &\rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} + 0.0000909090909090909 & -0.0000909090909090909 & -\frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} & 0 & 0 \\ -0.0000909090909090909 & \frac{1}{\frac{9p}{200} + 45} + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} & -0.0000909090909090909 & \frac{p}{1000000000} + \frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 & -\frac{p}{1000000000} \\ 0 & 0 & -0.0000909090909090909 & 3.3e-9p + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 \\ \left(\frac{1}{\frac{9p}{200} + 45} + 0.0001818181818181818 \right. & -0.0000909090909090909 & 0 & 0 & \left. 0.000909 \right) \end{pmatrix} \\
\Delta 11(p) := \text{submatrix}(Y(p), 1, 4, 1, 4) &\rightarrow \begin{pmatrix} -0.0000909090909090909 & \frac{p}{1000000000} + \frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 & -\frac{p}{1000000000} \\ 0 & -0.0000909090909090909 & 3.3e-9p + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 \\ 0 & -\frac{p}{1000000000} & -0.0000909090909090909 & \frac{p}{1000000000} + 0.0000909090909090909 \end{pmatrix} \\
\Delta 14(p) := \text{submatrix}(Y(p), 1, 4, 0, 3) &\rightarrow \begin{pmatrix} -0.0000909090909090909 & \frac{1}{\frac{9p}{200} + 45} + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 & 0 \\ -\frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} & -0.0000909090909090909 & \frac{p}{1000000000} + \frac{1}{\frac{11p}{500} + 27} + 0.0001818181818181818 & -0.0000909090909090909 \\ 0 & 0 & -0.0000909090909090909 & 3.3e-9p + 0.0001818181818181818 \\ 0 & 0 & \frac{p}{1000000000} & -0.0000909090909090909 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Визначимо коефіцієнт передачі за напругою

[illegible]

Схема 4

Початкові дані до схеми 4

$$\underline{R1} := 11 \cdot 10^{-3} \quad \underline{R2} := 11 \cdot 10^{-3} \quad \underline{R3} := 5.1 \quad \underline{R4} := 1.5 \cdot 10^{-3} \quad R5 := 105 \quad R6 := 27$$

$$\underline{L1} := 96 \cdot 10^{-3} \quad \underline{L2} := 22 \cdot 10^{-3} \quad \underline{C1} := 4.7 \cdot 10^{-9} \quad \underline{C2} := 1 \cdot 10^{-9}$$

Розрахунок провідностей елементів:

$$\underline{g1} := \frac{1}{R1} = 9.091 \times 10^{-5} \quad \underline{g2} := \frac{1}{R2} = 9.091 \times 10^{-5} \quad \underline{g3} := \frac{1}{R3} = 0.196 \quad \underline{g4} := \frac{1}{R4} = 6.667 \times 10^{-4}$$

$$\underline{g5} := \frac{1}{R5} = 9.524 \times 10^{-3} \quad \underline{g6} := \frac{1}{R6} = 0.037$$

$$\underline{Y1(p)} := \frac{1}{R5 + p \cdot L1} \quad \underline{Y2(p)} := \frac{1}{R6 + p \cdot L2}$$

Сформуємо матрицю провідностей згідно методу вузлових напруг

$$\underline{Y(p)} := \begin{pmatrix} g1 + p \cdot C1 & -g1 & -p \cdot C1 & 0 & 0 \\ -g1 & g1 + g2 + p \cdot C1 & -g2 & 0 & 0 \\ -p \cdot C1 & -g2 & g2 + p \cdot C1 + g3 + Y1(p) & -g3 & -Y1(p) \\ 0 & 0 & -g3 & g3 + g4 + Y2(p) & -g4 \\ 0 & 0 & -Y1(p) & -g4 & g4 + Y1(p) \end{pmatrix}$$

$$\underline{Y(p)} \rightarrow \begin{pmatrix} 4.7e-9 \cdot p + 0.00009090909090909 & -0.00009090909090909 & -4.7e-9 \cdot p & 0 & 0 \\ -0.00009090909090909 & 4.7e-9 \cdot p + 0.00018181818181818 & -0.00009090909090909 & 0 & 0 \\ -4.7e-9 \cdot p & -0.00009090909090909 & 4.7e-9 \cdot p + \frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} & 0.1961693404634581409 & -0.19607843137254905 \\ 0 & 0 & -0.19607843137254905 & \frac{1}{\frac{11 \cdot p}{500} + 27} + 0.19674509803921571664 & -0.0006666666666666664 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} & -0.0006666666666666664 & \frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} + 0.0006666666666666664 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\Delta 11(p)} := \text{submatrix}(\underline{Y(p)}, 1, 4, 1, 4) \rightarrow \begin{pmatrix} 4.7e-9 \cdot p + 0.00018181818181818 & -0.00009090909090909 & 0 & 0 \\ -0.00009090909090909 & 4.7e-9 \cdot p + \frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} + 0.1961693404634581409 & -0.19607843137254905 & -\frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} \\ 0 & -0.19607843137254905 & \frac{1}{\frac{11 \cdot p}{500} + 27} + 0.19674509803921571664 & -0.0006666666666666664 \\ 0 & -\frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} & -0.0006666666666666664 & \frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} + 0.0006666666666666664 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\Delta 14(p)} := \text{submatrix}(\underline{Y(p)}, 1, 4, 0, 3) \rightarrow \begin{pmatrix} -0.00009090909090909 & 4.7e-9 \cdot p + 0.00018181818181818 & -0.00009090909090909 & 0 \\ -4.7e-9 \cdot p & -0.00009090909090909 & 4.7e-9 \cdot p + \frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} + 0.1961693404634581409 & -0.19607843137254905 \\ 0 & 0 & -0.19607843137254905 & \frac{1}{\frac{11 \cdot p}{500} + 27} + 0.19674509803921571664 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\frac{12 \cdot p}{125} + 105} & -0.0006666666666666664 \end{pmatrix}$$

Визначимо коефіцієнт передачі

$$\underline{Ku(p)} = \frac{|\Delta 14(p)|}{|\Delta 11(p)|} \rightarrow \frac{(1.375e85 \cdot p^3 + 4.6953125e88 \cdot p^2 + 5.3363037109375e91 \cdot p + 2.01873779296875e94) \cdot (2.1049604313725492617e40 \cdot p^6 + 2.0074710160747549829e45 \cdot p^5 + 7.7074201316556314338e49 \cdot p^4 + 1.4992068748332926665e54 \cdot p^3 + 1.5056999093358227269e58 \cdot p^2 + 7.2897e60 \cdot p^4 + 2.989195593749999718e65 \cdot p^3 + 3.3915863160511357527e69 \cdot p^2 + 5.7085989152892548945e72 \cdot p + 3.6608987603305777802e75) \cdot (3.9704248366013076461e64 \cdot p^5 + 3.07119488684640678e69 \cdot p^4 + 4.4512683304989525165e74 \cdot p^3 + 2.2105005793313e78)}{(7.2897e60 \cdot p^4 + 2.989195593749999718e65 \cdot p^3 + 3.3915863160511357527e69 \cdot p^2 + 5.7085989152892548945e72 \cdot p + 3.6608987603305777802e75) \cdot (3.9704248366013076461e64 \cdot p^5 + 3.07119488684640678e69 \cdot p^4 + 4.4512683304989525165e74 \cdot p^3 + 2.2105005793313e78)}$$

$$\underline{Ku(p)} \text{ simplify } \rightarrow \frac{1.0 \cdot p^9 + 98783.359526112178565 \cdot p^8 + 3.9910940730249485543e9 \cdot p^7 + 8.409752147708700043e13 \cdot p^6 + 9.7286950532485347029e17 \cdot p^5 + 5.9444278285939490112e21 \cdot p^4 + 1.7264393153445737041e25 \cdot p^3 + 2.511655602880795498e28 \cdot p^2 + 1.7876629590481987845e31 \cdot p + 40064.031138079240829 \cdot (p + 16771.893053583540464) \cdot (p + 19342.359762460038284) \cdot (p + 19342.359773323323414) \cdot (p + 1227.272727272727333) \cdot (p^2 + 2187.4999999999999995 \cdot p + 1.1962890624999999995e6) \cdot (p^2 + 19422.12102110317117 \cdot p + 9.3518)}$$

$$\underline{Ku(p)} \text{ collect } \rightarrow \frac{1.4471602965686276174e33 \cdot p^9 + 1.4295535586785386643e38 \cdot p^8 + 5.7757528823520764787e42 \cdot p^7 + 1.2170259412146775403e47 \cdot p^6 + 1.4078981218484889931e51 \cdot p^5 + 8.6025399393588223478e54 \cdot p^4 + 2.4984344316017916981e58 \cdot p^3 + 3.6347682671432272067e61 \cdot p^2 + 2.14471602965686276174e33 \cdot p^9 + 1.7128232903464308286e38 \cdot p^8 + 2.1487708416057259552e43 \cdot p^7 + 1.5243927998434591138e48 \cdot p^6 + 5.0646128583792582414e52 \cdot p^5 + 8.0803621687991578146e56 \cdot p^4 + 5.78951493881056669e60 \cdot p^3 + 1.4194506235400266332e64 \cdot p^2 + 1.4}$$

$$\underline{Ku(p)} = \frac{1.4472 \cdot p^9 + 1.429 \cdot 10^5 \cdot p^8 + 5.776 \times 10^9 \cdot p^7 + 1.217 \cdot 10^{14} \cdot p^6 + 1.4079 \cdot 10^{18} \cdot p^5 + 8.60 \cdot 10^{21} \cdot p^4 + 2.498 \cdot 10^{25} \cdot p^3 + 3.63 \cdot 10^{28} \cdot p^2 + 2.587 \cdot 10^{31} \cdot p + 7.12 \cdot 10^{33}}{1.4472 \cdot p^9 + 1.713 \times 10^5 \cdot p^8 + 2.149 \cdot 10^{10} \cdot p^7 + 1.524 \cdot 10^{15} \cdot p^6 + 5.06 \cdot 10^{19} \cdot p^5 + 8.08 \cdot 10^{23} \cdot p^4 + 5.7895 \cdot 10^{27} \cdot p^3 + 1.419 \cdot 10^{31} \cdot p^2 + 1.415 \cdot 10^{34} \cdot p + 4.995 \cdot 10^{36}}$$

$$\underline{Ku(w)} = \frac{1.4472 \cdot (w \cdot i)^9 + 1.429 \cdot 10^5 \cdot (w \cdot i)^8 + 5.776 \times 10^9 \cdot (w \cdot i)^7 + 1.217 \cdot 10^{14} \cdot (w \cdot i)^6 + 1.4079 \cdot 10^{18} \cdot (w \cdot i)^5 + 8.60 \cdot 10^{21} \cdot (w \cdot i)^4 + 2.498 \cdot 10^{25} \cdot (w \cdot i)^3 + 3.63 \cdot 10^{28} \cdot (w \cdot i)^2 + 2.587 \cdot 10^{31} \cdot (w \cdot i) + 7.12 \cdot 10^{33}}{1.4472 \cdot (w \cdot i)^9 + 1.713 \times 10^5 \cdot (w \cdot i)^8 + 2.149 \cdot 10^{10} \cdot (w \cdot i)^7 + 1.524 \cdot 10^{15} \cdot (w \cdot i)^6 + 5.06 \cdot 10^{19} \cdot (w \cdot i)^5 + 8.08 \cdot 10^{23} \cdot (w \cdot i)^4 + 5.7895 \cdot 10^{27} \cdot (w \cdot i)^3 + 1.419 \cdot 10^{31} \cdot (w \cdot i)^2 + 1.415 \cdot 10^{34} \cdot (w \cdot i) + 4.995 \cdot 10^{36}}$$

$$\underline{Ku(f)} = \frac{1.4472 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^9 + 1.429 \cdot 10^5 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^8 + 5.776 \times 10^9 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^7 + 1.217 \cdot 10^{14} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^6 + 1.4079 \cdot 10^{18} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^5 + 8.60 \cdot 10^{21} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^4 + 2.498 \cdot 10^{25} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^3 + 3.63 \cdot 10^{28} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 + 2.587 \cdot 10^{31} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i) + 7.12 \cdot 10^{33}}{1.4472 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^9 + 1.713 \times 10^5 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^8 + 2.149 \cdot 10^{10} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^7 + 1.524 \cdot 10^{15} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^6 + 5.06 \cdot 10^{19} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^5 + 8.08 \cdot 10^{23} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^4 + 5.7895 \cdot 10^{27} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^3 + 1.419 \cdot 10^{31} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 + 1.415 \cdot 10^{34} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i) + 4.995 \cdot 10^{36}}$$