

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
з дисципліни

"Теорія електричних кіл та сигналів",
частина 1

для студентів спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми
«Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні
технології мікросистемної радіоелектронної техніки»)
усіх форм навчання

2019

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Теорія електричних кіл та сигналів", частина 1 для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Огренич Є.В., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 70 с.

Укладачі : Огренич Євген Вікторович, канд. техн. наук, ст. викл.
 Поспеева Ірина Євгенівна, ст. викладач,

Рецензент: Фарафонов Олексій Юрійович, канд. техн. наук,
доцент

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, д.т.н., доцент,
зав. каф. ІТЕЗ

Затверджено
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 6 від 01.02.19 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
протокол № 7 від 21.03.19 р.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	5
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ПОБУДОВА СХЕМ В "ELECTRONICS WORKBENCH"	6
1.1 Теоретичні відомості.....	6
1.2 Опис меню "Electronics Workbench" версії 5.12	7
1.2.1 Меню File	7
1.2.2 Меню Edit.....	7
1.2.3 Меню Circuit	8
1.2.4 Меню Analysis	10
1.3 Порядок виконання роботи	12
1.4 Контрольні запитання	18
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ У ПРОГРАМІ "ELECTRONICS WORKBENCH"	19
2.1 Теоретичні відомості.....	19
2.1.1 Параметри періодичних електричних сигналів	19
2.1.2 Засоби вимірювань та їх основні параметри.....	22
2.2 Підготовка до роботи.....	29
2.3 Порядок виконання роботи	29
2.4 Зміст звіту	32
2.5 Контрольні запитання	32
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. ФІЛЬТРИ.....	33
3.1 Теоретичні відомості.....	33
3.1.1 Основні параметри та характеристики фільтрів	33
3.1.2 Класифікація електричних фільтрів	37
3.1.3 Конструкції фільтрів	39
3.1.4 LC-фільтри.....	40
3.1.5 Вплив конструкції LC-фільтра на його електричні параметри	43
3.1.6 Пасивні RC-фільтри	44
3.1.7 Активні RC-фільтри	45
3.2 Підготовка до роботи	49
3.3 Порядок виконання роботи	50
3.3.1 Моделювання LC-фільтрів	50
3.3.2 Моделювання пасивних RC-фільтрів	52
3.4 Зміст звіту	53
3.5 Контрольні запитання	53
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	54
4.1 Теоретичні відомості.....	54
4.1.1 Загальні відомості.....	54

4.1.2 Застосування та основні параметри довгих ліній.....	56
4.1.3 Конструкції ліній передачі	57
4.1.4 Режими роботи довгих ліній	58
4.1.5 Конструкції вимірювальної лінії.....	59
4.1.6 Вимірювання довжини хвилі.....	62
4.1.7 Вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі	63
4.2 Підготовка до роботи	64
4.3 Порядок виконання роботи	65
4.3.1 Настроювання вимірювальної установки.....	66
4.3.2 Дослідження розподілу поля	66
4.3.3 Визначення довжини хвилі виделковим методом	67
4.3.4 Визначення коефіцієнта стоячої хвилі	68
4.4 Зміст звіту	69
4.5 Контрольні запитання	69
ЛІТЕРАТУРА	70

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Перша частина лабораторних робіт з дисципліни "Теорія електричних кіл та сигналів" виконується у третьому семестрі.

Протягом семестру студенти виконують чотири лабораторні роботи.

Лабораторна робота № 1. Побудова схем в "Electronics Workbench.

Лабораторна робота № 2. Засоби вимірювань у програмі "Electronics Workbench.

Лабораторна робота № 3. Фільтри.

Лабораторна робота № 4. Кола з розподіленими параметрами.

Мета лабораторних робіт: ознайомитись з видами лінійних та нелінійних електричних кіл та їх основними компонентами, особливостями їх роботи при постійному та змінному струмі, засвоїти методики аналізу та розрахунків схем електронних приладів, отримати практичні навички використання систем САПР для моделювання та аналізу роботи схем електронних приладів.

При виконанні лабораторних робіт студентам рекомендується користуватись пакетом програм схематичного моделювання "Electronics Workbench".

У разі використання на кафедрі більш сучасних аналогічних пакетів програм викладач надає додаткові інструкції з порядку роботи з цими пакетами.

Перед початком роботи студент повинен ознайомитись з методичними вказівками до даної роботи, проробити теоретичний матеріал з тем, що стосуються даної роботи, та відповісти на контрольні запитання. Студенти, не підготовлені до роботи, до занять не допускаються.

У процесі виконання роботи студенти вносять результати вимірювань і випробувань в протокол і по закінченні роботи представляють викладачеві на підпис.

Для отримання заліку по роботі кожний студент пред'являє викладачеві звіт, оформлений відповідно до вимог, перерахованих в методичних вказівках до роботи, і проходить співбесіду з викладачем.

Студент, що не здав попередньої роботи, не може бути допущений до виконання наступної.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ПОБУДОВА СХЕМ В "ELECTRONICS WORKBENCH"

Мета роботи - вивчення основних команд складання, опису та редагування електричних схем в програмі "Electronics Workbench".

1.1 Теоретичні відомості

Перед початком моделювання електронних схем студентам необхідно ознайомитись з загальними вимогами до схем електричних принципів, що наведені у державному стандарті ДСТУ ГОСТ 2.702:2013. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT) та довідковій літературі.

Схема виконується без дотримувannya масштабу.

Елементи схеми зображуються умовними графічними позначеннями, що були встановлені у державних стандартах системі ГОСТ ЕСКД та наводяться у довідковій літературі. Умовні графічні позначення на схемі розташовуються рядками. Їх належить розміщати таким чином, щоб забезпечити найкращу уяву про структуру схеми.

Лінії зв'язку повинні складатись із вертикальних та горизонтальних відрізків, мати найменшу кількість зламів та перетинань. Мінімальна відстань між лініями зв'язку – 3 мм.

Кожний елемент схеми має позиційне позначення, що вказується над елементом, або праворуч від нього.

Умовні графічні позначення, лінії зв'язку та надписи слід виконувати лініями однієї товщини (від 0,2 до 1,0 мм).

1.2 Опис меню "Electronics Workbench" версії 5.12

1.2.1 Меню File

Меню File (рис.1.1) дозволяє здійснити команди завантаження та запису файлів, отримання твердої копії схеми, а також для імпорту (експорту) .файлів в форматах інших систем моделювання і програм розробки друкованих плат.

<u>N</u> ew	Ctrl+N
<u>O</u> pen...	Ctrl+O
<u>S</u> ave	Ctrl+S
Save <u>A</u> s...	
<u>R</u> evert to Saved...	
I <u>m</u> port...	
E <u>x</u> port...	
<u>P</u> rint...	Ctrl+P
Print <u>S</u> etup...	
<u>E</u> xit	Alt+F4
<u>I</u> nstall...	

Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд меню File

1.2.2 Меню Edit

Меню Edit (рис.1.2) дозволяє здійснити команди редагування схем та копіювання екрану.

<u>C</u> ut	Ctrl+X
<u>C</u> opy	Ctrl+C
<u>P</u> aste	Ctrl+V
<u>D</u> elete	Del
S <u>e</u> lect <u>A</u> ll	Ctrl+A
<u>C</u> opy as B <u>i</u> tmap	
<u>S</u> how Clipboard	

Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд меню Edit

1.2.3 Меню Circuit

Меню Circuit (рис.1.3) використовується при підготовці схеми, а також для завдання параметрів моделі активних компонентів.

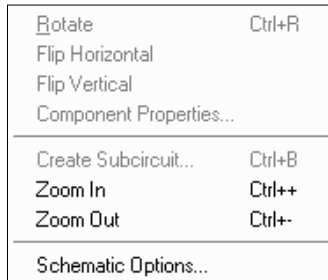


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд меню Circuit

Команда **Circuit/Component Properties** призначена для зміни властивостей вибраного компонента. При виконанні цієї команди відкривається діалогове вікно **Component Properties**, закладки якого залежать від типу вибраного компонента.

Можливі наступні типи закладок:

- Label,
- Value,
- Models,
- Fault,
- Display,
- Analysis Setup.

Зкладка **Label** використовується, щоб встановити або замінити мітку компонента і ідентифікатор (компоненти типу з'єднувачів, заземлень, вимірників не мають ідентифікаторів).

Якщо Ви обертаєте або дзеркально відображаєте компонент, мітка може бути встановлена повторно. Якщо, в результаті, провід проходить через мітку, Ви можете здвинути мітку праворуч, додаючи декілька пропусків перед міткою.

Щоб вставити загальну інформацію в схему, введіть текст у вікно опису, доступне з меню Window.

Закладка **Value** використовується для установки значень параметрів компонентів схеми. Поля на цій закладці розрізняються в залежності від компонента.

Закладка **Models** використовується, щоб вибрати модель активного компонента і для редагування, додання або видалення моделей або бібліотек. Компоненти за умовчанням «ідеальні», що для більшості схемотехнічних моделювань може бути достатньо. Однак, якщо ви хочете збільшити точність результатів моделювання, використовуйте «реальну» модель.

Закладка **Fault** використовується для імітації несправності компонента.

Leakage - вміщує значення опору, визначене в суміжних полях, паралельно з вибраними контактами. Це примушує струм текти мимо контактів замість того, щоб пройти їх.

Short - вміщує дуже низький опір між двома контактами, так що компонент не має ніякого вимірного ефекту на схемі.

Open - вміщує дуже високий опір на контакті, неначе провідне з'єднання на контакті було розірване.

None – несправності відсутні (вкл. за умовчанням)

Закладка **Display** використовується для відображення або скриття тих чи інших елементів Electronics Workbench.

Коли вибране Use Schematic Options global setting, використовуються настройки параметрів дисплея із закладки Show/Hide діалогового вікна Circuit/Schematic Options.

Show labels, Show values, Show reference ID - коли не вибране Use Schematic Options global setting, використовуються параметри дисплея як вони були визначені.

Закладка **Analysis Setup** використовується для настройки параметрів елементів, таких як робоча температура.

Якщо вибрано Use global temperature - використовується окремо набір температур встановлений в Analysis/Analysis Options. Якщо не вибрано, використовуються ті температури, які були визначені.

Деякі компоненти відображають додаткові параметри на цій закладці, для використання разом з параметрами, описаними в технічному довіднику Electronics Workbench.

Команда **Circuit/Create Subcircuit** об'єднує вибрані елементи схеми в підсхему, створюючи інтегральну схему.

Підсхема може містити стільки компонентів, скільки потрібно.

Щоб створити підсхему слід вибрати елементи, які треба використати для підсхеми, після чого вибрати Circuit/Create Subcircuit, і завершити діалог, який з'являється:

- Copy from Circuit - вміщує копію вибраних компонентів в підсхемі; первинні компоненти залишаються, оскільки вони знаходяться у вікні схеми;
- Move from Circuit - прибирає вибрані компоненти зі схеми, так що вони з'являються тільки в підсхемі;
- Replace in Circuit, вміщує вибрані компоненти в підсхему і замінює вибрані компоненти в схемі прямокутником, поміченим ім'ям підсхеми.

Вибрані компоненти з'являються в новому вікні, вікні підсхеми. Ім'я нової підсхеми додається до списку доступних підсхем, який відображається, коли піктограма підсхеми переміщується з інструментальної панелі Favorites. Підсхема доступна тільки для поточної схеми.

1.2.4 Меню Analysis

Меню Analysis дозволяє виконувати різні аналізи електронних схем. Зовнішній вигляд меню наведений на рис 1.4. Перед виконанням кожного з них користувачеві буде запропоновано заповнити діалогове вікно настройки параметрів моделювання. Аналіз буде виконаний тільки в тому випадку коли це можливе для даної схеми.

Команда **Analysis/Activate** активізує схему (включає перемикач живлення). Перемикач живлення залишається включеним, поки Ви не зупините або не припините моделювання.

Команда **Analysis/Pause** тимчасово перериває або продовжує моделювання (керується кнопкою Pause). Припинення корисне, якщо ви хочете розглянути форму хвилі (форму кривої, форму сигналу) або зробити зміни в інструментальних настройках.

Команда **Analysis/Stop** вручну зупиняє моделювання. Має той же самий ефект, як натиснення перемикача живлення.

Зверніть увагу, що вимкнення енергії стирає дані і інструментальні сліди і скидає всі значення до початкових.

Activate	Ctrl+G
Pause	F9
Stop	Ctrl+T
Analysis Options...	Ctrl+Y
DC Operating Point	
DC Sweep...	
AC Frequency...	
Transient...	
Fourier...	
Noise...	
Distortion...	
Parameter Sweep...	
Temperature Sweep...	
Pole/Zero...	
Transfer Function...	
Sensitivity...	
Worst Case...	
Monte Carlo...	
Display Graphs	

Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд меню Analysis

Команда **Analysis/Analysis Options** призначена для встановлення параметрів моделювання. При виконанні цієї команди відкривається діалогове вікно Analysis Options. У вікні команди виводиться наступний набір закладок:

- Global;
- DC;
- Transient;
- Devise;
- Instruments.

Закладка **Global** використовується для настроювання параметрів моделювання загального характеру.

Закладка **DC** використовується для установлення параметрів моделювання режиму постійного струму.

Закладка **Transient** використовується для настроювання параметрів режиму моделювання перехідних процесів.

Закладка **Devise** використовується для установлення параметрів моделі МОН-транзистора.

Закладка **Instruments** використовується для настроювання параметрів контрольно-вимірювальних приборів.

Команда **Analysis/DC Operating Point** виконує розрахунок режиму постійного струму.

Команда **Analysis/AC Frequency** виконує розрахунок частотних характеристик.

Команда **Analysis/Transient** виконує розрахунок перехідних процесів.

Команда **Analysis/Fourier** виконує Фур'є аналіз.

Команда **Analysis/Noise** виконує аналіз спектру шумів.

Команда **Analysis//Distortion** виконує аналіз нелінійних та інтермодуляційних спотворень.

Команда **Analysis/Parameter Sweep** виконує варіацію параметрів елементів схеми.

Команда **Analysis/Temperature Sweep** виконує аналіз температурних випробувань.

Команда **Analysis/Pole-Zero** виконує розрахунок карти нулів та полюсів передаточної характеристики схеми.

Команда **Analysis/Transfer Function** виконує розрахунок передаточних функцій.

Команда **Analysis/Sensitivity** виконує аналіз чутливості характеристик схеми до зміни параметрів обраного компонента.

Команда **Analysis/Worst Case** виконує розрахунок параметрів схеми .

Команда **Analysis/Monte Carlo** виконує статистичний аналіз за методом Монте-Карло.

Команда **Analysis/Display Graph** виводить на екран графічні результати аналізу.

1.3 Порядок виконання роботи

1.3.1 Викличте програму "Electronics Workbench", для чого активізуйте ярлик "Ewb5" на екрані комп'ютера, клацнувши на ньому лівою кнопкою миші, після чого двічі клацніть лівою кнопкою на активізованому ярлику. На екрані монітора з'явиться вікно "Electronics Workbench", що містить: набір меню **File**, **Edit**, **Circuit**, **Analysis**, **Window** та **Help**; інструментальна панель, яка містить розділи Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments, де знаходиться потрібний вам елемент та робочий стіл (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Вигляд робочого стола на екрані комп'ютера

1.3.2 Ознайомтеся з меню **File, Edit, Circuit, Analysis, Window** та **Help**, послідовно активізуючи їх натисненням лівої кнопки миші. Побудову нової схеми можна почати застосувавши команду **File/New**. Для зручності розміщення елементів на робочому столі можна використати сітку, застосувавши команду **Show grid** з закладки **Grid** меню **Circuit/Schematic Options**.

1.3.3 Зберіть принципові схеми відповідно до заданого варіанту (табл. 1.1), використовуючи відповідні елементи, що розміщені в розділах Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments, перетягуючи їх мишкою з натисненою лівою кнопкою з розділу на робочий стіл. Поворот елементів можна здійснювати командою **Circuit/Rotate**. Натисненням правою кнопкою миші на елементі також можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, таким як обертання (**rotate**), розворот (**flip**), копіювання/вирізування (**copy/cut**), вставка (**paste**). Вилучити елемент з робочого стола можна командою **Edit/Cut**.

1.3.4 З'єднайте контакти елементів схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно клацнути на одному із контактів лівою кнопкою миші і, не відпускаючи кнопку, довести провідник до другого контакту та відпустити кнопку.

1.3.5 У побудованій принциповій схемі провести позначення елементів і задати їх параметри. Для цього необхідно активізувати послідовно кожний елемент, клацнувши на ньому лівою кнопкою

миші. Позначення елемента можна задати командою **Label** з меню **Circuit/Component Properties**.

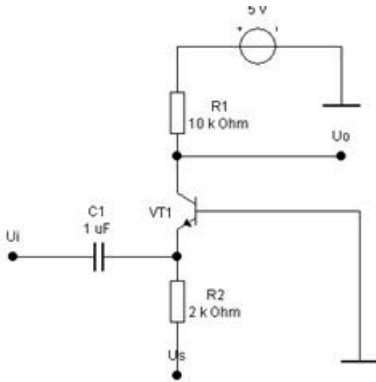
Таблиця 1.1 - Таблиця варіантів

Номер варіанту	Види схем
1	Рис. 1.6 а) і рис. 1.8 б)
2	Рис. 1.6 б) і рис. 1.7 а)
3	Рис. 1.6 в) і рис. 1.7 в)
4	Рис. 1.6 г) і рис. 1.7 б)
5	Рис. 1.7 а) і рис. 1.8 а)
6	Рис. 1.7 б) і рис. 1.6 г)
7	Рис. 1.7 в) і рис. 1.6 в)
8	Рис. 1.7 г) і рис. 1.6 б)
9	Рис. 1.8 а) і рис. 1.7 в)
10	Рис. 1.8 б) і рис. 1.7 г)

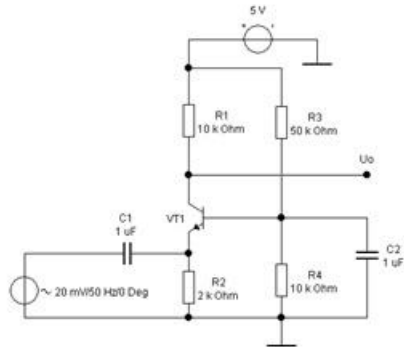
Значення параметрів елемента можна задати командою Value з меню Circuit/Component Properties, або двічі клацнути на елементі лівою кнопкою миші. Для діодів в бібліотеці моделей вибрати ідеальні моделі.

1.3.6 Побудовану схему записати під деяким ім'ям в папку Stud та в папку з номером групи за допомогою команди File/Save As. Рекомендується називати схему за прізвищем виконавця.

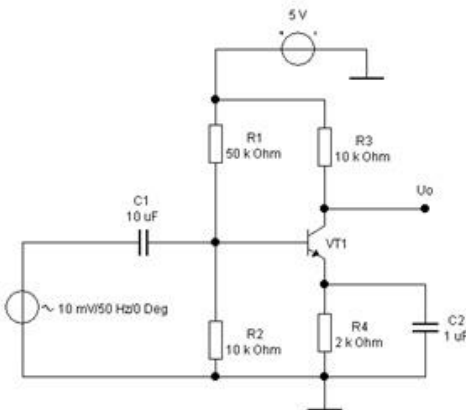
Звітність по роботі - файл зі схемою електричною принциповою відповідно до заданого варіанту.



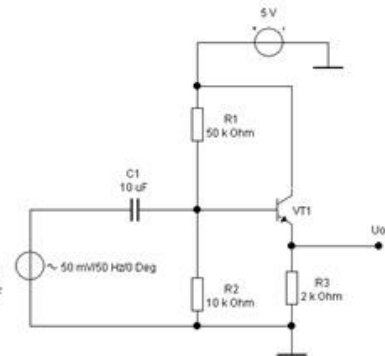
а)



б)



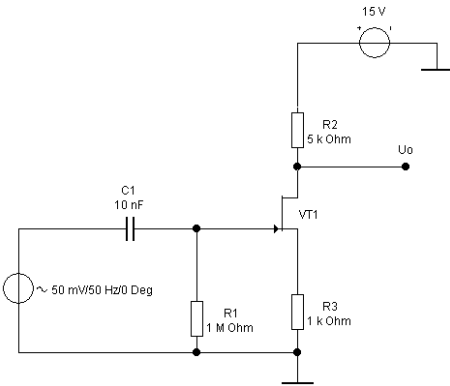
в)



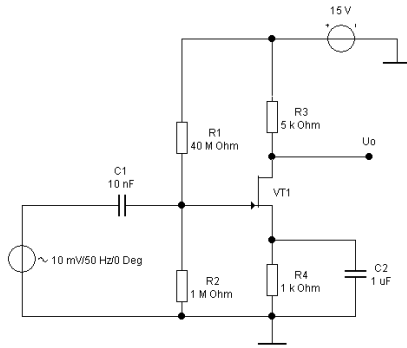
г)

а, б – з загальною базою (ЗБ);
 в – з загальним емітером (ЗЕ);
 г – з загальним колектором (ЗК).

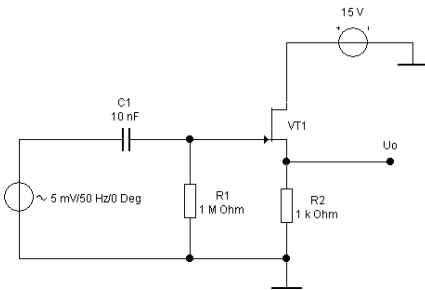
Рисунок 1.6 – Базові підсилювальні каскади на біполярних транзисторах.



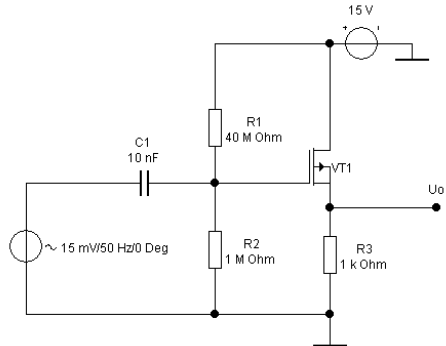
а)



б)



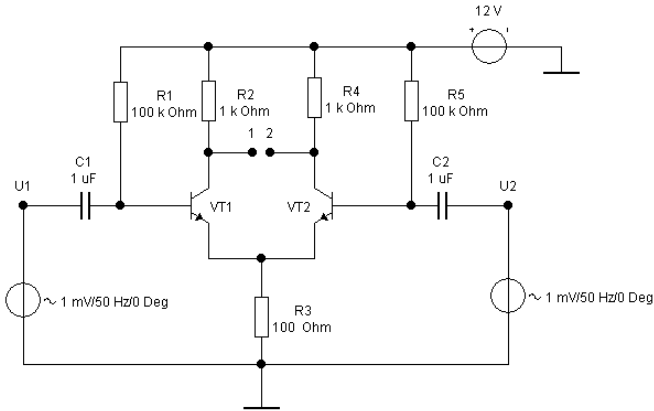
в)



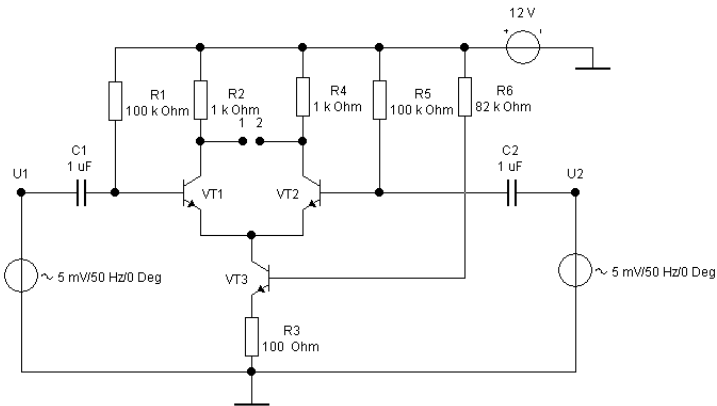
г)

а, б – з загальним витоком (ЗВ);
в, г – з загальним стоком (ЗС).

Рисунок 1.7 – Базові підсилювальні каскади на польових транзисторах



а)



б)

- а) з резистором в емітерному колі;
 б) з стабілізатором струму в емітерному колі.

Рисунок 1.8 – Диференційний підсилювач

1.4 Контрольні запитання

1.4.1 Якою командою можна відновити схему в її первинному вигляді після внесення змін?

1.4.2 Яким чином можна отримати тверду копію схеми та перелік її елементів?

1.4.3 Якою командою можна скопіювати зображення схеми в звіт з лабораторної роботи, який підготовлюється з використанням текстового редактора Word?

1.4.4 Яким чином на схемі позначаються контрольні точки (номера вузлів). Для чого вони потрібні?

1.4.5 Якою командою можна видалити зі схеми позначання номінальних значень компонента або його позиційне позначення?

1.4.6 Якою командою можна змінити колір провідника та для чого це потрібно?

1.4.7 Яким чином можна змінювати шрифт символів та його атрибути?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ У ПРОГРАМІ “ELECTRONICS WORKBENCH”

Мета роботи – ознайомитися з засобами вимірювань в програмі моделювання “Electronics Workbench” і придбати навички з їх використання.

2.1 Теоретичні відомості

2.1.1 Параметри періодичних електричних сигналів

Сигналом називають процес зміни в часі фізичної величини (напруги, струму, швидкості та ін.), який використовується для відображення, реєстрації або передачі інформації.

Математичний опис сигналу являє собою функціональну залежність фізичної величини, в якій аргументом є час - $u(t)$, $i(t)$, $v(t)$ та ін. Наприклад, математичний опис сигналу електричної напруги, що змінюється періодично за гармонічним (синусоїдальним) законом має вигляд:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

У багатьох випадках повний сигнал можна представити у вигляді суми постійної U_+ і змінної $U_{\sim}$ складових, тобто:

$$u(t) = U_+ + U_{\sim}(t) \quad (2.2)$$

При цьому і складові можуть представляти самостійний інтерес для вимірювань.

Часто замість математичного опису сигналу через функціональну залежність користуються тільки числовими параметрами, що дають уявлення лише про окремі властивості сигналу: амплітудною напругою U_m частотою повторення f , тривалістю імпульсу t_i (якщо мова заходить про імпульсні сигнали) та ін.

Усі параметри, за допомогою яких можна охарактеризувати властивості періодичних сигналів електричної напруги, можна умовно розділити на три групи:

- **енергетичні параметри сигналу** - середня напруга U_c , амплітудна напруга U_m , розмах коливань U_{mm} , діюча напруга U_d , середньовипрямлена напруга $U_{св}$;

- **часові і частотні параметри** - період повторення сигналів T , частота повторення f , тривалість імпульсу t_i , тривалість паузи, час наростання імпульсу і час спаду і т.п.;

- **параметри форми сигналу** - коефіцієнт гармонік, коефіцієнти амплітуди, усереднення і форми, шпаруватість і коефіцієнт заповнення - для імпульсних сигналів.

Максимальна (амплітудна, пікова) напруга U_m - параметр сигналу, що являє собою миттєву напругу максимального розміру на інтервалі часу, (частіше розглядається інтервал, рівний періоду повторення сигналів T):

$$U_m = \max u(t) \text{ при } t \in T. \quad (2.3)$$

Розмах сигналу U_{mm} – параметр, що являє собою суму максимальних напруг сигналу обох знаків.

Діюча (ефективна, середньоквадратична) напруга (ДН) U_d - параметр сигналу, що непрямо характеризує потужність сигналу і чисельно рівний середньоквадратичній вольт-секундній площі від квадрата сигналу:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} . \quad (2.4)$$

Для гармонійного сигналу $U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} .$

Шпаруватість (Q) імпульсних коливань характеризує міру їх уривчастості і чисельно дорівнює відношенню періоду проходження імпульсів T до тривалості імпульсу t_i :

$$Q = \frac{T}{t_i} . \quad (2.5)$$

Коефіцієнт заповнення дорівнює :

$$K_3 = \frac{1}{Q} = \frac{t_i}{T} \quad (2.6)$$

Інші параметри імпульсного сигналу представлені на рис. 2.1.

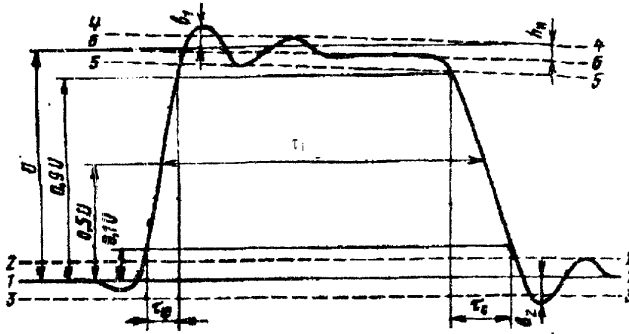


Рисунок 2.1 – До визначення параметрів імпульсного сигналу

- 1-1 – вихідний рівень сигналу в паузі;
- 2-2, 3-3 – нерівномірність початкового рівня в паузі;
- 6-6 – усереднена вершина імпульсу;
- 4-4, 5-5 – нерівномірність вершини імпульсу;
- b_1 – викид на вершині імпульсу;
- b_2 – вибіг після імпульсу;
- h_{11} – нахил вершини імпульсу;
- U – амплітуда імпульсу;
- τ_ϕ – тривалість фронту імпульсу;
- τ_3 – тривалість зрізу імпульсу;
- τ_i – тривалість імпульсу.

Для формування (створення) електричних сигналів використовують генератори різних видів, які є джерелами електричних сигналів з відомими параметрами.

2.1.2 Засоби вимірювань та їх основні параметри

Загальний порядок роботи з засобами вимірювань такий: символ необхідного приладу курсором переноситься з панелі контролю – вимірювальних приладів на робочій стіл і підключається до схеми, що досліджується. Для приведення приладу до робочого стану необхідно двічі натиснути ліву кнопку миші на його символі.

Функціональний генератор (Function Generator) являє собою джерело змінної напруги, що виробляє сигнали синусоїдальної, трикутної та прямокутної форми.

Зовнішній вид лицьової панелі генератора після подвійного натиснення лівої кнопки миші на його символі, наведений на рис.2.2.

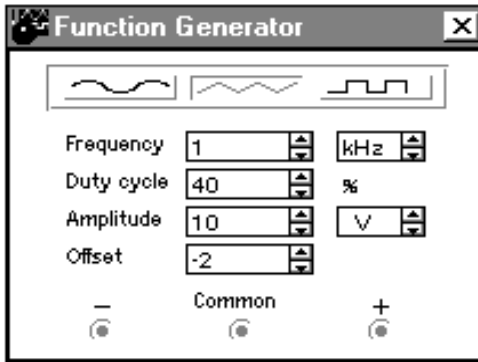


Рисунок 2.2 – Лицьова панель функціонального генератора

Керування генератором здійснюється такими органами:

 вибір форми сигналу: синусоїдальна, трикутна або прямокутна.

Для вибору форми вихідного сигналу необхідно натиснути лівою кнопкою миші на відповідному зображенні. Зміна числових значень вихідних параметрів генератора, а також одиниць вимірювань, здійснюється методом "зміщення миші" у відповідному вікні.

Frequency 1 Hz

- установлення частоти вихідного сигналу. Цей параметр змінюється від 1 до 999 в діапазоні від Гц до МГц.

Duty cycle 50 %

- установлення коефіцієнта заповнення (тільки для трикутних та прямокутних імпульсів). Цей параметр може змінюватися від 1% до 99%. Для прямокутних коливань зміна цього параметра змінює тривалість імпульсу. Для трикутних коливань зміна цього параметра призводить до переміщення піка напруги у часі. Якщо значення цього параметра дорівнює 50%, то час наростання напруги дорівнює часу його спаду.

Amplitude 10 V

- установлення амплітуди вихідного сигналу. Цей параметр змінюється від нульового рівня (рівня постійної складової) до пікового значення. Діапазон числових значень амплітуд складає від 0 до 999 мкВ, мВ, В, кВ.

Offset 0

- установлення зміщення (постійної складової). Параметр **Offset** змінює постійну складову в сигналі - рівень, відносно якого виникають коливання напруги.

Цей параметр може змінюватися від 0% до 100%. Якщо значення цього параметра дорівнює 50 %, то негативні і позитивні напівхвилі напруги знаходяться на однаковій відстані відносно початкового рівня (умовної вісі).

- Common +

- вихідні клеми.

При заземленні клеми **Common** (загальна) на клеммах "+" і "-" формуються протифазні сигнали. Якщо навантаження підключене між клеммами "+" і "-" генератора, то значення вихідної напруги буде дорівнювати подвоєній амплітуді сигналу.

Осцилограф (Oscilloscope) являє собою прилад для візуального спостереження електричних сигналів. Він відображає зміни амплітуди і частоти сигналів, що досліджуються.

Зовнішній вигляд лицьової панелі осцилографа показано на рис 2.3.

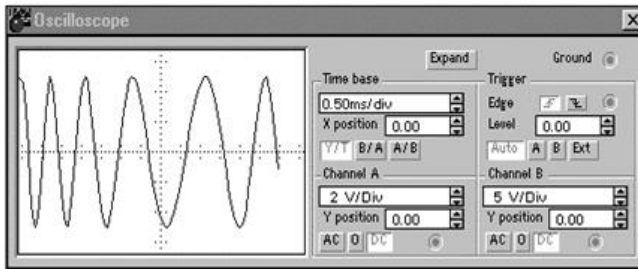


Рисунок 2.3 – Лицьова панель осцилографа

Цей прилад має два вхідних канали (**Channel**) - **A** і **B**, що дозволяє відображати два сигнали в різних точках схеми. Контакти для підключення знаходяться в правому нижньому кутку.

Для того щоб осцилограф показував правильні результати він повинен **обов'язково заземлятися**. Відповідний контакт (**Ground**) знаходиться у правому верхньому кутку на керуючій панелі.

Час розгортки (Time base) - цей параметр задається, щоб встановити часовий масштаб по осі абсцис - кількість секунд на поділку(s/div), та отримати зручні осцилограми сигналів з різною частотою. Значення цього параметра може змінюватися від 0.1 нс до 1 с на поділку (від 1ns/div до 1s/div). Таким чином, якщо ви хочете переглянути один цикл сигналу з частотою 1 кГц, то повинні вибрати час розгортки 0.1 мс/под. Для сигналів з частотою 10 кГц, цей параметр рівний 0.01 мс/под.

Режим Зміщення відліку по горизонталі (X position) дозволяє пересунути точку відліку по осі абсцис. Потрібно пам'ятати, що вертикальний відлік не змінюється при зсуві точки відліку по горизонталі. Якщо значення цього параметра дорівнює 0, початок відліку знаходиться в лівому кутку екрана.

Режим розгортки вибирається кнопками **Y/T** **B/A** **A/B**

В режимі **Y/T** на осцилографі спостерігаються процеси, що являють собою функцією часу. Кнопки **B/A** та **A/B** дозволяють установлювати режими при яких один вхідний сигнал становлюється функцією другого.

Режими синхронізації (Trigger) включають до себе наступні режими.

При дослідженні динамічних процесів ви можете запускати розгортку осцилографа в певні моменти: - під час фронту або зрізу сигналу. Спосіб тактування (фронтом або зрізом) можна вибрати, використовуючи режим **Edge** (фронт) . Тактовий сигнал може бути як внутрішнім, так і зовнішнім. При внутрішньому запуску використовується режим **Auto** (від каналу А або В), **А** – від каналу А, **В** – від каналу В. У разі використання зовнішнього тактового сигналу він повинен подаватися на контакт "Trigger" на лицьовій панелі при натисненні кнопки **Ext** (зовнішній).

Примітка: якщо на екрані осцилографа ви не бачите ніяких сигналів, а вони повинні там бути, перевірте режим "Trigger" - можливо, ви не підключили зовнішню тактуючу ланку, а режим синхронізації використовуєте. Інша причина може полягати в тому, що зміна синхросигнала відбувається в момент, коли немає сигналу на вході.

Можна змінювати значення **Вертикального масштабу** Вольт/под (v/div), щоб отримати зручний розмір сигналу, що досліджується. Значення цього параметру може змінюватися від 10 мкВ/под (10 μ V/Div) до 5 кВ/под (5 kV/Div). Таке регулювання можливе для кожного каналу незалежно. Якщо амплітуда вхідного сигналу рівна 1 В, то необхідно вибрати масштаб 0.5 В/под.

Якщо ви хочете розвести зображення сигналів в каналах А і В на деяку відстань, щоб порівняти їх параметри, необхідно використати режим **Зміщення по вертикалі (Y position)**. Таке зміщення можливе для кожного каналу окремо.

Режими АС/0/DC включають до себе наступні режими.

Кожний канал може бути перемкнений у відповідний режим. Це дозволяє відображати тільки змінну складову сигналу (режим **АС**) або суму змінної і постійної складових (режим **DC**). Виберіть режим "DC", щоб переглядати сигнал таким, яким він є. У режимі «0» вхід осцилографа підключається до точки нульового потенціалу.

Клацнувши лівою кнопкою миші на кнопці **Expand**, ви можете збільшити розмір екрана осцилографа (рис.2.4). Цей режим використовується для вимірювань параметрів сигналів (амплітуди, тривалості імпульсів, періоду) за допомогою візирних ліній (двох вертикальних ліній червоного і синього кольорів, які переміщуються

по екрану за допомогою лівої кнопки миші). При цьому в індикаторних вікнах під екраном наводяться результати вимірювань напруг, часових інтервалів (між візирними лініями).

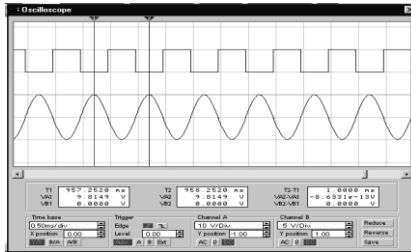


Рисунок 2.4 – Лицьова панель осцилографа в режимі Expand

Лицьова панель **Мультиметра (Multimeter)** зображена на рис 2.5.



Рисунок 2.5 – Лицьова панель мультиметра.

На лицьовій панелі мультиметра (рис. 2.5) розташований дисплей для відображення результатів вимірювання, клема для підключення до схеми і кнопки керування:



- вибір режиму вимірювання струму, напруги, опору та ослаблення (загасання);



- вибір режиму вимірювання змінного або постійного струму;



- режим встановлення параметрів мультиметра.

Після натиснення на цю кнопку відкривається діалогове вікно (рис. 2.6), в якому визначені такі параметри:

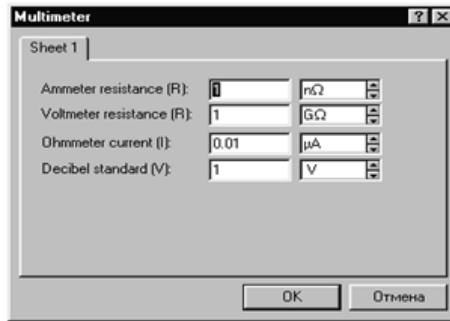


Рисунок 2.6 – Вікно режимів мультиметра.

- Ammeter resistance – внутрішній опір амперметра;
- Voltmeter resistance – вхідний опір вольтметра;
- Ohmmeter current – струм через об'єкт, що контролюється;
- Decibel standard – установка еталонної напруги V_1 при вимірюванні ослаблення або підсилювання в децибелах (за умовчанням $V_1 = 1$ В).

При цьому для визначення коефіцієнта передачі використовується формула:

$$K [\text{дБ}] = 20 \lg (V_2/V_1),$$

де V_2 – напруга в точці, що контролюється.

Наведемо приклад використання мультиметра в режимі dВ. Передбачимо, що необхідно виміряти коефіцієнт передачі аудіопідсилювача на частоті 20 кГц. Для цього до його входу підключимо джерело змінної синусоїдальної напруги частотою 20 кГц і значенням напруги $V_1 = 1$ В, а до виходу мультиметр.

Передбачимо далі, що в режимі вимірювання напруги отримана величина вихідної напруги $V_2 = 100$ В. Отже, коефіцієнт передачі підсилювача $K = V_2/V_1 = 100$ В. Переведемо мультиметр в режим dВ, тоді знайдемо значення коефіцієнта підсилення в децибел $K[\text{дБ}] = 20 \lg 100 = 40$ дБ. Передбачимо далі, що частота вхідного сигналу збільшена до 100 кГц і отримана напруга на виході підсилювача $V_2 = 0,1$ В, тобто коефіцієнт передачі в цьому випадку складає $K = 0,1/1 = 0,1$. В режимі dВ мультиметр покаже $K [\text{дБ}] = 20 \lg 0,1 = -20$ дБ.

Відмітимо, що мультиметр вимірює ефективне (діюче) значення змінного струму.

Вимірювач АЧХ та ФЧХ (Bode Plotter) призначений для аналізу амплитудно-частотних (при натисненій кнопці MAGNITUDE, включена за умовчанням) і фазо-частотних (при натисненій кнопці PHASE) характеристик при логарифмічній (кнопка LOG, включена за умовчанням) або лінійній (кнопка LIN) шкалі по осях Y (VERTICAL) і X (HORIZONTAL). Лицьова панель вимірювач АЧХ та ФЧХ показана на рис. 2.7.

Настройка вимірювача полягає у виборі меж вимірювання коефіцієнта передачі і варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях F(Final) максимальне і I(Initial) мінімальне значення. Значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта передачі або фази відображається у віконцях в правому нижньому кутку вимірювача. Значення вказаних величин в окремих точках АЧХ або ФЧХ можна отримати за допомогою вертикальної визирної лінії, що знаходиться в початковому стані на початку координат і переміщуваною по графіку мишею або кнопками ←, →. Результати вимірювання можна записати також в текстовий файл. Для цього необхідно натиснути кнопку SAVE і в діалоговому вікні вказати ім'я файла (за умовчанням пропонується ім'я схемного файла). У отриманому таким чином текстовому файлі з розширенням. bod АЧХ і ФЧХ представляються в табличному вигляді.

Підключення приладу до схеми, що досліджується, здійснюється за допомогою затискачів IN (вхід) і OUT (вихід). Ліві затискачі підключаються відповідно до входу і виходу пристрою, що досліджується, а праві до загальної шини. До входу пристрою необхідно підключити функціональний генератор або інше джерело змінної напруги, при цьому налаштовувати ці прилади не потрібно.

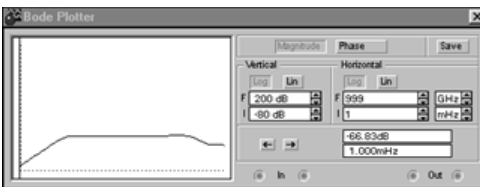


Рисунок 2.7 – Лицьова панель вимірювач АЧХ та ФЧХ

2.2 Підготовка до роботи

2.2.1 Користуючись рекомендованою літературою і даними методичними вказівками, вивчити: основні параметри імпульсних і гармонічних сигналів; роботу функціонального генератора, осцилографа, мультиметра та вимірювача АЧХ і ФЧХ.

2.2.2 Відповісти на контрольні питання.

2.2.3 Відповідно до заданого варіанту (табл. 2.1) підготувати протокол результатів дослідження (табл. 2.2).

2.3 Порядок виконання роботи

2.3.1 Зберіть на робочому столі EWB схему у відповідності з рис. 2.8, використовуючи джерело напруги гармонічних сигналів і осцилограф.

2.3.2 Встановіть параметри джерела сигналів відповідно до заданого варіанту (табл. 2.1).

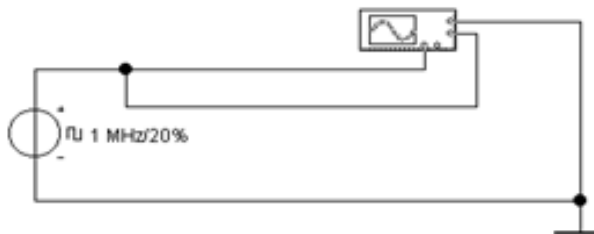


Рисунок 2.8 – Схема вимірювань

2.3.3 Отримайте на екрані осцилографа стійке зображення сигналу.

2.3.4 Проведіть вимірювання періоду гармонічних коливань і їх амплітудної напруги. Результати вимірювань, значення параметрів осцилограми і органів керування осцилографа внесіть в протокол (табл. 2.2).

2.3.5 Замініть в схемі рис. 2.8 джерело гармонічних сигналів на джерело напруги імпульсних сигналів і встановіть параметри джерела сигналів відповідно до заданого варіанту (табл.2.1.).

2.3.6 Отримайте на екрані осцилографа стійке зображення імпульсного сигналу.

2.3.7 Проведіть вимірювання періоду проходження імпульсів, тривалості імпульсів і занесіть результати вимірювань, параметри осцилограми і органів керування осцилографа в протокол (табл.2.2).

2.3.8 Навперемінно активізуючи кнопки AC і DC на лицьовій панелі осцилографа, прослідіть за зміною положення осцилограми. Поясніть причини змін осцилограми.

2.3.9 Зберіть на робочому столі схему у відповідності з рис. 2.9, використовуючи мультиметр та вимірювач АЧХ та ФЧХ.

2.3.10. Отримайте на екрані вимірювача зображення АЧХ та ФЧХ підсилювача, що досліджується (рис. 2.9).

2.3.11. Проведіть вимірювання постійної напруги на колекторі транзистора схеми рис. 2.9.

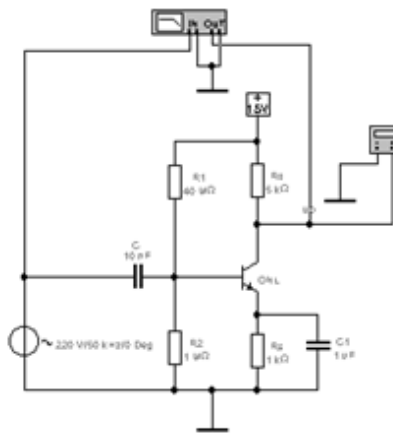


Рисунок 2.9 – Схема з'єднань з використанням мультиметра та вимірника АЧХ і ФЧХ

Таблиця 2.1 – Таблиця варіантів

№ в-та	Параметри джерела гармонічних сигналів		Параметри джерела імпульсних сигналів		
	Діюча напруга (В)	Частота (кГц)	Частота (МГц)	Коефіцієнт заповнення (D, %)	Амплітуда (V,B)
1	1,0	33	0,1	33	2,5
2	1,4	10	1,0	20	1,5
3	2,5	50	0,2	25	3,5
4	3,0	40	4,0	40	4,5
5	4,0	75	10,0	15	5,0
6	4,5	20	20,0	60	6,0
7	5,0	100	5,0	70	3,0
8	6,0	200	2,0	10	4,0
9	7,0	400	3,0	20	10,0
10	10,0	500	0,5	50	1,5

Таблиця 2.2 – Результати спостережень

Джерело сигнала	Вимірюваний параметр	Од. вим.	Результати спостережень	Умови вимірювань
Гармонічний	Амплітудна напруга, U_a	В		$h_y=$, $k_y=$
	Період коливань, Т	мкс		$l_x=$, $k_x=$
Імпульсний	Період коливань, Т	мкс		$l_x=$, $k_x=$
	Тривалість імпульса, $t_{и}$	мкс		$l_x=$, $k_x=$
	Амплітуда імпульса, U_a	В		$h_y=$, $k_y=$

2.4 Зміст звіту

2.4.1 Мета роботи.

2.4.2 Схеми вимірювань.

2.4.3 Результати досліджень у вигляді табл. 3.2 і графіки АЧХ та ФЧХ з екрану вимірювач АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter).

2.4.4 Висновки за призначенням засобів вимірювання.

2.5 Контрольні запитання

2.5.1 Перерахуйте види засобів вимірювання, що використовуються в програмі моделювання "Electronics Workbench".

2.5.2 Охарактеризуйте призначення джерел сигналів з бункера "Sources" і назвіть їх різновиди.

2.5.3 Перерахуйте основні параметри гармонічного сигналу.

2.5.4 Перерахуйте основні параметри імпульсного сигналу.

2.5.5 Охарактеризуйте призначення функціонального генератора і укажіть його відмінності від джерел напруги з бункера "Sources".

2.5.6 Охарактеризуйте сфери застосування електронного осцилографа.

2.5.7 Поясніть призначення і область застосування зовнішнього запуску (вхід "Ext").

2.5.8 Виходячи з яких міркувань встановлюють на лицьовій панелі осцилографа значення параметра "Time base"?

2.5.9 Виходячи з яких міркувань встановлюють на лицьовій панелі осцилографа значення коефіцієнта відхилення (V/div)?

2.5.10 Як зміниться положення імпульсного сигналу на екрані осцилографа, якщо сигнальний вхід осцилографа перемкнути з положення "DC" в положення "AC"?

2.5.11 Призначення мультиметра.

2.5.12 Призначення вимірювача АЧХ та ФЧХ.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. ФІЛЬТРИ

Мета роботи – вивчити принципи побудови, конструкції та дослідити основні параметри та характеристики електричних фільтрів з використанням програми моделювання "Electronics Workbench".

3.1 Теоретичні відомості

3.1.1 Основні параметри та характеристики фільтрів

Електричним фільтром називається пристрій, в якому із спектра поданих на його вхід електричних коливань виділяються (пропускаються на вихід) складові, розташовані в заданій смузі частот та подаються (не пропускаються) усі інші складові.

Електричні фільтри використовуються в системах багатоканального зв'язку, радіопристроях, пристроях автоматики, вимірювальній та обчислювальній техніці тощо – усюди, де передаються електричні сигнали при наявності інших сигналів, що заважають та відрізняються від корисних за частотним складом. Фільтри застосовуються також у випрямлячах пристроїв живлення РЕА для згладжування пульсацій випрямленого струму.

Основними параметрами фільтрів є:

- смуга пропускання;
- смуга загородження;
- частота зрізу;
- згасання в смузі пропускання;
- згасання в смузі загородження;
- крутизна частотної характеристики згасання (коефіцієнт прямокутності);
- хвильовий (характеристичний) опір.

Селективні властивості фільтра характеризуються його передаточною функцією або амплітудно-частотною (АЧХ) та фазочастотною (ФАХ) характеристиками.

Для оцінки вибіркового властивостей фільтра також застосовується частотна характеристика згасання:

$$\alpha(f) = 20 \lg \frac{1}{K_U}, \text{ дБ}, \quad (3.1)$$

де $K_U = \frac{U_{ВНХ}}{U_{ВХ}}$ - коефіцієнт передачі напруги.

Згасання, як характеристика більш зручна для завдання технічних вимог до фільтра. При аналітичному дослідженні фільтрів перевага віддається передаточній функції (АЧХ та ФЧХ).

За виглядом частотної характеристики згасання (пропускання) електричні фільтри підрозділяються на:

- фільтри нижніх частот (ФНЧ), що пропускають коливання з частотами не вище деякої граничної $f_{п}$ та подавляють коливання з частотами вище $f_з$ (рис. 3. 1, а);
- фільтри верхніх частот (ФВЧ), що пропускають коливання з частотами вище деякої граничної $f_{п}$ та подавляють коливання з частотами нижче $f_з$ (рис. 3. 1, б);
- смуго–пропускаючі фільтри (СПФ) або смугові, що пропускають коливання тільки в заданому інтервалі частот від $f_{п'}$ до $f_{п''}$ (рис. 3.1, в);
- смуго–загороджуючі фільтри (СЗФ) або режекторні фільтри (РФ), що подавляють коливання тільки в заданому інтервалі частот від $f_{з'}$ до $f_{з''}$ (рис. 3. 1, г).

Чим більше згасання в смузі загородження $\alpha_з$ та менше у смузі пропускання $\alpha_{п}$, тим сильніше виражені селективні властивості фільтра.

Смуга пропускання (СП) та загородження (СЗ) (рис. 3. 1) розділяються перехідною смугою, в якій згасання змінюється від значень, допустимих в СП $\alpha_{п}$, до значень, що вимагаються в СЗ $\alpha_з$.

Частоту, що розділяє СП та перехідну смугу називають частотою зрізу СП $f_{п}$, а частоту, що розділяє СЗ та перехідну смугу називають частотою зрізу СЗ $f_з$.

При проектуванні фільтрів задаються параметрами частотної характеристики згасання. Такими параметрами для ФНЧ та ФВЧ є

максимально допустиме згасання в смузі пропускання α_{Π} , мінімально допустиме згасання в смузі загородження α_3 та частоти зрізу f_{Π} та f_3 .

Замість двох частот зрізу зручніше задавати одну f_{Π} та відносну ширину перехідної смуги для ФНЧ та ФВЧ відповідно:

$$\Omega_1 = f_3 / f_{\Pi}; \Omega_1 = f_{\Pi} / f_3. \quad (3.2)$$

При проектуванні СПФ та СЗФ окрім параметрів α_{Π} та α_3 задають чотири частоти зрізу: $f_{\Pi}', f_{\Pi}'', f_3', f_3''$ (рис. 3. 1 в, з).

Середня частота фільтра з арифметичною симетрією визначається виразом:

$$f_0 = (f_{\Pi}' + f_{\Pi}'')/2 = (f_3' + f_3'')/2, \quad (3.3)$$

а з геометричною симетрією:

$$f_0 = \sqrt{f_{\Pi}' f_{\Pi}''} = \sqrt{f_3' f_3''}. \quad (3.4)$$

Технічні вимоги до СПФ та СЗФ із симетричними частотними характеристиками згасання можна задати середньою частотою f_0 , добротністю:

$$Q = f_0 / \Delta f \quad (3.5)$$

та коефіцієнтом прямокутності, що характеризує відносну ширину перехідних смуг для СПФ та СЗФ відповідно:

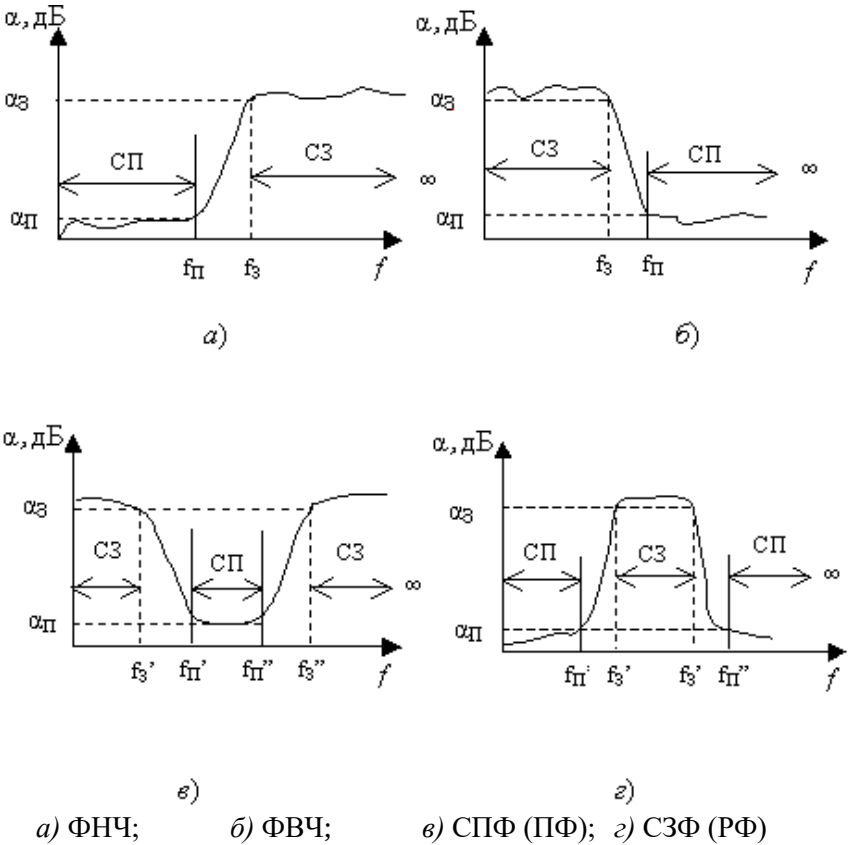
$$K_{\Pi} = (f_{\Pi}'' - f_{\Pi}') / (f_3'' - f_3'); K_{\Pi} = (f_3'' - f_3') / (f_{\Pi}'' - f_{\Pi}'). \quad (3.6)$$

Тут Δf – ширина СП для СПФ ($\Delta f = f_{\Pi}'' - f_{\Pi}'$) або ширина СЗ для СЗФ ($\Delta f = f_3'' - f_3'$) (рис. 1. 1 в, з).

Важливим параметром фільтра є його характеристичний опір:

$$\rho = \sqrt{L/C}, \text{ Ом,} \quad (3.7)$$

де L – індуктивність ланки фільтру, Гн;
 C – ємність ланки фільтру, Ф.



СП – смуга пропускання; СЗ – смуга загородження;
 $\alpha_П$ – згасання в смузі пропускання;
 $\alpha_З$ – згасання в смузі загородження;

Рисунок 3. 1 – Частотні характеристики згасання фільтрів

Якщо опір навантаження та характеристичний опір фільтра дорівнюють один одному, то фільтр буде узгодженим та його електричні параметри будуть відповідати розрахунковим.

На практиці неможливо отримати узгодження фільтра на всій смузі використовуваних частот, із-за залежності характеристичного опору від частоти. Неможливість узгодження у смузі частот значно погіршує параметри фільтра: згасання в смузі пропускання не дорівнює нулю, а в смузі загородження менше, ніж у випадку узгодження.

3.1.2 Класифікація електричних фільтрів

Сучасні електричні фільтри підрозділяються на пасивні та активні. Пасивні фільтри містять тільки пасивні R-, L-, C-елементи. Активні фільтри крім R-, L-, C-елементів містять активні електронні прибори: лампи, транзистори, підсилювачі тощо.

Широке розповсюдження отримали активні RC-фільтри з використанням операційних підсилювачів.

За видом елементів, із яких побудований фільтр, розрізняють електричні, електротеплові, п'єзоелектричні та електромеханічні фільтри.

За видом алгебраїчного полінома, що апроксимує передаточну функцію фільтра, розрізняють фільтри Баттерворта, Чебишева, Золотарьова, Бесселя та інші.

Частотні характеристики фільтрів Баттерворта та Чебишева наведені на рис. 3.2.

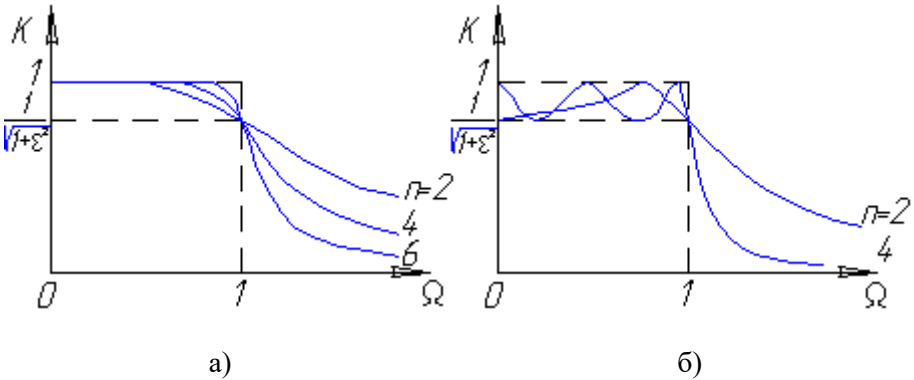
Фільтри Баттерворта. Ці фільтри характеризуються максимально плоскою АЧХ в смузі пропускання. Але мають малу крутизну АЧХ в перехідній смузі частот. АЧХ фільтра Баттерворта (рис. 3.2, а) описується виразом:

$$K(\varpi) = 1 / \sqrt{1 + \varepsilon^2 \Omega^{2n}}, \quad (3.8)$$

де $\Omega = \frac{\varpi}{\omega_{\Pi}}$ – нормована частота;

$\varepsilon^2 = 10^{0,1\alpha_{\Pi}} - 1$ – амплітудний множник, що визначає максимальне згасання α_{Π} на межі смуги пропускання.

n – порядок фільтра (число ланок фільтра).



а) фільтр Баттерворта; б) фільтр Чебишева

Рисунок 3.2 – Частотні характеристики ФНЧ

Фільтри Чебишева. Ці фільтри забезпечують найбільшу крутизну АЧХ в перехідній смузі частот. Але АЧХ в смузі пропускання має коливальний характер. АЧХ фільтра Чебишева (рис. 3.2, б) описується виразом:

$$K(\varpi) = 1 / \sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)}, \quad (3.9)$$

де ε – коефіцієнт нерівномірності АЧХ в смузі пропускання;

$T_n(\Omega)$ – поліном Чебишева першого роду n -го порядку:

$T_n(\Omega) = \cos(n \arccos \Omega)$ при $\Omega \leq 1$;

$T_n(\Omega) = \operatorname{ch}(n \operatorname{arcch} \Omega)$ при $\Omega > 1$,

n – порядок фільтра;

$\Omega = \frac{\varpi}{\omega_{\Pi}}$ – нормована частота.

Фільтри Золотарьова. Передаточна функція цих фільтрів описується дробами Золотарьова. В цьому випадку порядок фільтра та його складність являються мінімальними.

Фільтри Бесселя. Передаточна функція цих фільтрів описується поліномом Бесселя. Ці фільтри мають лінійну ФЧХ в смузі пропускання та максимально плоску перехідну характеристику. Це особливо важливо, коли фільтр призначений для передачі імпульсних сигналів, наприклад, коли він використовується як лінії затримки. В цьому випадку необхідно, щоб колювання з різними частотами запізнювалися однаково. Затримка сигналу не залежить від частоти, якщо ФЧХ фільтра лінійна.

В радіотехніці найбільше розповсюдження отримали фільтри Баттерворта та Чебишева.

3.1.3 Конструкції фільтрів

В діапазоні від одиниць Гц до десятків кГц найбільш часто використовуються пасивні або активні RC-фільтри, виконані на дискретних резисторах та конденсаторах. В діапазоні частот від одиниць кГц до десятків МГц одержали поширення LC-фільтри на дискретних елементах.

Принцип роботи LC- та RC-фільтрів оснований на використанні залежності реактивного опору ємності та індуктивності від частоти електричного сигналу.

Для фільтрації сигналів, частота яких складає доли Гц, служать електротеплові фільтри (ЕТФ).

Конструкція ЕТФ представляє собою стрижень із джерелом тепла та термоелектричним перетворювачем.

Електромеханічні фільтри виконуються на основі дискових, циліндричних, пластинчатих та камертонних резонаторів. В таких конструкціях фільтрів використовується явище механічного резонансу. Електромеханічні фільтри використовуються в діапазоні від декількох Гц до 1 МГц.

Високі фільтруючі властивості мають п'єзоелектричні СПФ та СЗФ. Матеріалом для їх виготовлення є п'єзокварц або п'єзокераміка.

П'єзокварцові фільтри виконуються на дискретних елементах – кварцових резонаторах у поєднанні з котушками індуктивності та конденсаторами. Використовуються також монолітні

багаторезонаторні п'єзокварцові фільтри. В таких конструкціях зв'язок між резонаторами здійснюється за допомогою акустичних хвиль – об'ємних (для фільтрів, застосовуваних в діапазоні від декількох МГц до десятків МГц) або поверхневих (в діапазоні від декількох МГц до 1-2 ГГц).

В техніці надвисоких частот (НВЧ) електричні фільтри реалізують на відрізках довгих ліній (хвильоводних, коаксіальних та смужкових), що являють собою коливальні системи (резонатори) з розподіленими параметрами.

В діапазоні 100 МГц – 10 ГГц використовують гребінчасті, шпилькові, зустрічноштирькові, східчасті конструкції електричних фільтрів.

Конструктор, що проектує фільтри, повинен знати, що конструкція фільтра, технологія його виготовлення, а також принцип роботи визначається робочим діапазоном частот та необхідним видом частотної характеристики згасання.

3.1.4 LC-фільтри

LC-фільтри підрозділяються на фільтри типа К та типа m. Перевагою фільтрів типа К є безперервне зростання згасання в смузі загородження та простота схеми.

Найбільш простими є Г-подібні півланки. Але для отримання більшого згасання та симетрії схеми застосовуються також Т-подібні та П-подібні ланки. Схеми та розрахункові формули для LC-фільтрів типа К наведені в таблицях 3.1, 3.2. Графік для розрахунку згасання в смузі загородження ланок фільтра наведений на рис. 3.3.

АЧХ і ФЧХ LC-фільтрів нижніх частот описуються виразами:

$$K(f) = \frac{1}{\operatorname{arccch} \left| 1 - 2 \frac{f^2}{f_{\Pi}^2} \right|}, \quad (3.10)$$

$$\varphi(f) = \arccos \left| 1 - 2 \frac{f^2}{f_{\Pi}^2} \right|. \quad (3.11)$$

До недоліків LC-фільтрів типа К слід віднести малу крутизну частотної характеристики згасання та залежність хвильового опору фільтра від частоти. Ці недоліки можна усунути, якщо застосувати більш складні схеми LC-фільтрів – фільтри типа m . Частотна характеристика згасання в цих фільтрах має велику крутизну, згасання на певних частотах досягає великого значення, після чого зменшується. Ці частоти називаються частотами нескінченного згасання. Схеми та розрахункові формули для LC- фільтрів типа m наведені в таблиці 3.3.

До недоліків LC-фільтрів взагалі треба віднести: їх низьку технологічність, необхідність екранування котушок, на низьких частотах розміри та маса котушок індуктивності стають значними.

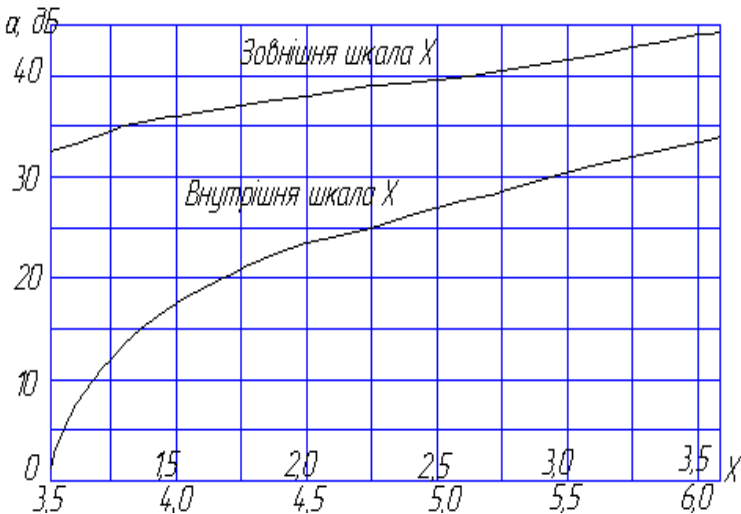


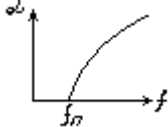
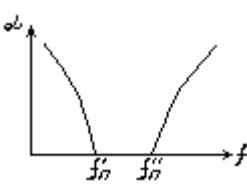
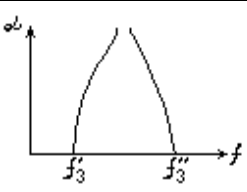
Рисунок 3.3 – Графік для розрахунку згасання в смузі загородження ланок фільтрів типа К

Таблиця 3. 1 – Схеми та розрахункові формули для LC-фільтрів типа К

Тип фільтра	Схеми фільтрів		
	Г-подібна ланка	Т-подібна ланка	П-подібна ланка
ФНЧ			
ФВЧ			
СПФ			
СЗФ			

$$\Delta f = f''_n - f'_n = f''_3 - f'_3; f_0 = \sqrt{f'_n f''_n} = \sqrt{f'_3 f''_3}; \eta = \frac{f^2 - f_0^2}{\Delta f f}$$

Таблиця 3. 2 – Характеристики згасання та розрахункові формули для LC- фільтрів типа К

Характеристики згасання	Розрахункові формули $L, \text{мГн}; C, \text{мкФ}; R_H, \text{Ом}; f, \text{кГц}.$	X
	$L = \frac{0.32R_H}{f_n}; C = \frac{320}{R_H f_n}$	$\frac{f}{f_n}$
	$L = \frac{0.08R_H}{f_n}; C = \frac{80}{R_H f_n}$	$\frac{f_n}{f}$
	$L_1 = \frac{0.32R_H}{\Delta f}; L_2 = \frac{0.08\Delta f R_H}{f_n' f_n''}$ $C_1 = \frac{80\Delta f}{R_H f_n' f_n''}; C_2 = \frac{320}{R_H \Delta f}$	η
	$L_1 = \frac{0.32R_H \Delta f}{f_3' f_3''}; L_2 = \frac{0.08R_H}{\Delta f}$ $C_1 = \frac{80}{\Delta f R_H}; C_2 = \frac{320\Delta f}{R_H f_3' f_3''}$	$\frac{1}{\eta}$

3.1.5 Вплив конструкції LC-фільтра на його електричні параметри

Конструкція LC-фільтра в значній мірі впливає на його електричні параметри.

При проектуванні LC-фільтрів конструктор повинен дотримуватися наступних правил:

- з'єднувальні провідники повинні бути по можливості коротші та приєднані до корпусу (екрана) в найближчій точці;
- котушки індуктивності повинні виконуватися на тороїдальних або броньових осердях та мати мінімальну власну ємність;
- для зменшення індуктивного зв'язку між котушками фільтра, працюючого в області високих частот ($f > 10$ кГц) їх необхідно розносити та розташовувати перпендикулярно одна відносно іншої;
- значне зменшення індуктивного та ємнісного зв'язків між елементами фільтра досягається використанням екранів.

3.1.6 Пасивні RC-фільтри

Селективні властивості RC-фільтрів на відміну від фільтрів, що містять індуктивності, обумовлені тільки залежністю від частоти ємнісного опору конденсатора.

До переваг пасивних RC-фільтрів відносяться простота конструкції, низька вартість, нечутливість до магнітних полів, можливість побудови малогабаритних схем для самих низьких частот тільки за рахунок збільшення номіналів резисторів.

До недоліків пасивних RC-фільтрів слід віднести великі втрати енергії у резисторах. З цієї причини селективність RC-фільтрів гірша, ніж LC-фільтрів.

Тому на практиці пасивні RC-фільтри використовуються в ролі частотнозалежного елемента активного фільтра, складовою частиною якого є підсилювач, компенсуючий внесені RC-колом згасання.

Основними характеристиками RC-фільтра є його АЧХ та ФЧХ. Для фільтра нижніх частот вони описуються виразами:

$$K(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_1)^2}}, \quad K(f) = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_1)^2}}, \text{ дБ} \quad (3.12)$$

$$\varphi(f) = -\arctg(f/f_1), \quad (3.13)$$

де $f_1 = 1/2\pi RC$ - частота зрізу ФНЧ.

Перехідна область між смугою пропускання та смугою загородження характеризується частотою зрізу f_1 , на який коефіцієнт передачі напруги RC-фільтра зменшується в $\sqrt{2}$ рази (на -3 дБ)

порівняно з максимальним значенням, та частотою f_2 , на якій коефіцієнт передачі RC-фільтра зменшується у певне число разів, наприклад у 10, порівняно з його значенням у смузі пропускання.

Селективність смуго–пропускаючого та смуго–загороджуючого RC-фільтрів характеризується добротністю:

$$Q = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (3.14)$$

де f_0 – частота, на якій коефіцієнт передачі напруги RC-фільтра досягає максимального або мінімального значення K_0 ;

f_1 і f_2 – граничні частоти, на яких коефіцієнт передачі напруги зменшується в $\sqrt{2}$ рази порівняно з максимальним значенням.

Схеми та розрахункові формули пасивних RC-фільтрів наведені в таблиці 3.4.

3.1.7 Активні RC-фільтри

На частотах нижче 100 кГц у LC-фільтрах потрібні великі індуктивності, які за своїми розмірами значно перевищують інтегральні мікросхеми.

Електромеханічні та п'єзоелектричні фільтри на цих частотах також виходять великими. Тому на частотах нижче 100 кГц широке застосування знаходять активні RC-фільтри, що представляють собою підсилювач охоплений частотнозалежним від'ємним зворотнім зв'язком.

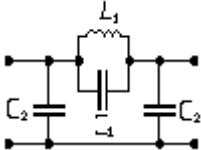
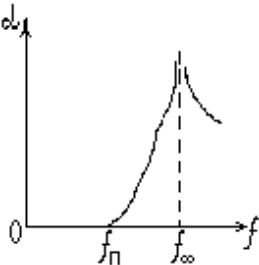
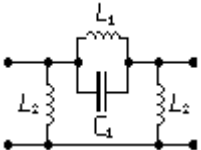
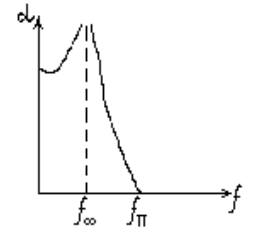
У схемах активних RC-фільтрів широко використовуються операційні підсилювачі.

Схеми та розрахункові формули активних фільтрів Баттерворта (другого порядку) наведені в таблиці 3.5.

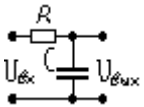
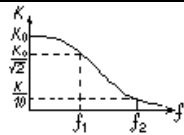
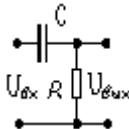
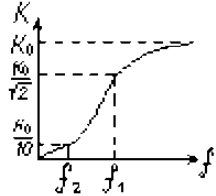
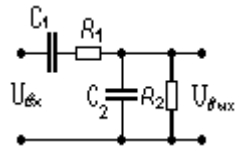
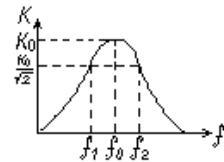
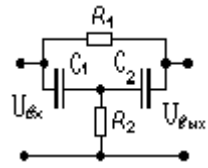
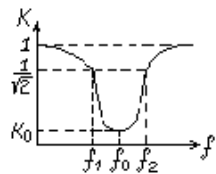
Перевагами активних RC-фільтрів є:

- здатність підсилювати сигнал, що лежить в смузі пропускання;
- малі маса та габарити, які слабо залежать від смуги пропускання, що особливо важливо при розробці пристроїв, працюючих у низькочастотній області;
- простота каскадного з'єднання при побудові фільтрів високих порядків.

Таблиця 3.3 – Схеми та розрахункові формули для LC-фільтрів типа m

Тип фільт- ра	Схема фільтра	Характеристика згасання	Розрахункові формули	
			m	L, мГн; C, мкФ; f, кГц; R _H , Ом
ФНЧ			$\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\Pi}}{f_{\infty}}\right)^2}$	$L_1 = \frac{0.32mR_H}{f_{\Pi}}$ $C_1 = \frac{80(1-m^2)}{mf_{\Pi}R_H}$ $C_2 = \frac{160m}{f_{\Pi}R_H}$
ФВЧ			$\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\infty}}{f_{\Pi}}\right)^2}$	$L_1 = \frac{0.32mR_H}{(1-m^2)f_{\Pi}}$ $L_2 = \frac{0.16R_H}{f_{\Pi}m}$ $C_1 = \frac{80}{mf_{\Pi}R_H}$

Таблиця 3.4 – Схеми та розрахункові формули для RC-фільтрів

Тип філь- тра	Назва	Схема	АЧХ	Розрахункові формули R, кОм; C, мкФ; f, Гц
ФНЧ	однолан- ковий			$f_1 = \frac{160}{RC}, \frac{f_2}{f_1} = 10$
ФВЧ	однолан- ковий			$f_1 = \frac{160}{RC}, \frac{f_1}{f_2} = 10$
СПФ	Г-подібне RC-коло			$R_2 = R; C_2 = C; R_1 = mR$ $C_1 = \frac{C}{m}; f_0 = \frac{16}{RC};$ $K_0 = \frac{1}{1+2m}; Q = \frac{m}{1+2m}$
СЗФ	Т- подібний RC-міст			$C_1 = C_2 = C; R_1 = R$ $R_2 = \frac{R}{m}; f_0 = \frac{1}{\sqrt{m}} \cdot \frac{160}{RC};$ $K_0 = \frac{2}{2+m}; Q = \frac{\sqrt{m}}{2+m}$

До недоліків активних RC-фільтрів слід віднести:

- неможливість використання у силових колах, наприклад, у ролі фільтрів випрямлячів джерел живлення РЕА;
- потреба у джерелі живлення для підсилювача;
- обмежений частотний діапазон, що визначається частотними властивостями підсилювачів, які використовуються.

Таблиця 3.5 – Схеми та розрахункові формули для фільтрів Баттерворта

Тип фільтра	Схема	Розрахункові формули R, кОм; C, мкФ; f, Гц
ФНЧ		$R_1=R_2=R$ вибираємо підходящий номінал в діапазоні (10-100) кОм, $R_{OC}=2R$, $\omega_3=2\pi f_3$, $C_1 \approx 0,707/\omega_3 R$, $C_2=2C_1$
ФВЧ		$C_1=C_2=C$ вибираємо підходящий номінал, $R_{OC}=R_1$, $R_1=\sqrt{2}/\omega_3 C$, $R_2=0,5R_1$
СПФ		$C_1=C_2=C$ вибираємо підходящий номінал, $R_2=2Q/\omega_3 C$, $R_1=R_2/2K_0$, $R_{OC}=R_2/(4Q^2-2K_0)$
СЗФ		$C_1=C_2=C$ вибираємо підходящий номінал, $R_2=2Q/\omega_3 C$, $R_1=R_2/4Q^2$, $R_a=(1-2)$ кОм, $R_b=2Q^2 R_a$

3.2 Підготовка до роботи

3.2.1 Користуючись рекомендованою літературою та даними методичними вказівками, вивчити принцип побудови, конструкції та основні параметри і характеристики фільтрів.

3.2.2 Відповісти на контрольні запитання.

3.2.3 Розрахувати параметри елементів LC-фільтра типа к нижніх та верхніх частот, використовуючи формули наведені у табл. 3.1. Вихідними даними для розрахунку є гранична частота f_{Π} (частота зрізу) та опір навантаження R_H . Результати розрахунку занести до табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків параметрів елементів LC-фільтра

№ варіан- ту	ФНЧ				ФВЧ			
	f_{Π} , Гц	R_H , Ом	L , мГн	C , мкФ	f_{Π} , кГц	R_H , Ом	L , мГн	C , мкФ
1	74	470			108	680		
2	119	750			89	560		
3	145	910			191	1200		
4	130	820			191	1200		
5	159	1000			119	750		
6	119	750			89	560		
7	159	1000			130	820		
8	145	910			191	1200		
9	119	750			108	680		
10	74	470			119	750		

3.2.4 Розрахувати частоту зрізу f_1 RC-фільтра нижніх частот параметри елементів якого наведені на рис. 3.7. Результати розрахунку занести до табл. 3.7.

3.2.5 Використовуючи вирази (3.12), (3.13) розрахувати АЧХ та ФЧХ пасивного RC-фільтра нижніх частот, параметри елементів якого вказані на рис. 3.7. Результати розрахунків занести до табл. 3.8.

Таблиця 3.7 – Результати розрахунків та моделювання схем фільтрів

LC-фільтр НЧ		LC-фільтр ВЧ		RC-фільтр НЧ	
fp розрах., Гц	fp модел., Гц	fp розрах., кГц	fp модел., кГц	fp розрах., Гц	fp модел., Гц

Таблиця 3.8 – Результати розрахунків та моделювання АЧХ та ФЧХ RC-фільтрів нижніх частот.

f, Гц	50	150	250	350	450	550	1000
K _{розрах} , дБ							
K _{модел} , дБ							
Ф _{розрах}							
Ф _{модел}							

3.3 Порядок виконання роботи

3.3.1 Моделювання LC-фільтрів

3.3.1.1 Зберіть на робочому столі "Electronics Workbench" схему LC-фільтра нижніх частот згідно з рис. 3.4 та встановіть необхідні параметри елементів згідно з розрахунком (табл. 3.6).

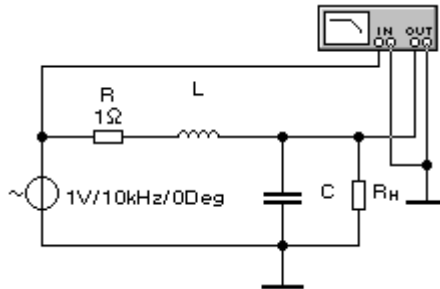


Рисунок 3.4 – Схема LC-фільтра нижніх частот

3.3.1.2 Встановити на ліщовій панелі вимірювача АЧХ параметри, що наведені на рис. 3.5. Отримайте на екрані вимірювача зображення АЧХ LC-фільтра. Проведіть вимірювання частоти зрізу (f_p) на рівні -3 дБ. Результати вимірювань занесіть до табл. 3.7.

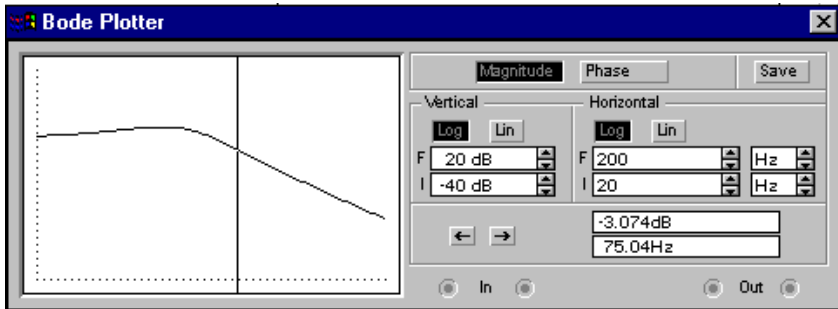


Рисунок 3.5 – Лищова панель вимірювача АЧХ та ФЧХ

3.3.1.3 Зберіть на робочому столі "Electronics Workbench" схему LC-фільтра верхніх частот згідно з рис. 3.6 та встановіть необхідні параметри елементів згідно з розрахунком (табл. 3.6).

3.3.1.4 Встановити на ліщовій панелі вимірювача АЧХ параметри, що наведені на рис. 3.6. Отримайте на екрані вимірювача зображення АЧХ LC-фільтра. Проведіть вимірювання частоти зрізу f_p на рівні -3 дБ. Результати вимірювань занесіть до табл. 3.7.

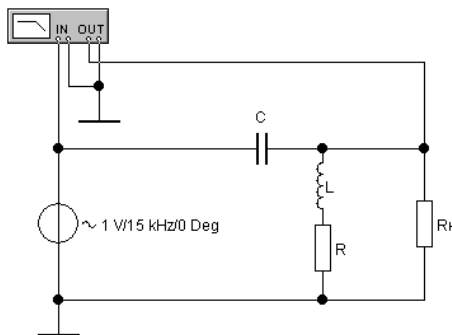


Рисунок 3.6 – Схема LC-фільтра високих частот

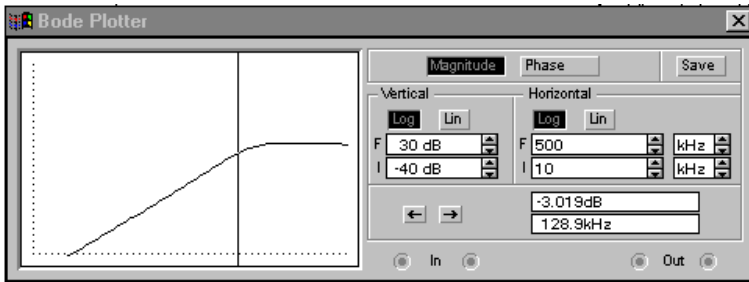


Рисунок 3.7 – Лицьова панель вимірювача АЧХ та ФЧХ

3.3.2 Моделювання пасивних RC-фільтрів

3.3.2.1 Зберіть на робочому столі "Electronics Workbench" схему RC-фільтра нижніх частот згідно з рис. 3.7.

3. 2. 2 Отримайте на екрані вимірювача зображення АЧХ RC-фільтра. Проведіть вимірювання коефіцієнта передачі RC-фільтра в діапазоні частот 50-1000 Гц. Результати вимірювань занесіть до табл. 3.8.

3.3.2.3 Проведіть вимірювання частоти зрізу f_1 на рівні -3 дБ. Результати вимірювань занести до табл. 3.7.

3.3.2.4 Проведіть вимірювання фази коефіцієнта передачі RC-фільтра в діапазоні частот 50-1000 Гц. Результати вимірювань занесіть до табл. 3.8. Порівняйте результати розрахунків та моделювання RC-фільтра.

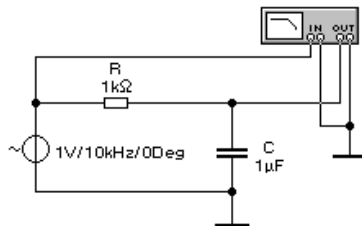


Рисунок 3.8 – Схема пасивного RC-фільтра нижніх частот першого порядку

Порівняйте результати розрахунків та моделювання RC-фільтра.

3.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- схеми досліджених LC- та RC-фільтрів з розрахованими параметрами згідно варіанта за таблицею 2. 1;
- результати розрахунків та моделювання зведені до таблиць 3.7 та 3.8;
- висновки з роботи.

3.5 Контрольні запитання

3.5.1 Призначення електричних фільтрів.

3.5.2 Перерахуйте фільтри за видом частотної характеристики згасання та методу її апроксимації.

3.5.3 Назвіть основні параметри фільтрів.

3.5.4 В якій області частотного діапазону доцільно використовувати електричні, п'єзоелектричні, електромеханічні фільтри?

3.5.5 В якій області частотного діапазону доцільно використовувати LC-фільтри та в якій RC-фільтри?

3.5.6 В чому полягає перевага активних RC-фільтрів?

3.5.7 Як впливає метод апроксимації частотної характеристики фільтра на його параметри та схему?

3.5.8 Які фактори обмежують смугу частот, в якій доцільно застосовувати активні RC-фільтри?

3.8.9 Якими параметрами визначається конструкція фільтра та технологія його використання?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Мета роботи – вивчити режими роботи та застосування електронних кіл з розподіленими параметрами; дослідити параметри узгодження ліній передачі.

4.1 Теоретичні відомості

4.1.1 Загальні відомості

При точному аналізі електронних кіл необхідно враховувати швидкість розповсюдження енергії та розміри елементів кіл. В цьому випадку процеси, що відбуваються в колах носять хвильовий характер, тобто струм та напруга є не тільки функціями часу, але й довжини кола. При цьому необхідно враховувати, що параметри елементів кола R , L , C розподілені вздовж лінії.

Швидкість розповсюдження енергії та розподіленість параметрів елементів кола необхідно враховувати тільки тоді, коли геометричні розміри елементів кола стають співрозмірними з довжиною хвилі коливань. Практично це має місце на високих частотах ($f > 300$ МГц, $\lambda < 1$ м).

Найбільш розповсюдженими колами з розподіленими параметрами є довгі лінії передачі електромагнітної енергії.

Фізичні властивості довгої лінії визначаються чотирма розподіленими вздовж лінії параметрами: індуктивністю L (Гн/м), ємністю C (Ф/м), активним опором R (Ом/м) та активною провідністю G (См/м). Еквівалентна схема відрізка довгої лінії наведена на рис. 4.1.

Зв'язок між струмом та напругою в довгій лінії у випадку гармонійних коливань описується телеграфними рівняннями в комплексній формі:

$$\frac{\partial^2 \dot{U}}{\partial X^2} - \gamma^2 \dot{U} = 0, \quad (4.1)$$

та

$$\frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial X^2} - \gamma^2 \dot{I} = 0, \quad (4.2)$$

де $\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$ - коефіцієнт розповсюдження;
 $\dot{U}$, $\dot{I}$ - комплексна амплітуда напруги і струму відповідно.

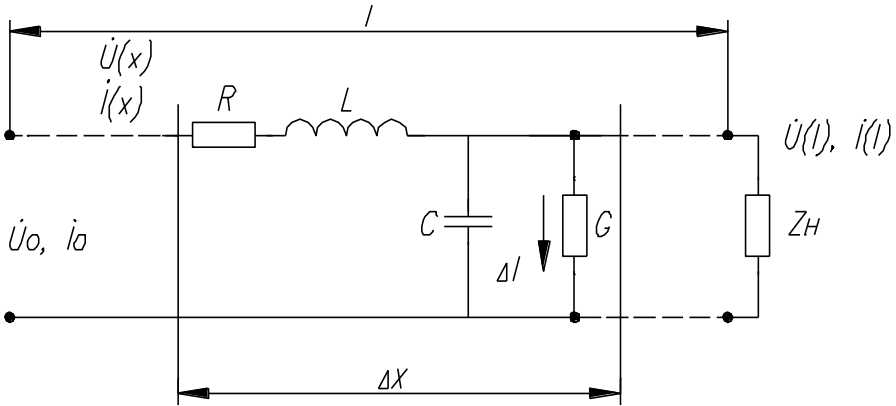


Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема відрізка довгої лінії

В загальному випадку коефіцієнт розповсюдження має комплексний характер:

$$\gamma = i\beta + \alpha, \quad (4.3)$$

де: $\beta = \omega\sqrt{LC}$ - коефіцієнт фази;

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad - \quad \text{коефіцієнт згасання,}$$

обумовлений тепловими втратами в провідниках та втратами в діелектрику (ізоляції).

Якщо в ролі граничних умов вибрати значення напруги і струму на початку лінії ($\dot{U}_0$, $\dot{I}_0$), то диференціальні рівняння (4.1) і (4.2) будуть мати таке рішення:

$$\dot{U}(x) = \left(\frac{\dot{U}_0 + \dot{I}_0 Z_{XB}}{2} \right) \cdot e^{-\gamma x} + \left(\frac{\dot{U}_0 - \dot{I}_0 Z_{XB}}{2} \right) \cdot e^{\gamma x}, \quad (4.4)$$

$$\dot{I}(x) = \left(\frac{\dot{U}_0 + \dot{I}_0 Z_{XB}}{2Z_{XB}} \right) \cdot e^{-\gamma x} - \left(\frac{\dot{U}_0 - \dot{I}_0 Z_{XB}}{2Z_{XB}} \right) \cdot e^{\gamma x}, \quad (4.5)$$

Перші складові цих рівнянь описують падаючі хвилі, а другі - відбиті хвилі напруги і струму відповідно.

Відношення комплексних амплитуд напруги і струму прямої та відбитої хвилі в будь-якому розрізі довгої лінії однакове і називається хвильовим опором:

$$Z_{XB} = \frac{\dot{U}_n}{\dot{I}_n} = \frac{\dot{U}_{ei\partial}}{\dot{I}_{ei\partial}} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}. \quad (4.6)$$

При відсутності втрат ($R=G=0$)

$$Z_{XB} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.7)$$

Розподіл електромагнітного поля вздовж лінії визначається за допомогою вимірювальної лінії.

4.1.2 Застосування та основні параметри довгих ліній

Довгі лінії використовуються для передачі електромагнітної енергії від джерела до навантаження, наприклад, від передавача до антени. На основі відрізків довгих ліній конструюються багато елементів та вузлів: фільтри, коливальні системи, реактивні опори, дільники та суматори потужності, фазообертачі, узгоджуючі трансформатори та ін. Всі лінії передачі, незалежно від їх конструкції, є колами з розподіленими параметрами та характеризуються індуктивністю, ємністю, позовжнім опором та поперечною провідністю на одиницю довжини, які є первинними параметрами лінії (рис. 4.1).

Для більш повної характеристики ліній передачі, окрім первинних параметрів, використовують вторинні параметри ліній: хвильовий опір Z_{XB} , коефіцієнт згасання α , фазову швидкість хвилі V_ϕ та коефіцієнт фази β .

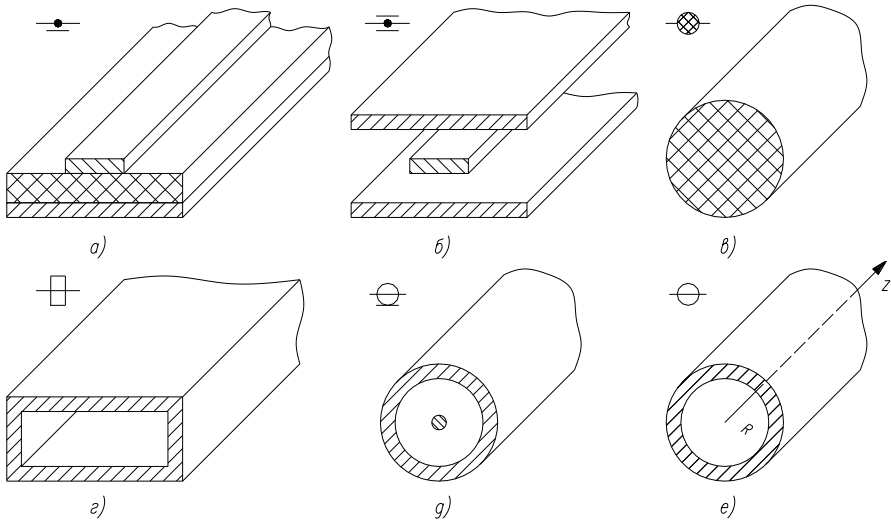
Значення первинних і вторинних параметрів ліній передачі визначається лише конструкцією лінії і не залежить від її довжини.

Хвильовий опір хвильоводів має значення 300..600 Ом; смужкових ліній - 30..100 Ом; коаксіальних кабелів - 50, 75, 100, 150, 200 Ом.

4.1.3 Конструкції ліній передачі

В техніці зв'язку, та в вимірювальній техніці широке застосування знайшли коаксіальні, хвильоводні та смужкові лінії передачі. Конструкції ліній передачі наведені на рис 4.2.

Конструктор, що займається проектуванням ліній передачі, повинен знати, що параметри ліній залежать від конструкції, геометричних розмірів та від електричних і магнітних властивостей матеріалів, що застосовуються.



а – смужкова несиметрична; б – смужкова симетрична; в – діелектрична; г – прямокутний хвильовод; д – коаксіальний хвильовод; е – круглий хвильовід

Рисунок 4.2 – Конструкції ліній передачі

4.1.4 Режими роботи довгих ліній

В залежності від характеру і значення навантаження в лінії встановлюється один з трьох режимів: біжучої хвилі, стоячої хвилі та змішаних хвиль.

Найбільшого коефіцієнту корисної дії системи, що складається з генератора, лінії передачі і навантаження, можна досягти при утворенні режиму біжучої хвилі. Такий режим забезпечується при рівності вхідного опору генератора, хвильового опору лінії передачі і опору навантаження і називається режимом узгодження. При такому режимі амплітуда напруги і струму в кожному перетині лінії однакова (рис. 4.3, а).

Якщо опір навантаження не дорівнює хвильовому опорі лінії - виникає відбита хвиля, що поширюється назустріч падаючій. У результаті інтерференції падаючої і відбитої хвиль рівних амплітуд у лінії встановлюється режим стоячих хвиль. У реальних умовах стоячі хвилі виникають при короткому замиканні ($Z_n=0$) або розмиканні лінії ($Z_n \rightarrow \infty$). У тих перетинах лінії, де падаюча і відбита хвилі знаходяться у фазі, то результуюча напруга подвоюється по амплітуді, створюючи пучність, а в тих перетинах де падаюча і відбита хвилі знаходяться в протифазі, то результуюча напруга дорівнює нулю й утворюється вузол (рис. 4.3, б). Відстань між вузлами і пучностями дорівнює половині довжини хвилі в лінії.

При інтерференції відбитої і падаючої хвиль нерівних амплітуд у лінії виникає режим змішаних хвиль. Для режиму змішаних хвиль характерні не пучності і вузли, а максимуми і мінімуми напруги (рис. 4.3, в).

Режим в лінії передачі і ступінь її узгодження з навантаженням характеризується коефіцієнтом відбиття $\Gamma(x)$ або коефіцієнтом стоячої хвилі КСХ. Відношення комплексних амплітуд відбитої та падаючої хвиль називається коефіцієнтом відбиття:

$$\dot{\Gamma}(x) = \frac{\dot{U}_{\text{від}}}{\dot{U}_{\text{пад}}} e^{i\varphi}, \quad (4.8)$$

де $\frac{U_{\text{від}}}{U_{\text{пад}}} = \Gamma$ - модуль коефіцієнта відбиття;

φ – фаза коефіцієнта відбиття.

Зв'язок коефіцієнта відбиття з опором навантаження описується виразом:

$$\dot{\Gamma}(x) = \frac{Z_H - Z_{XB}}{Z_H + Z_{XB}}. \quad (4.9)$$

Коефіцієнт стоячої хвилі визначається виразом:

$$KCH = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}. \quad (4.10)$$

Коефіцієнт стоячої хвилі пов'язаний з модулем коефіцієнта відбиття наступним співвідношенням:

$$KCH = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \text{ або } \Gamma = \frac{KCH - 1}{KCH + 1}. \quad (4.11)$$

При ідеальному узгодженні навантаження ($Z_H = Z_{XB}$) $\Gamma = 0$, $KCH = 1$.

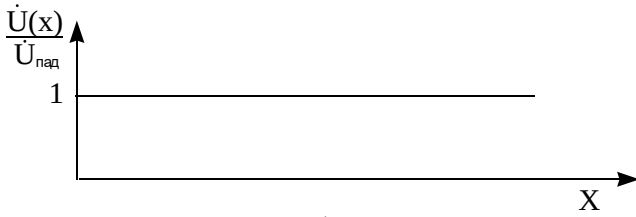
При короткому замиканні ($Z_H = 0$) і холостому ході лінії ($Z_H \rightarrow \infty$), а також при навантаженні лінії реактивним опором в лінії виникає режим стоячих хвиль. При цьому режимі $\Gamma = 1$, а $KCH \rightarrow \infty$.

Коли опір навантаження не дорівнює хвильовому опору лінії, ($Z_H \neq Z_{XB}$) в ній виникає режим змішаних хвиль. В цьому випадку $1 > \Gamma > 0$, а $KCH > 1$.

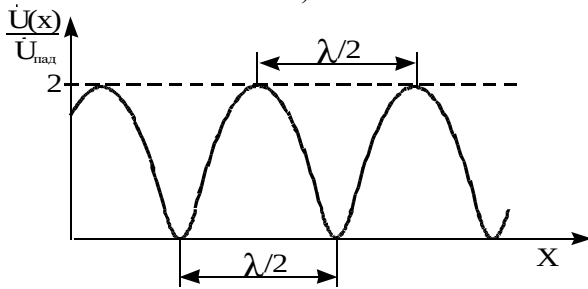
4.1.5 Конструкції вимірювальної лінії

Розподіл електромагнітного поля вздовж лінії визначається за допомогою вимірювальної лінії.

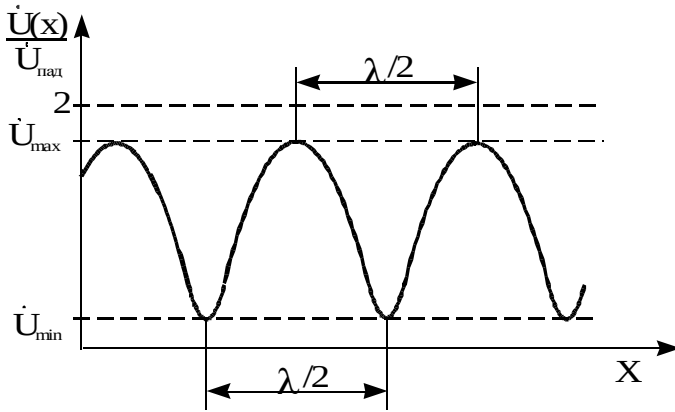
Основним елементом вимірювальної лінії є відрізок хвильоводу або коаксіальної лінії, які мають стандартні розміри. Вздовж лінії прорізана щілина для введення вимірювального зонду. Приклади поперечних розрізів деяких типів ліній зображені на рис.4.4.



а)



б)



в)

а – режим біжучої хвилі; б – режим стоячої хвилі; в – режим змішаної хвилі.

Рисунок 4.3 – Режими роботи довгих ліній

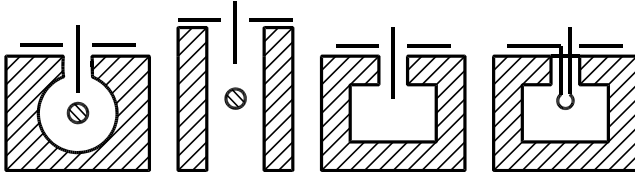
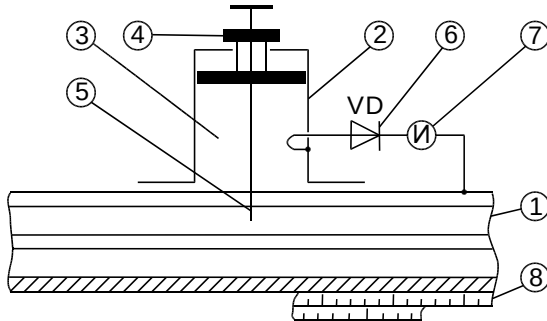


Рисунок 4.4 – Поперечні розрізи вимірювальних ліній

Основні елементи конструкції вимірювальної лінії зображені на рис.4.5.

Зонд вимірювальної лінії монтується на каретці, яка може переміщатись паралельно осі системи. Зонд використовується для дослідження розподілу електричної або магнітної складової електромагнітного поля вздовж лінії. Положення каретки і зонду визначається за шкалою, яка доповнюється ноніусом для підвищення точності відліку. Для збільшення чутливості лінії зонд (5) з'єднано з об'ємним резонатором (3), до якого під'єднаний детектор (6) і індикатор магнітоелектричної системи (7).



1-лінія; 2-каретка; 3-резонатор; 4-пристрій настройки;
5-зонд; 6-детектор; 7-індикатор; 8-шкала з ноніусом.

Рисунок 4.5 – Конструкція коаксіальної вимірювальної лінії

Для забезпечення ще більшої чутливості між детектором і індикатором встановлюють підсилювачі постійного або змінного струму або напруги.

4.1.6 Вимірювання довжини хвилі

Довжина хвилі визначається за зображенням зміни напруженості електричної складової електромагнітного поля в вимірювальній лінії, яка навантажена опором $Z_n \neq Z_{хв}$. Відстань між сусідніми мінімумами або максимумами дорівнює половині довжини хвилі в лінії (рис. 4.6). В більшості випадків вимірюється відстань між мінімумами, бо вони гостріші, ніж максимуми. Найбільш гострими є мінімуми в коротко замкнутій або розімкнутій лінії (рис. 4.3, б).

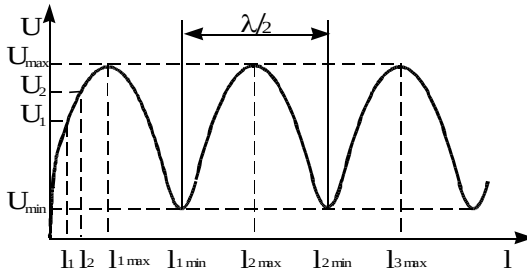


Рисунок 4.6 – Зміна напруги вздовж лінії

Для збільшення точності вимірювання довжини хвилі λ відлік мінімумів доцільно здійснювати виделковим методом. Для цього на деякій відстані від мінімуму, по обох його сторонах, при однакових показах індикатора U_B визначають величини l_k' і l_k'' (рис. 4.7).

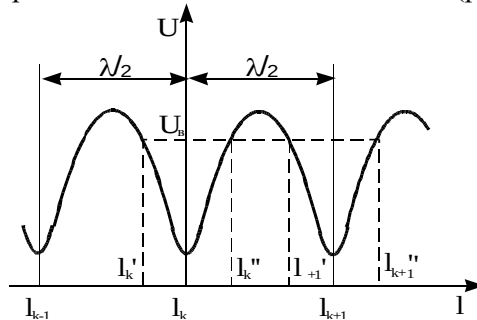


Рисунок 4.7 – Виделковий метод визначення положення мінімуму

Положення мінімумів розраховується за формулами:

$$l_k = \frac{l'_k + l''_k}{2}, \quad l_{k+1} = \frac{l'_{k+1} + l''_{k+1}}{2}. \quad (4.12)$$

Тоді довжина хвилі визначається за формулою:

$$\lambda = 2 \cdot (l_{k+1} - l_k). \quad (4.13)$$

Довжина хвилі в коаксіальній лінії відповідає частоті генератора f . Якщо лінія хвильовідна, то довжина хвилі в ній пов'язана з довжиною хвилі генератора λ_{Γ} таким чином

$$\lambda_{xв} = \frac{\lambda_{\Gamma}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\Gamma}}{\lambda_{кр}} \right)^2}}, \quad (4.14)$$

де $\lambda_{кр}$ – критична довжина хвилі для даного хвильоводу, яка залежить від ширини хвильоводу і типу збудженої в ньому хвилі.

4.1.7 Вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі

Для вимірювання КСХ вимірювальну лінію вмикають між генератором та навантаженням, що досліджується. Вимірювання КСХ полягає в визначенні максимальної та мінімальної амплітуди електричної складової хвилі, що розповсюджується вздовж лінії, а потім - обчислення його за формулою (4.10). Інформація про значення амплітуди електричної складової в місці розташування зонду одержується шляхом перетворення НВЧ-сигналу в струм детектора, який визначається співвідношенням:

$$I_{д} = bU^{\alpha} \quad (4.15)$$

При струмі детектора вимірювальної лінії $I_{д} < 10$ мкА його вольтамперна характеристика наближається до квадратичної ($\alpha=2$). При цьому КСХ визначається за формулою:

$$КСХ = \sqrt{\frac{I_{д\max}}{I_{д\min}}}, \quad (4.16)$$

де $I_{д\max}$, $I_{д\min}$ – максимальне і мінімальне значення струму детектора при переміщенні зонда вздовж вимірювальної лінії.

Співвідношення (4.16) використовується при вимірюванні КСХ менш 5. При більших КСХ стає неможливим вимірювання $I_{\text{дmax}}$ і $I_{\text{дmin}}$ в межах квадратичної ділянки вольт-амперної характеристики діода. Крім того, зі збільшенням КСХ зростає опір лінії в області максимуму стоячої хвилі, що приводить до значного впливу зонда на розподіл поля. Тому при $\text{КСХ} > 5$ використовують метод, що базується на вимірюванні напруги поблизу мінімуму.

Як видно з рис. 4.8 для визначення КСХ вимірюється напруга в точці l_{min} , а також при деякому відхиленні від неї на відстань l , тобто в точці l_1 або l_2 . Часто l_1 та l_2 визначаються за умови $U_{\text{в}} = 2U_{\text{min}}$.

Значення КСХ в цьому випадку розраховується за формулою:

$$\text{КСХ} = \frac{\lambda}{2\pi l}. \quad (4.17)$$

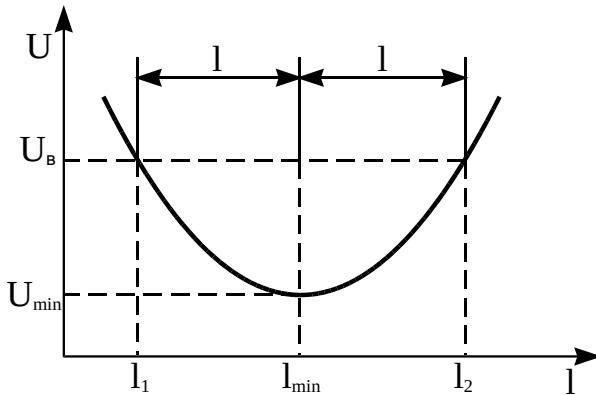


Рисунок 4.8 – Визначення КСХ шляхом вимірювання напруги поблизу мінімуму

4.2 Підготовка до роботи

4.2.1 Користуючись рекомендованою літературою та даними методичними вказівками, вивчити режими роботи довгих ліній.

4.2.2 Відповісти на контрольні запитання.

4.2.3 Використовуючи вирази (4.9), (4.11), розрахуйте коефіцієнти відбиття та КСХ згідно заданого варіанту.

Варіанти вихідних даних наведені в табл. 4.1. Результати розрахунків занесіть до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти вихідних даних

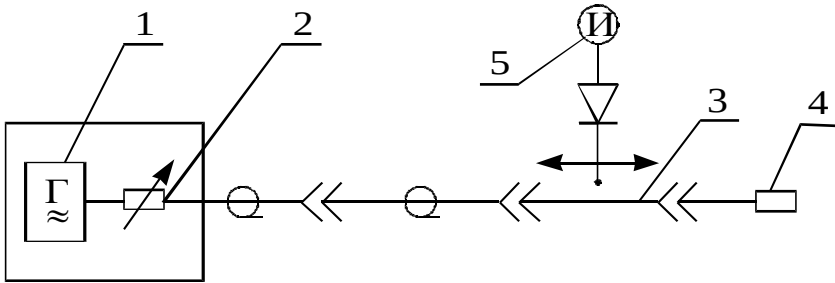
№ варіанту	Z _н	Z _{хв}	Г(х)	КСХ
1	40 50 100	50		
2	50 75 150	75		
3	50 100 200	100		
4	100 150 250	150		
5	100 200 300	200		

4.3 Порядок виконання роботи

Вимірювання довжини хвилі та параметрів узгодження навантаження за допомогою вимірювальної лінії проводиться на установці, схема якої наведена на рис. 4.9.

Виконання роботи проводиться в три етапи:

- налаштування вимірювальної установки;
- проведення вимірювань і визначення довжини хвилі;
- проведення вимірювань та визначення параметрів узгодження.



1-надвисокочастотний генератор; 2-розв'язуючий атенуатор;
3-вимірювальна лінія; 4-навантаження; 5-електронний
вольтметр.

Рисунок 4.9 – Схема установки для вимірювання довжини хвилі та КСХ

4.3.1 Настроювання вимірювальної установки

Настроювання вимірювальної установки зводиться до забезпечення необхідної чутливості вимірювальної лінії на робочій частоті, яка задається викладачем. Для цього встановлюється необхідна частота коливань генератора 1, перевіряється робота вимірювальної лінії 3 та індикатора 5, проводиться настроювання в резонанс об'ємного резонатора, що входить до складу вимірювальної лінії. До вихідного кінця вимірювальної лінії під'єднується навантаження, що досліджується.

4.3.2 Дослідження розподілу поля

Рухаючи каретку з зондом від лівого положення до крайнього правого і користуючись ноніусом, зняти графік залежності напруги вздовж лінії, фіксуючи положення $U_{\max 1}$, $U_{\min 1}$, $U_{\max 2}$, $U_{\min 2}$, і т.д. Результати вимірів занести до табл. 4.2 і побудувати графік $U(l)$ (рис. 4.6).

Довжина хвилі $\lambda_{\text{лср}}$ визначається як усереднене значення:

$$\lambda_{\text{лср}} = 2 \frac{[(l_{\min 2} - l_{\min 1}) + \dots + (l_{\min n} - l_{\min n-1})]}{n - 1}, \quad (4.18)$$

де n – кількість мінімумів, які зафіксовані в межах вимірювальної лінії.

Таблиця 4.2 – Експериментальні результати

Положення зонда	l_1	l_2	...	$l_{1\max}$	...	l_n	$l_{n\min}$
Напруга на виході детектора	U_1	U_2	...	$U_{1\max}$	...	U_n	$U_{n\min}$

Визначити похибку вимірювання довжини хвилі:

$$\delta\lambda_{\text{лсеп}} = \frac{\lambda_{\text{лсеп}} - \lambda_p}{\lambda_p} \cdot 100\%, \quad (4.19)$$

де λ_p – розрахункове значення довжини хвилі, яка відповідає заданій частоті генератора:

$$\lambda_p = \frac{c}{f}, \quad (4.20)$$

де $C=3 \cdot 10^8$ м/с;

f – частота генератора, Гц.

4.3.3 Визначення довжини хвилі виделковим методом

Для цього l'_k і l''_k , l'_{k+1} , l''_{k+1} виміряти 10 разів. Результати вимірювань занесіть до табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювань та розрахунків

$U_B=20$	Номер експерименту					
	1	2	3	...	9	10
l'_k						
l''_k						
l_k						
l'_{k+1}						
l''_{k+1}						
l_{k+1}						
λ_2						

За формулами (4.12) та (4.13) розрахувати значення l_k , l_{k+1} та λ_2 і середнє арифметичне значення довжини хвилі $\lambda_{2\text{сеп}}$. Визначити похибку вимірювання довжини хвилі виделковим методом таким чином:

$$\delta\lambda_{2\text{сеп}} = \frac{\lambda_{2\text{сеп}} - \lambda_p}{\lambda_p} \cdot 100\%, \quad (4.21)$$

де λ_p – розрахункове значення довжини хвилі, що відповідає заданій частоті генератора.

4.3.4 Визначення коефіцієнта стоячої хвилі

Визначення КСХ навантаження на частотах, які задаються викладачем, проводиться двома методами.

З табл. 4.2 визначити максимальні та мінімальні значення напруги U_{max} і U_{min} вздовж лінії. За формулою 4.16 розрахувати КСХ для різних положень каретки і визначити його середнє арифметичне значення $\text{КСХ}_{\text{сеп1}}$.

Виміряти напруги U_{min} і U_B поблизу мінімумів поля вздовж лінії і за формулою (4.17) розрахувати КСХ. Визначити його середнє арифметичне значення $\text{КСХ}_{\text{сеп2}}$.

Результати вимірювань і розрахунків занесіть до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Експериментальні результати

f =	Номер експерименту		
	1	2	3
U_{min}			
l_{min}			
$U_B = 2U_{\text{min}}$			
l_2			
$l = l_2 - l_{\text{min}}$			
КСХ			

Визначити похибку вимірювання KCX_{cep1}

$$\delta KCX_{\text{cep1}} = \frac{KCX_{\text{cep1}} - KCX_{\text{cep2}}}{KCX_{\text{cep2}}} \cdot 100\% \quad (4.22)$$

Провести висновки щодо результатів експериментального дослідження довжини хвилі генератора і узгодження навантаження за допомогою лінії.

4.4 Зміст звіту

4.4.1 Мета роботи.

4.4.2 Схема вимірювання.

4.4.3 Результати вимірів та розрахунків розподілу поля, довжини хвилі та KCX у вигляді рис. 4.6, та табл.4.2–4.4.

4.4.4 Визначення похибки вимірювання.

4.4.5 Висновки з роботи.

4.5 Контрольні запитання

4.5.1 В якому випадку при аналізі електронних кіл необхідно враховувати розподілений характер їх параметрів?

4.5.2 Які властивості має довга лінія?

4.5.3 Назвіть параметри довгої лінії.

4.5.4 Що таке хвильовий опір лінії, в якому разі він не залежить від частоти?

4.5.5 Назвіть конструкції ліній передачі.

4.5.6 Назвіть режими роботи довгих ліній. Які вони мають властивості?

4.5.7 Назвіть параметри, що характеризують ступінь узгодження лінії з навантаженням і дайте їм пояснення.

4.5.8 Застосування довгих ліній.

4.5.9 Які ви знаєте методи вимірювання довжини хвилі за допомогою вимірювальної лінії?

4.5.10 Які ви знаєте методи вимірювання KCX за допомогою вимірювальної лінії?

ЛІТЕРАТУРА

1 Основи радіоелектроніки: навч. посібник для студ. вищ.техн. навч. закл.: рек. МОНУ / Ю. Я. Бобало, Р. І. Желяк, М. Д. Кіселичник та ін. ; за ред. Б. А. Мандзія. – Львів : ЛНУ "Львівська політехніка", 2002. – 456 с.

2 Сисоєв В. М. Основи радіоелектроніки: підручник / В. М. Сисоєв. – Київ : Вища школа, 2004. – 279 с.

3 Кичак В.М. Основи радіоелектроніки: навчальний посібник / В. М. Кичак, Ю. В. Крушевський, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 368 с.

4 Каяцкас А.А. Основи радіоелектроніки. - М.: Вища школа,1998. -464с.

5 Баскаков З. Н. Радіоелектронні кола і сигнали. - М.: Вища школа.,1998. - 448 с.

6 Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник / за ред.. проф.. Ю.Л. Мороза, Є.А. Мачюського, В.І. Правди. - К., Вища школа, 1993. - 837 с.

7 Карлашук В. И. «Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение». Салон – Р. М.: 1999. – 506 с.