

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В.М. Рябенський, В.С. Буряк, І.І. Стужук

ПАСИВНІ ФІЛЬТРИ

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

для виконання лабораторних та практичних робіт
з курсу «Схемотехніка»

з використанням апаратно-програмного
комплексу для зняття АЧХ

Миколаїв
НУК
2023

УДК 621.372.54(072)
Р 98

*Рекомендовано Методичною Радою
Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки,
протокол № 09 від 18.05.2023 р.*

Укладачі:

В.М. Рябенський, доктор технічних наук, професор, зав. кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій;

В.С. Буряк, старший викладач кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій;

І.І. Стужук, старший лаборант кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

Рябенський В.М., Буряк В.С., Стужук І.І.

Р 98 Пасивні фільтри. Методичний посібник для виконання лабораторних робіт з курсу «Схемотехніка» з використанням апаратно-програмного комплексу для зняття АЧХ. – Миколаїв: НУК, 2023. – 36 с.

Методичний посібник містить у собі рекомендації щодо виконання лабораторних робіт для дослідження властивостей пасивних фільтрів різної схемотехнічної реалізації з використанням програм MathCAD і Multisim, а також апаратно-програмного комплексу для зняття АЧХ, розробленого колективом кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій.

Загальна кількість запропонованих лабораторних робіт – 6.

Методичний посібник призначений для студентів спеціальностей 171 «Електроніка» та 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», а також може бути корисним для студентів інших електротехнічних спеціальностей.

УДК 621.372.54(072)

© Рябенський В.М., Буряк В.С., Стужук І.І., 2023
© НУК ім. адмірала Макарова, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Основні теоретичні положення	4
Опис лабораторного обладнання.....	12
Апаратно-програмний комплекс для зняття АЧХ	12
Двоканальний генератор сигналів FY6600-30M.....	14
Лабораторна робота № 1 Дослідження частотних властивостей простих чотириполюсників.....	20
1.1 Короткі теоретичні відомості	20
1.2 Послідовність проведення досліджень	24
Лабораторна робота № 2 Дослідження електричних фільтрів з послідовним резонансом	26
2.1 Короткі теоретичні відомості	26
2.2 Послідовність проведення досліджень	28
Лабораторна робота № 3 Дослідження електричних фільтрів з паралельним резонансом	29
3.1 Короткі теоретичні відомості	29
3.2 Послідовність проведення досліджень	30
Лабораторна робота № 4 Дослідження смуго-пропускнуго фільтру	31
4.1 Короткі теоретичні відомості	31
4.2 Послідовність проведення досліджень	31
Лабораторна робота № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СМУГО- ЗАГОРОДЖУВАЛЬНОГО ФІЛЬТРУ НА ОСНОВІ МОСТУ ВІНА-РОБІНСОНА	33
5.1 Короткі теоретичні відомості	33
5.2 Послідовність проведення досліджень	34
Лабораторна робота № 6 Дослідження смуго- загороджувального фільтру на основі подвійного Т- подібного мосту	35
6.1 Короткі теоретичні відомості	35
6.2 Послідовність проведення досліджень	36

ВСТУП

Основні теоретичні положення

В електронних пристроях і пристроях зв'язку широко застосовують такий вид лінійних стаціонарних кіл, як *електричні фільтри*, призначені для виділення (пропускання) або придушення (ослаблення) сигналів із заданим спектром частот. Вибір типу і параметрів фільтру визначаються цілями, поставленими при обробці сигналу. Вимоги до фільтру формуються у процесі аналізу вихідних даних про спектральний склад корисного сигналу, а також заважаючих сигналів та шумів. Фільтр повинен забезпечити максимальне усунення перешкод при мінімально допустимих викривленнях сигналу. До основних характеристик фільтру відносять його порядок, імпульсну та передавальну характеристики, *амплітудно-частотну характеристику* (АЧХ) і *фазо-частотну характеристику* (ФЧХ) тощо.

В електротехніці та електроніці *пасивному фільтру* дано визначення як пристрою, що складається з конденсаторів, котушок індуктивності та (за необхідності) резисторів. Робота пасивного фільтру базується на способі згладжування гармонік за рахунок зміни реактивної складової (ємнісної та/або індуктивної) опору в залежності від частоти.

Розглянемо особливості частотних характеристик та класифікацію на основі пасивних *RLC*-схем.

З теорії чотириполіусників відомо, що будь-який з них, що містить у своєму складі реактивні двополіусники, характеризується комплексним коефіцієнтом передачі:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{\dot{U}(j\omega)}{\dot{U}(j\omega)}.$$

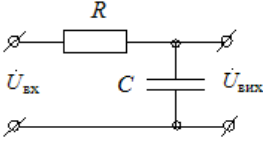
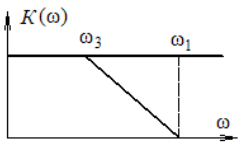
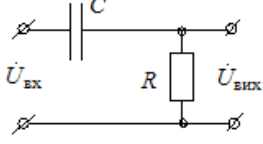
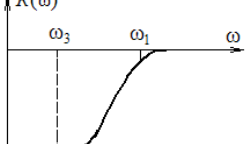
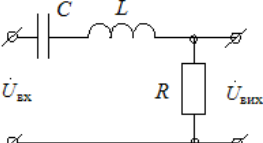
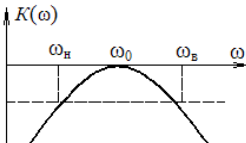
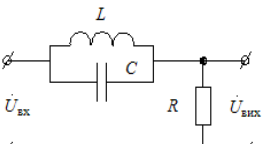
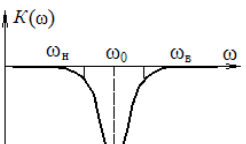
Частотна залежність $K(j\omega)$ є визначаючою при класифікації фільтрів, які в залежності від частини частотного спектра сигналу, що передається на вихід без затування, розділяються на:

- фільтри низьких частот;
- фільтри високих частот;
- смугові фільтри;
- загороджувальні фільтри.

У таблиці 1 наведені приклади схем та АЧХ найпростіших пасивних фільтрів.

Фільтри низьких частот пропускають на вихід сигнали з частотами, що нижче частоти зрізу ω_3 , без затування, а, починаючи з ω_3 , з ростом частоти величина затування зростає. Діапазон частот від нуля до ω_3 називається *смугою пропускання*, а частотний діапазон $\omega > \omega_3$ – *смугою придушення (загородження)*. *Частота зрізу* – це частота, на якій амплітуда вхідного сигналу знижується до рівня $0,707 = \sqrt{2}/2$ відносно амплітуди сигналу, що передається у смузі пропускання.

Таблиця 1

Тип фільтру	Схема	$K(j\omega)$	АЧХ
Низьких частот		$\frac{1}{1 + j\omega RC}$	
Високих частот		$\frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$	
Смуговий		$\frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC}$	
Загороджувальний		$\frac{1 - \omega^2 LC}{1 + j\omega \frac{L}{R} - \omega^2 LC}$	

Важливою характеристикою будь-якого фільтру є швидкість, з якою зі зміною частоти на перехідних ділянках ($\omega_1 - \omega_3$) змінюється амплітуда вихідного сигналу. Вона визначає порядок фільтру, який вимірюється у децибелах на декаду (дБ/дек) або децибелах на октаву (дБ/окт). У децибелах визначається десятковий логарифм відношення амплітуди сигналу на поточній частоті ω до амплітуди сигналу на вході. Частотна вісь задається у логарифмічному масштабі з відліком у 1 декаду або октаву. Для фільтру першого порядку на перехідних ділянках швидкість

зміни амплітуди має величину ± 20 дБ/дек, а затухання на частоті зрізу -3дБ. Для фільтрів k -го порядку – відповідно, затухання на перехідних ділянках визначатиметься як $\pm k \cdot 20$ дБ/дек; $k = 1, 2, 3, \dots$

Порядок фільтру однозначно пов'язаний з кількістю полюсів його комплексного коефіцієнту передачі. Під поняттям *полюс* вважається той же термін, що використовується у розділах математики, які вивчають функції комплексних змінних.

При побудові фільтрів на кожен полюс необхідно використати один реактивний елемент. Кількість полюсів, або порядок фільтру, визначають швидкість зміни частотної характеристики.

Фільтри високих частот забезпечують ослаблення сигналів низьких частот (від 0 до ω_3), а, починаючи з ω_3 , передають сигнали без затухання.

Для смугових фільтрів характерним є пропускання сигналів у межах частот ω_H і ω_B . (ω_H , ω_B – нижня та верхня частоти полоси пропускання). Всі сигнали з частотами $\omega < \omega_H$ і $\omega > \omega_B$ повинні бути придушені. Для смугових фільтрів в якості експлуатаційного і розрахункового параметра використовують центральну частоту ω_0 , що визначається за формулою:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_H \cdot \omega_B}.$$

За частоти ω_H і ω_B приймають частоти, на яких АЧХ зменшується на 3 дБ по відношенню до АЧХ на частоті ω_0 .

Режекторні фільтри мають протилежні властивості по відношенню до смугових. Вони ослаблюють частоти в діапазоні $\omega_H \div \omega_B$, а за межами цих частот сигнали передаються без затухання.

Часто виникає необхідність у створенні фільтрів з більш пласкою вершиною у смузі пропускання і більш крутими схилами. Така необхідність існує завжди, коли сигнал у частотній області знаходиться поряд з перешкодою. Наприклад, виникає питання, чи можливо, з'єднаючи каскадно однакові фільтри (скажімо, низьких частот), отримати апроксимацію ідеальної характеристики фільтру низьких частот типу «цегляна стіна», як показано на рис. 1.

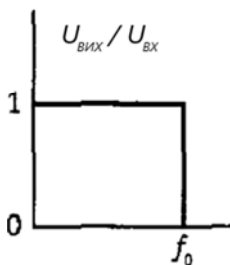


Рисунок 1 – Ідеальна характеристика фільтру низьких частот типу «цегляна стіна»

Просте каскадне з'єднання не дає результату без спотворення загальної характеристики, оскільки вхідний опір кожної ланки буде слугувати суттєвим навантаженням попередньої ланки. Але якщо поставити буфер між двома ланками, чи вдасться добитись бажаного ефекту? На жаль, відповідь на це питання буде негативною. З'єднані каскадно RC -фільтри, дійсно,

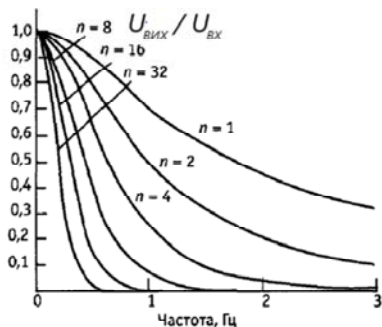
дадуть сумарну характеристику з крутим нахилом, але злам цієї характеристики не буде різким. Це можна сформулювати так: з багатьох плавних перегинів не можливо створити одного крутого. Для ілюстрації цього висновку нижче наведено декілька графіків частотних характеристик коефіцієнтів передачі фільтрів низьких частот, складених з 1, 2, 4, 8, 16 і 32 ідентичних, повністю розв'язаних буферними підсилювачами RC-ланок.

На рис. 2 на першому графіку (а) показано результат каскадного з'єднання декількох RC-ланок, у кожного з яких точка зламу (точка із затуханням -3 дБ) знаходиться на одиничній частоті. По мірі нарощування кількості ланок вказана точка зміщується в область низьких частот, що легко передбачити.

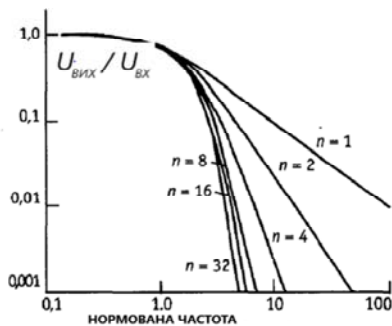
Щоб порівняння характеристик було коректним, необхідно узгодити частоти зрізу так, щоб частота з затуханням -3 дБ була однаковою для фільтрів, що порівнюються. Тому інші фільтри «нормовані» по частоті в тому сенсі, що точка зламу із затуханням -3дБ знаходилась на частоті 1 Гц. Для того, щоб визначити характеристику фільтру, в якого точка зламу знаходиться на іншій частоті, необхідно змінити масштаб по осі частот з допомогою помноження значень на частотній осі на істинні значення точки зламу.

При аналізі частотних характеристик фільтрів використовуються логарифмічний масштаб по обох осях, оскільки такий графік дає найбільшу інформацію про амплітудно-частотну характеристику. Він дозволяє встановити точне значення затухання. У даному

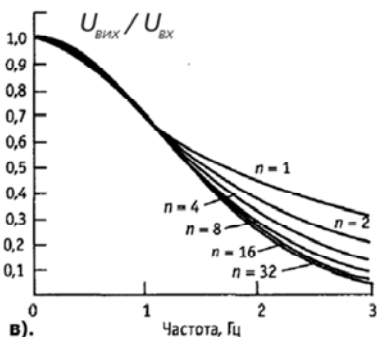
випадку нормовані графіки на рис. 2, б) і в) демонструють плавний злам характеристик пасивних RC -фільтрів.



а).



б).



в).

Рисунок 2 – Частотні характеристики багатокаскадних RC -фільтрів. Графіки а) і в) виконані у лінійному масштабі, графік б) – у логарифмічному. Характеристики на графіках б) і в) нормовані приведенням точки -3 дБ до одиничної частоти

Фільтри, що побудовані на основі LC -ланок, можуть мати досить високу крутизну характеристик. Прикладом цього може слугувати паралельний резонансний LC -контур. Включення у фільтри котушок індуктивності надає можливість створювати

фільтри з будь-яким наближенням ділянки характеристики у смузі пропускання до горизонтальної прямої у поєднанні з різкістю перехідної області і крутизною спаду поза смугою пропускання.

На рис. 3 наведено схему пасивного смугового фільтру з високими технічними характеристиками, побудованого на основі конденсаторів і котушок індуктивності. Ємність вказана у пФ, а індуктивність – в мГн. На рис. 4 наведена АЧХ цього фільтру.

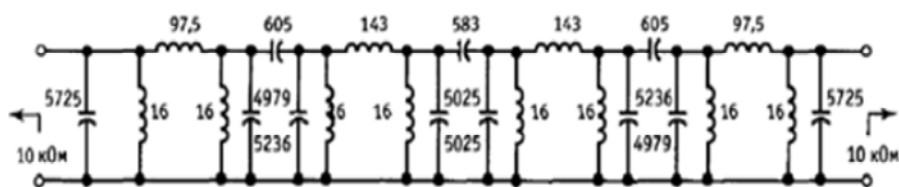


Рисунок 3 – Схема пасивного смугового фільтру

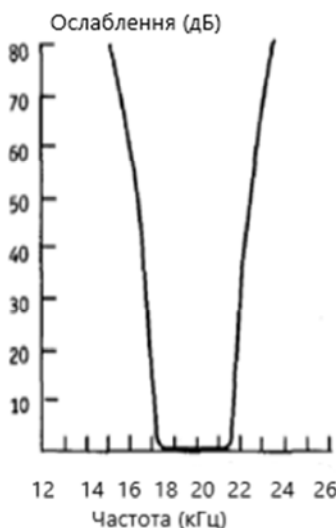


Рисунок 4 – АЧХ пасивного смугового фільтру

Включення котушок індуктивності в схемах фільтрів відкриває можливості, які не можуть бути досягнуті одними лише конденсаторами і резисторами. Але при цьому суттєво зростає складність фільтрів, особливо при зростанні вимог до рівномірності та плавності амплітудно-частотної характеристики у смузі пропускання і крутизни спаду поза нею, що призводить до суттєвого збільшення кількості елементів. Перехідна і фазочастотна характеристики також погіршуються по мірі наближення АЧХ до ідеальної прямокутної форми.

Синтез електричних фільтрів на базі пасивних елементів – досить глибоко досліджена галузь. Єдиною проблемою є те, що котушки індуктивності як електротехнічні елементи далеко не ідеальні. Вони, поряд з високою вартістю і великими розмірами, мають значні активні опори, паразитні ємності, можуть бути нелінійними, чутливими до магнітного поля тощо. Відповідно, бажано знайти спосіб побудови фільтрів без використання котушок індуктивності з характеристиками ідеальних R -, L -, C - фільтрів. Такі задачі розв’язуються активними фільтрами.

Опис лабораторного обладнання

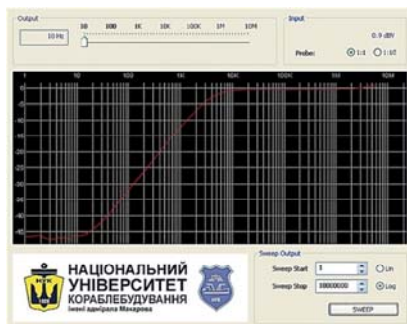
Апаратно-програмний комплекс для зняття АЧХ

Лабораторні дослідження проводяться з використанням апаратно-програмного комплексу, призначеного для автоматизованого зняття амплітудно-частотних характеристик (АЧХ),

який був розроблений та сконструйований студентами кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій НУК ім. адмірала Макарова під керівництвом професорсько-викладацького складу (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд (а) пристрою для зняття частотних характеристик та інтерфейс програмного забезпечення (б) для його використання



Рисунок 6 – Процес зняття частотних характеристик

Двоканальний генератор сигналів FY6600-30M

FY6600-30M – низькочастотний генератор сигналів довільної форми (смуга 30 МГц, 2 канали) виробництва компанії FeelTech (рис. 7). Генератор виконаний за технологією прямого цифрового синтезу (DDS) і забезпечує високі часові та амплітудні характеристики генерованих сигналів. Оснащений 14-ти бітний ЦАП зі швидкістю вибірки 250 МБ/с і пам'яттю 8192 точок (на осцилограму), є вбудований частотомір до 100 МГц з функцією підрахунку імпульсів. Вбудована пам'ять розрахована на 98 форм довільних форм сигналів, є встановлені форми: синус, прямокутник, імпульс, пила, півхвиля, повна хвиля, експонента, зворотна експонента, мультитон, ЕКГ, трапеція, білий (гаусів) шум. Також генератор FY6600-30M реалізує функції генератор хитної частоти, амплітуди, зсуву або заповнення (скважності) і модуляцій AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK.



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд генератору сигналів серії FY6600

Серія генераторів **FeelTech FY6600** складається з 4-х однотипних моделей відрізняються тільки максимальною частотою генерації.

Модельний ряд серії генераторів FY6600:

FY6600-15M – 2-х канальний, смуга 15МГц.

FY6600-30M – генератор 2-х канальний, смуга 30МГц.

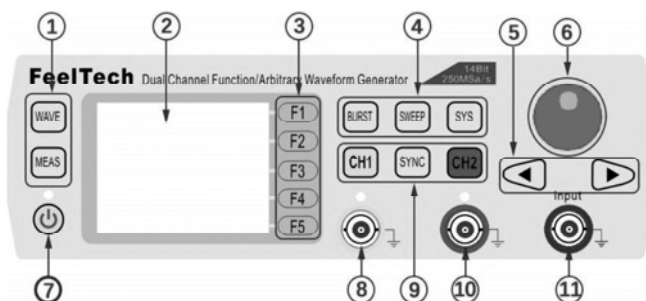
FY6600-50M – генератор 2-х канальний, смуга 50МГц.

FY6600-60M – генератор 2-х канальний, смуга 60МГц.

Технічні характеристики генераторів FeelTech FY6600-30M:

- TFT дисплей 2.4", дозвіл 320x240;
- Максимальна частота (синусоїда): **30 МГц**;
- Максимальна частота (меандр, трикутник): **25 МГц**;
- Максимальна частота (імпульс, TTL/CMOS, сигнал довільної форми): **10 МГц**;
- Кількість каналів: 2 канали (CH1 / CH2) + зовнішній вхід;

- Швидкість вибірки: **250 МБ/с**;
- Кількість точок в сигналі довільної форми: **8192 точок**;
- Дозвіл по частоті: **1,0 мкГц**;
- Дозвіл по вертикалі: **14 біт**;
- Дозвіл по напрузі: **1 мВ**;
- Амплітуда: <10 МГц: **20 В**, 10..20 МГц: **10 В**, >20 МГц: **5**;
- Вбудовані форми сигналів: попередньо встановлені (34 форми: синус, прямокутник, імпульс, пила, білий шум (Гауса) та ін.) і 64 користувальницькі форми (включаючи DC);
 - Типи модуляції: **AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK**;
 - Вихідний імпеданс: **50 Ом $\pm$ 10%**;
 - Частотомір: діапазон частот: **від 0,01 Гц до 100 МГц**;
 - Скважність імпульсного сигналу для кожного каналу може бути встановлена незалежно в межах від 0,1% до 99,9% з дискретністю 0,1%;
- Генерація імпульсних послідовностей: **від 1 до 1048575** довільних імпульсів;
- Система захисту виходів від короткого замикання: всі вихідні канали витримують коротке замикання до 60 с;
- Інтерфейси: стандарт USB, TTL, CMOS;
- Габарити: 200 x 190 x 90 мм.



1 – **WAVE** – кнопка вибору форми сигналу (Sine, Square і т.д.); **MEAS** – кнопка переключення у режим частотомір/лічильник імпульсів для вимірювання частоти, періоду, коефіцієнту заповнення і тривалості імпульсу сигналу на зовнішньому вході **Input** (режим входу **AC coupling** – тільки змінна напруга) або **Trig IN** (режим входу **DC coupling** – пропускання постійної складової напруги).

2 – 2,4-дюймовий кольоровий дисплей TFT LCD.

3 – **F1..F5** – функціональні програмні кнопки, які активують потрібну функцію в меню. Значення кнопок будуть зображені на дисплеї.

4 – **BURST** – кнопка налаштування генерації пачки імпульсів;

SWEEP – кнопка налаштування качання частоти / амплітуди / зміщення / коефіцієнту заповнення;

SYS – кнопка виклику системних налаштувань.

5 – Кнопки переміщення курсору ◀ ▶ при чисельному вводі параметру.

6 – Ручка налаштування параметру (являє собою поворотний енкодер з кнопкою). При повороті збільшує або зменшує поточне обране значення регульованого параметру, при натисканні вибір підтверджується.

7 – Кнопка включення живлення.

8 – Вихід каналу **CH1**.

9 – Кнопки швидкого керування каналами **CH1** і **CH2**. Коротке натискання: якщо цей канал не є поточним, то він стає поточним. Якщо цей канал поточний, то коротке натискання на цю кнопку включає та відключає вихід відповідного каналу. **SYNC** – активація режиму синхронізації параметрів сигналу на виході каналу **CH2** з параметрами сигналу на виході каналу **CH1** (канал **CH1** є опорним для **CH2**).

10 – Вихід каналу **CH2**.

11 – **Input** – зовнішній вхід частотоміра/лічильника імпульсів (**AC coupling**).

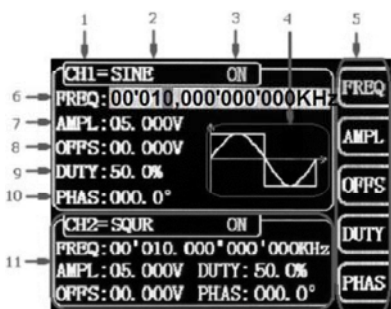
Рисунок 8 – Передня панель генератора сигналів серії FY6600

Двоканальний генератор сигналів FY6600-30M працює за принципом прямого цифрового синтезу (DDS – Direct Digital Synthesis). Він може генерувати сигнали синусоїдальної, прямокутної, трикутної форм, імпульсні сигнали, а також сигнали довільної форми, визначеної користувачем. Частота вихідного сигналу може бути до 30 МГц. Наявна функція корекції скважності, функція амплітудної модуляції й качання (розгортки) частоти та інші можливості щодо формування сигналів. На графічному індикаторі генератора можна одразу побачити форму сигналу, а також параметри його амплітуди, частоти, фази.

На рис. 8 зображено передню панель, а також описано її функціонал.

Користувацький інтерфейс генератора може відображати чотири режими: Dual Channels Parameters (за замовчуванням), Single Channel Extension, Auxiliary Functions и System Interface.

На рис. 9 наведений користувацький інтерфейс у режимі завдання параметрів каналів (Dual Channels Parameters).



- 1 – Поточний обраний канал (**CH1**).
- 2 – Поточна обрана форма сигналу (**SINE**). Форма сигналу може бути змінена багатократним натисканням кнопки **WAVE** (рис.6, п.1), а також обертанням ручки енкодера при початковому однократному натисканні кнопки **WAVE**.
- 3 – Поточний статус каналу (**ON** або **OFF**). Може бути змінений натисканням кнопок **CH1** або **CH2** (рис.6, п.9).
- 4 – Зображення форми сигналу. Жовтий колір – CH1, блакитний – CH2.
- 5 – Рядок меню. Поточний пункт меню виділяється підсвічуванням.
- 6 – Поточна частота сигналу (10 kHz). Для завдання частоти потрібно натиснути функціональну кнопку **F1** (рис.6, п.3) та, використовуючи кнопки переміщення курсору ◀ ▶ (рис.6, п.5) й обертаючи енкодер (рис.6, п.6), встановити чисельне значення. Натисканням на кнопку енкодера можна змінювати одиниці виміру частоти: MHz, KHz, Hz, mHz, μHz.
- 7 – Поточна амплітуда сигналу (5.0 V). Для завдання амплітуди натиснути функціональну кнопку **F2** та, за допомогою кнопок ◀ ▶ й енкодера, встановити чисельне значення.
- 8 – Поточне постійне зміщення сигналу (0.0 V). Для завдання зміщення сигналу натиснути функціональну кнопку **F3** та, за допомогою кнопок ◀ ▶ й енкодера, встановити чисельне значення.
- 9 – Поточний коефіцієнт заповнення (50%) – величина, зворотна скважності. Для завдання коефіцієнта заповнення натиснути функціональну кнопку **F4** та, за допомогою кнопок ◀ ▶ й енкодера, встановити чисельне значення. При натисканні на кнопку енкодера встановлюється значення 50%.
- 10 – Поточна фаза сигналу (0.0°). Для завдання фази сигналу натиснути функціональну кнопку **F5** та, за допомогою кнопок ◀ ▶ й енкодера, встановити чисельне значення.
- 11 – Параметри необраного каналу (CH2).

Рисунок 9 – Користувацький інтерфейс генератора сигналів серії FY6600 (обрано канал CH1)

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОСТИХ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ

1.1 Короткі теоретичні відомості

Простими називають чотириполюсники, які мають лише два елементи, один з яких є реактивним. Це F-подібні схеми з різними комбінаціями включення R -, L - або R -, C - елементів.

В якості прикладу для дослідження оберемо RC -чотириполюсник, схема якого наведена на рис. 10, а.

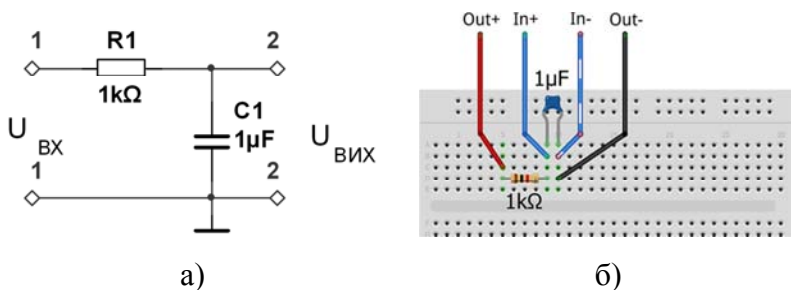


Рисунок 10 – RC -чотириполюсник:
а – принципова схема; б – збірка на макетній платі

Схема, як чотириполюсник, характеризується комплексним коефіцієнтом передачі:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{вих}(j\omega)}{\dot{U}_{вх}(j\omega)}, \quad (1.1)$$

де $\dot{U}_{вх}(j\omega)$, $\dot{U}_{вих}(j\omega)$ – комплексне представлення вхідної та вихідної напруг; $\omega = 2\pi f$ – обертова частота; f – лінійна частота.

Для схеми RC -чотириполусника, наведеної на рис. 1.1, складемо рівняння для визначення струмів і напруг:

$$\dot{U}_{ex}(j\omega) = \dot{I} \cdot \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right), \quad (1.2)$$

$$\dot{U}_{eux}(j\omega) = \dot{I} \cdot \frac{1}{j\omega C}. \quad (1.3)$$

Розв'язуючи (1), (2), (3), знаходимо:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}. \quad (1.4)$$

Розглянемо детально вираз (4) з урахуванням частотних властивостей радіоелектронних пристроїв. Діапазон освоєних частот коливається в діапазоні від одиниць-десятків герц (Гц) до десятків гігагерц (ГГц). Зрозуміло, що такий частотний діапазон можна розглядати лише в логарифмічному масштабі.

З іншого боку, рівні сигналів (напруг, струмів) також можуть змінюватись від мікрровольт до кіловольт, тобто в діапазоні від 10^{-6} до 10^3 В і більше. Тому для графічного представлення рівнів сигналів використовується логарифмічна шкала, де:

$$L(\omega) = 20 \lg |\dot{K}(j\omega)|.$$

У такому випадку при $|\dot{K}(j\omega)| = 1$ маємо $L(\omega) = 0$; при $|\dot{K}(j\omega)| = 10$ маємо $L(\omega) = 20$; при $|\dot{K}(j\omega)| = 1$ маємо $L(\omega) = 40$ і т.д.

Якщо вихідний сигнал менше за модулем, ніж вхідний, то відповідно:

$$|\dot{K}(j\omega)| < 1.$$

У такому випадку значення $L(\omega)$ будуть від'ємними, тобто при $|\dot{K}(j\omega)| = 0,1$ матимемо $L(\omega) = -20$ дБ і т.д.

Виходячи з вище наведеного, розглянемо вираз (1.4) при конкретних значеннях параметрів R і C . Прийнемо $R = 1$ кОм; $C = 1$ мкФ. Тоді добуток $RC = 10^3 \cdot 10^{-6} = 10^{-3}$ с⁻¹.

Складаємо залежність від лінійної частоти f :

$$\dot{K}(jf) = \frac{1}{1 + j2\pi \cdot 10^{-3} f}. \quad (1.5)$$

Знайдемо значення f , при якій:

$$1 = 2\pi \cdot 10^{-3} f.$$

Звідси:

$$f_3 = \frac{10^3}{2\pi} = 159,155 \approx 160 \text{ Гц}.$$

Ця частота називається частотою зрізу f_3 амплітудно-частотної характеристики $L(\omega)$.

Враховуючи декадний масштаб частот, при частоті, що на декаду менша, тобто при $f = 0,1f_3$, уявна складова $2\pi \cdot 10^{-3} f \ll 1$ і у виразі (5) нею можна знехтувати. Тоді:

$$\dot{K}(j\omega) = 1, \text{ а } L(\omega) = 0.$$

Розглядаючи, аналогічно, ситуацію при частоті $f = 10f_3$ (на декаду більшій, ніж f_3), можемо стверджувати, що:

$$2\pi \cdot 10^{-3} f \gg 1.$$

У такому випадку можемо знехтувати 1:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{1}{j2\pi f \cdot RC} \approx 0,1; \text{ а } L(\omega) = -20 \text{ дБ}.$$

На частоті зрізу:

$$\dot{K}_3(j\omega) = \frac{1}{1+j \cdot 1} = \frac{1-j \cdot 1}{(1+j \cdot 1)(1-j \cdot 1)} = \frac{1-j \cdot 1}{1+1} = \frac{1}{2} - j \cdot \frac{1}{2}.$$

$$\text{Маємо } \text{Re} = \frac{1}{2}; \text{ Im} = -\frac{1}{2}.$$

$$|\dot{K}_3(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

Тоді:

$$L_3(\omega) = 20 \lg\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \approx -3 \text{ дБ}.$$

З наведеного витікає вигляд АЧХ у логарифмічному масштабі (рис. 11).

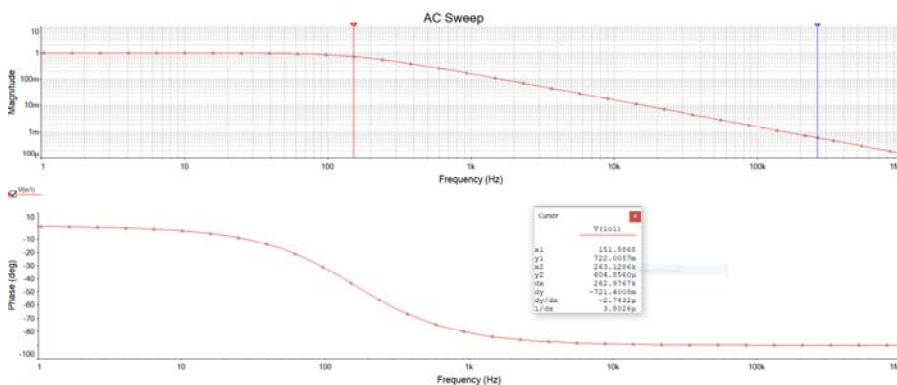


Рисунок 11 – АЧХ RC-чотириполюсника
у логарифмічному масштабі

1.2 Послідовність проведення досліджень

1. Відповідно до варіанту завдання (табл. 2), обрати схему для дослідження (рис. 12) та номінали елементів.

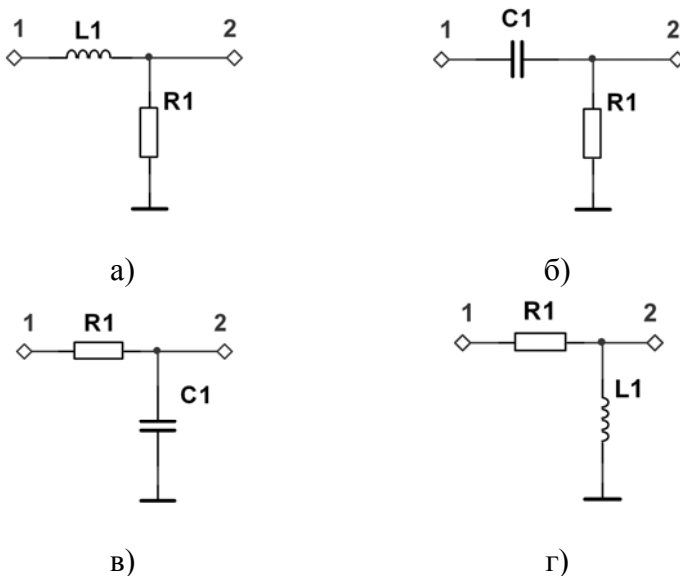


Рисунок 12 – Варіанти схем для досліджень

Таблиця 2

Елемент Варіант	Схема, рис. 12	R_1 , Ом	L_1 , мкГн	C_1 , мкФ
1	а	180	470	0,233
2	б	180	1000	10
3	в	470	470	0,233
4	г	470	100	10

2. Для обраних схем визначити вираз $K(j\omega)$, як це було зроблено у прикладі у п. 1. Якщо в схемі є котушка індуктивності, слід враховувати її внутрішній активний опір.

3. Для заданих параметрів R , L , C обчислити сталу часу ($R \cdot C$ або L/R).

4. Виконати розрахунки $L(f)$ для діапазону частот у межах ± 2 декади відносно частоти зрізу f_z з побудовою графіка у програмі Mathcad.

5. Перевірити вигляд графіку $L(f)$ з використанням Multisim (модельні дослідження).

6. Провести експериментальні дослідження на лабораторному стенді.

7. Порівняти результати експериментальних досліджень з розрахунковими і модельними, зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

З ПОСЛІДОВНИМ РЕЗОНАНСОМ

2.1 Короткі теоретичні відомості

Різновидом Г-подібних LC-фільтрів є *резонансні фільтри*. Вони забезпечують високий коефіцієнт згладжування однієї з частот напруги пульсацій.

Фільтри, функціонування яких засновано на послідовному резонансі (резонансі напруги), називаються *режекторними фільтрами*. У режекторного фільтру (рис. 13, а) коло $L1$ $C1$ при резонансі має мінімальний опір, який може бути меншим за ємнісний опір конденсатора C , що покращує згладжування пульсацій напруги.

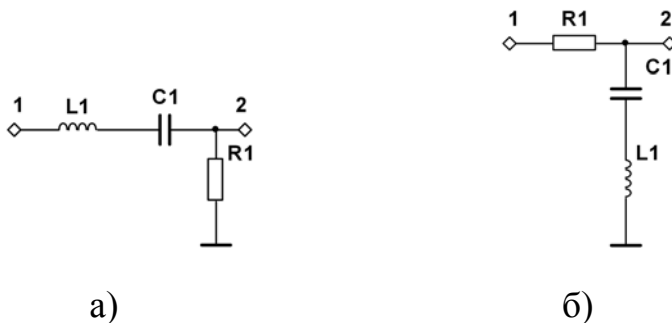


Рисунок 13 – Варіанти схем для досліджень

Для схеми, наведеної на рис. 13, б, складемо рівняння для визначення струмів і напруг, врахувавши при цьому наявність внутрішнього опору котушки індуктивності:

$$\dot{U}_{ex}(j\omega) = \dot{I} \cdot \left((R + R_L) + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L \right), \quad (2.1)$$

$$\dot{U}_{внх}(j\omega) = \dot{I} \cdot \left(\frac{1}{j\omega C} + j\omega L + R_L \right). \quad (2.2)$$

Розв'язуючи (2.1), (2.2), знаходимо:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L + R_L}{(R + R_L) + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L} = \frac{1 - \omega^2 LC + j\omega R_L C}{j\omega(R + R_L)C + (1 - \omega^2 LC)}. \quad (2.3)$$

На резонансній частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{j\omega R_L C}{j\omega(R + R_L)C} = \frac{R_L}{R + R_L}$$

$$|\dot{U}_L| = |\dot{U}_C| = |\dot{I} \cdot j\omega L| = \left| \dot{I} \cdot \frac{1}{j\omega C} \right|$$

Добротність власне резонансної ділянки кола (визначається на резонансній частоті):

$$Q = \frac{\omega L}{R_L} = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot L}{R_L} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} = \frac{\rho}{R_L},$$

де ρ – характеристичний опір ділянки кола.

Інший спосіб визначення добротності:

$$Q = \frac{f_p}{2\Delta f},$$

де $2\Delta f$ – визначається на рівні 0,7 від максимального (мінімального) рівня сигналу.

2.2 Послідовність проведення досліджень

1. Скласти схему, що наведена на рис. 13, а, з параметрами: $C_1=1$ мкФ; $L_1=1$ мГн; $R_1=1$ кОм; $R_L=10$ Ом.
2. Зняти АЧХ при встановлених параметрах.
3. Визначити розрахункову добротність.
4. Розрахувати величину затухання сигналу на резонансній частоті.
5. Збільшуючи на порядок величину індуктивності та зменшуючи величину ємності, встановити експериментально характер залежності зміни добротності від зміни характеристичного опору електричного кола.
6. Виявити вплив опору R_L на АЧХ і ФЧХ електричного кола, що досліджується шляхом зміни величини R_L в межах 0...10 Ом.
7. Дати пояснення фазочастотній характеристиці резонансного кола. Пояснити, чому в області резонансу має місце різка зміна фази вихідного сигналу. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

З ПАРАЛЕЛЬНИМ РЕЗОНАНСОМ

3.1 Короткі теоретичні відомості

Фільтри, робота яких базується на використанні паралельного резонансу (резонансу струмів), називаються *фільтрами-пробками*, оскільки вони (наприклад, при послідовному включенні паралельного резонансного LC-контур з навантаженням, рис. 14, а) сильно послаблюють струми резонансної частоти. В них резонансний опір LC-контур може бути значно більшим, ніж індуктивний опір дроселя на тій самій частоті. Тому вони забезпечують кращу фільтрацію, ніж звичайні LC-фільтри.

У фільтрі-пробці струм з частотою пульсацій замикається через конденсатор C . Для струмів з частотою пульсацій, більшою за резонансну, контур має опір ємнісного характеру, і фільтр перетворюється на ємнісний дільник напруги. Для струмів з частотою, нижчою за резонансну, опір контуру носить індуктивний характер, і резонансний фільтр перетворюється на звичайний Г-подібний LC-фільтр.

Резонансні фільтри налаштовують резонанс на придушення найбільш інтенсивної гармоніки. Індуктивність котушки фільтру залежить від величини струму, що протікає крізь неї. Тому при зміні струму навантаження контур фільтру розлагоджується

і згладжування пульсацій погіршується. Цей недолік резонансних фільтрів обмежує їхнє застосування.



Рисунок 14 – Варіанти схем для досліджень

3.2 Послідовність проведення досліджень

1. Відповідно до варіанту завдання (табл. 3), обрати схему для дослідження (рис. 14) і номінали її елементів.

Таблиця 3

Елемент Варіант	Схема, рис. 14	R_1 , Ом	L_1 , мкГн	C_1 , мкФ
1	а	180	470	0,233
2	б	470	1000	10

2. Визначити вираз $K(j\omega)$.

3. Виконати розрахунки АЧХ $L(f)$ та ФЧХ $F(f)$, побудувати графіки у Mathcad.

4. Перевірити вигляд графіку $L(f)$ з використанням Multisim (модельні дослідження).

5. Провести експериментальні дослідження на лабораторному стенді.

5. Порівняти результати експериментальних досліджень з розрахунковими та модельними, зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СМУГО-ПРОПУСКНОГО ФІЛЬТРУ

4.1 Короткі теоретичні відомості

Шляхом послідовного з'єднання ФНЧ та ФВЧ отримують *смуго-пропускні фільтри* (СПФ), вихідна напруга яких дорівнює нулю на високих і на низьких частотах. Одна з можливих схем СПФ представлена на рис. 15.

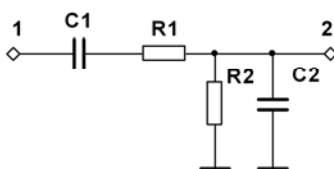


Рисунок 15 – Електрична схема смуго-пропускного RC-фільтру

4.2 Послідовність проведення досліджень

1. Відповідно до варіанту завдання (табл. 2), обрати номінали елементів досліджуваної схеми (рис. 15).

Таблиця 3

Елемент Варіант	Схема, рис. 14	R_1 , Ом	L_1 , мкГн	C_1 , мкФ
1	а	180	470	0,233
2	б	470	1000	10

2. Визначити вираз $K(j\omega)$.

3. Виконати розрахунки АЧХ $L(f)$ та ФЧХ $F(f)$, побудувати графіки у Mathcad.

4. Перевірити вигляд графіку $L(f)$ з використанням Multisim (модельні дослідження).

5. Провести експериментальні дослідження на лабораторному стенді.

6. Порівняти результати експериментальних досліджень з розрахунковими та модельними. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ СМУГО-ЗАГОРОДЖУВАЛЬНОГО ФІЛЬТРУ НА ОСНОВІ МОСТУ ВІНА-РОБІНСОНА

5.1 Короткі теоретичні відомості

Одна пара плечей *мосту Віна* (іноді у літературі використовується назва *міст Віна-Робінсона*) – послідовно і паралельно з'єднані RC-кола, які спільно утворюють квазірезонансний частотно-вибіркового фільтр. Інша пара плечей являє собою резистивний дільник напруги. Модуль передавальної функції сигналу в діагоналі мосту має мінімум при деякому співвідношенні величин двополюсників, що входять у схему, і є передавальною характеристикою загороджувального фільтру.

Така схема мосту була запропонована німецьким фізиком Максом Віном у 1891 році. Міст може застосовуватись у деяких RC-генераторах для побудови автогенераторів синусоїдального сигналу з малими спотвореннями, задовільною стабільністю частоти і досить широким діапазоном переналаштовування по частоті. Іноді застосовується як смуго-загороджувальний фільтр.

Міст Віна може бути використаний для вимірювання ємності конденсаторів та для визначення паразитних параметрів конденсаторів – наприклад, еквівалентного паразитного послідовного опору (ЕППО). Також міст Віна застосовується у вимірювачах нелінійних спотворень як фільтр-придушувач першої (основної) гармоніки досліджуваного сигналу.

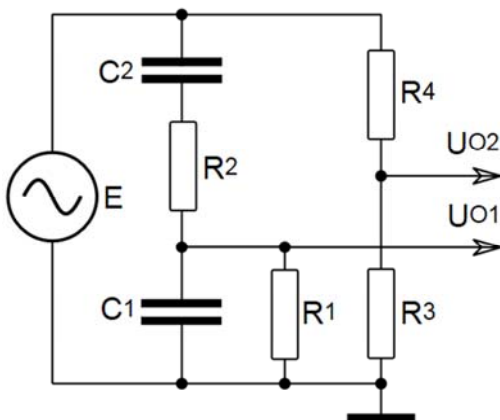


Рисунок 16 – Електрична схема мосту Віна-Робінсона

5.2 Послідовність проведення досліджень

1. Відповідно до варіанту завдання (табл. 2), обрати номінали елементів досліджуваної схеми (рис. 16).
2. Визначити вираз $K(j\omega)$.
3. Виконати розрахунки АЧХ $L(f)$ та ФЧХ $F(f)$, побудувати графіки у Mathcad. Перевірити вигляд графіку $L(f)$ з використанням Multisim (модельні дослідження).
4. Провести експериментальні дослідження на лабораторному стенді.
5. Порівняти результати експериментальних досліджень з розрахунковими і модельними, зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ СМУГО-ЗАГОРОДЖУВАЛЬНОГО ФІЛЬТРУ НА ОСНОВІ ПОДВІЙНОГО Т-ПОДІБНОГО МОСТУ

6.1 Короткі теоретичні відомості

Зображене на рис. 17 пасивне RC-коло має нескінченне загасання на частоті, що дорівнює $\omega = 1/2\pi RC$. Таке нескінченне ослаблення для RC-фільтрів, взагалі кажучи, не є характерним – даний фільтр діє настільки ефективно завдяки додаванню двох сигналів, які на частоті зрізу мають фазову різницю 180° . Отримання досить близького до нуля значення характеристики на частоті ω вимагає хорошого узгодження елементів.

Такий фільтр може застосовуватись для придушення сигналу перешкоди (наприклад, мережного наведення 60 Гц). Особливість полягає у тому, що характеристика цього кола є такою ж «м'якою», як і у всіх пасивних RC-кіл, і лише в околиці частоти f_3 вона обривається майже прямовисно. Наприклад, подвійний

Т-подібний фільтр, керований ідеальним джерелом напруги, має ослаблення у 10 дБ на частоті, що дорівнює подвійній (або половинній) частоті f_3 , і ослаблення у 3 дБ на частоті, що дорівнює вчетвереній (або поділеній на чотири) частоті f_3 .

Подвійні Т-подібні фільтри випускаються у вигляді готових модулів на діапазон частот від 1 Гц до 50 кГц із глибиною

ослаблення на частоті провалу близько 60 дБ (з деяким погіршенням при високих і низьких температурах). Такі фільтри легко зібрати з окремих елементів, але для отримання глибокого та стабільного провалу слід обирати конденсатори та резистори зі стабільними параметрами та низькою термозалежністю.

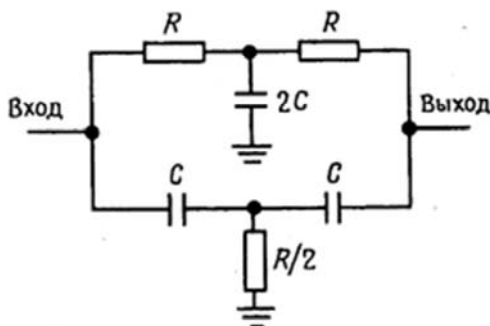


Рисунок 17 – Електрична схема смуго-загороджувального фільтру на основі подвійного Т-подібного мосту

6.2 Послідовність проведення досліджень

1. Відповідно до варіанту завдання (табл. 2), обрати номінали елементів досліджуваної схеми (рис. 17).
2. Визначити вираз $K(j\omega)$.
3. Виконати розрахунки АЧХ $L(f)$ та ФЧХ $F(f)$, побудувати графіки у Mathcad. Перевірити вигляд графіку $L(f)$ з використанням Multisim (модельні дослідження).
4. Провести експериментальні дослідження на лабораторному стенді.
5. Порівняти результати експериментальних досліджень з розрахунковими і модельними, зробити висновки.

Методичні вказівки містять у собі рекомендації щодо виконання лабораторних робіт для дослідження властивостей пасивних фільтрів різної схематехнічної реалізації з використанням програм MathCAD і Multisim, а також апаратно-програмного комплексу для зняття АЧХ, розробленого колективом кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій.

Загальна кількість запропонованих лабораторних робіт – 6.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальностей 171 «Електроніка» та 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», а також можуть бути корисними для студентів інших електротехнічних спеціальностей.

Навчальне видання

Рябенський Володимир Михайлович

Буряк Володимир Святославович

Стужук Ігор Іванович

ПАСИВНІ ФІЛЬТРИ

Методичний посібник для виконання лабораторних та практичних робіт з курсу «Схемотехніка» з використанням апаратно-програмного комплексу для зняття АЧХ

Формат 60x84/16. Ум.-друк. аркушів 2,1.

Видавець та виготівник

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

E-mail: publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.