

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних робіт
з дисциплін: «Вимірювальні перетворювачі»,
«Вимірювальні перетворювачі електронних систем»
для студентів денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей**

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисциплін: «Вимірювальні перетворювачі», «Вимірювальні перетворювачі електронних систем» для студентів денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей / [Електронний ресурс] / уклад. О.В. Вовна, Е.А. Петелін. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Луцьк : ДонНТУ, 2023. – 47 с.

Методичні вказівки є практикумом з дисциплін: «Вимірювальні перетворювачі», «Вимірювальні перетворювачі електронних систем», в них викладено необхідні положення при підготовці до практичних робіт, порядок виконання та завдання до практичних робіт, зміст звіту і контрольні запитання.

Укладачі: Вовна О.В., проф., д.т.н., зав. каф. ЕТ;
Петелін Е.А., доц., к.т.н., доц. каф. ЕТ.

Рецензент: Колларов О.Ю., доц., к.т.н., зав. каф. електричної інженерії.

Відповідальний за випуск: Вовна О.В., завідувач кафедри електронної техніки.

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 4 від 31.01.2023 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електронної техніки,
протокол № 7 від 19.01.2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ З ПРАКТИКУМУ	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ НИЖНІХ ЧАСТОТ ДРУГОГО ПОРЯДКУ НА БАЗІ ОППС	11
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ ВЕРХНІХ ЧАСТОТ ДРУГОГО ПОРЯДКУ НА БАЗІ ОППС	22
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРЯМОКУТНИХ ІМПУЛЬСІВ НА БАЗІ ОППС	31
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ НА БАЗІ ОППС	38
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	46

ВСТУП

Практикум із дисциплін «Вимірювальні перетворювачі», та «Вимірювальні перетворювачі електронних систем» охоплює основні питання даних курсів, а саме, схеми та принципи роботи пристроїв функціонального перетворення аналогових сигналів на базі мікросхем операційних підсилювачів постійного струму: фільтри високих та низьких частот другого порядку, генератори прямокутних імпульсів та генератори синусоїдальних коливань.

Методичні вказівки є практикумом із зазначених дисципліни, в них викладено необхідні положення щодо підготовки до практичних робіт, порядок виконання та завдання до практичних робіт, зміст звіту й контрольні запитання.

З кожної виконаної роботи складається звіт, що включає в себе експериментальні результати та їх обробку при самостійній роботі студентів. Рекомендується при оформленні звіту дотримуватися такої послідовності оформлення. На титульному аркуші вказується дисципліна, тема практичної роботи та автор звіту. Далі вказується мета практичної роботи. Якщо в роботі досліджується кілька електричних схем, то для кожної схеми складається свій «мікрозвіт», що включає в себе:

- електричну схему;
- дані цієї схеми;
- результати вимірювань;
- обробку результатів вимірювань відповідно до методичних вказівок;
- теоретичну перевірку експериментальних результатів;
- оцінку похибки вимірювань.

Якщо похибка вимірювань не перевищує $\pm 10\%$, то результати роботи вважаються достовірними, при похибці більше $\pm 20\%$ необхідно з'ясувати джерело похибки та провести додаткові вимірювання. У кінці звіту вказуються основні висновки по роботі.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ З ПРАКТИКУМУ

Лабораторний стенд призначено для дослідження аналогових електронних схем, які побудовано на базі мікросхем операційних підсилювачів постійного струму (ОППС). До складу стенду входять: окремі функціональні схеми, які призначено для дослідження із можливістю зміни параметрів і типів окремих елементів схеми; внутрішні контрольно-вимірювальні пристрої, які призначено для генерації тестових сигналів різної форми та вимірювання частоти й амплітуди сигналів; блок живлення та роз'єкти для підключення зовнішніх пристроїв контрольно-вимірювальної апаратури. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 1.

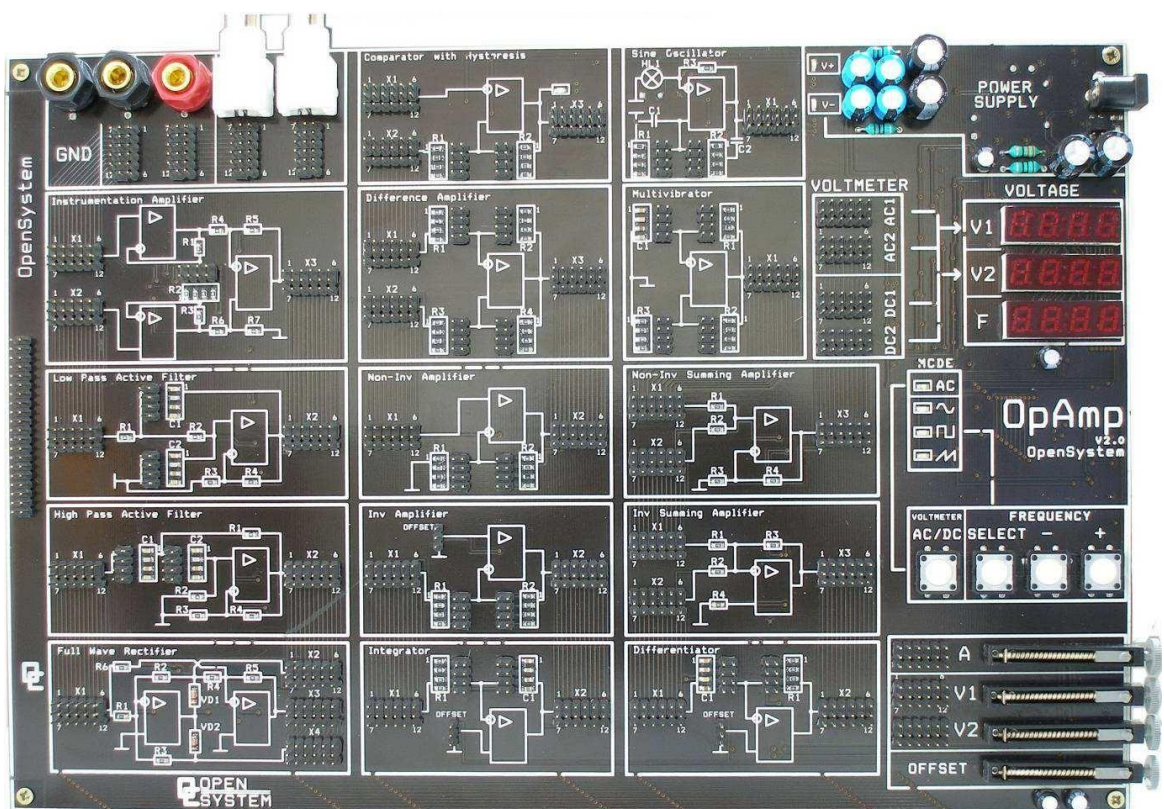


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд лабораторного стенду OpAmp

Всі функціональні схеми, які призначено для досліджень, розташовано у центральній області фронтальної панелі пристрою. З метою полегшення вивчення студентами англomовних видань зі схемотехніки аналогових пристроїв на базі ОППС, назви функціональних схем на передній панелі

наведено англійською мовою. Технічні характеристики лабораторного стенду наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики лабораторного стенду OpAmp

Параметр	Значення
Внутрішній генератор	
– діапазон частот	1 Гц – 100кГц
– форма вихідного сигналу	синусоїдальна, прямокутна, трикутна.
– крок вибору частоти	
в діапазоні частот (1 – 100) Гц	1 Гц
в діапазоні частот 100 Гц – 1кГц	10 Гц
в діапазоні частот (1 – 10) кГц	100 Гц
в діапазоні частот (10 – 100)кГц	1 кГц
– вихідна напруга (амплітудне значення)	
синусоїдальна	(0 – 5) В
прямокутна	(0 – 5) В
трикутна	(0 – 5) В
Внутрішні джерела напруги (V_1, V_2)	
– вихідна напруга	– 10 В – + 10 В
– вихідний струм	не більше 20 мА
– діапазон підстроювання напруги зсуву	– 50 мВ – + 50 мВ
Вольтметр постійної напруги	
– діапазон вхідної напруги	– 12 В – +12 В
– похибка вимірювання	не більше $\pm 2,5 \%$
Вольтметр змінної напруги	
– діапазон вхідної напруги	(0 – 12) В
– похибка вимірювання, не більше	$\pm 5 \%$
Напруга живлення	
– постійна	12 В $\pm 10 \%$
– змінна	12 В $\pm 10 \%$
– струм споживання	не більше 0,5 А
Напруга живлення операційних підсилювачів досліджуваних схем	± 12 В
Максимальний вихідний струм кожної з досліджуваних схем	20 мА
Габаритні розміри	315 × 215 × 22 мм

Перелік функціональних схем, які досліджуються в курсах «Вимірювальні перетворювачі» та/або «Вимірювальні перетворювачі електронних систем»:

- фільтр низьких частот (Low Pass Active Filter);
- фільтр високих частот (High Pass Active Filter);
- мультивібратор (Multivibrator);
- генератор синусоїдальних коливань (SinOscillator).

Кожна функціональна схема, яка призначена для дослідження організована наступним чином. Для покращення техніко-ергономічних характеристик кожна функціональна схема на фронтальній панелі виділена за допомогою білого прямокутника, а також представлена її принципова схема. В місцях зображення входів та виходів схеми, встановлені відповідні конструктивні елементи призначені для підведення вхідних та виведення вихідних сигналів. Для виконання досліджень схем згідно індивідуальних завдань, передбачена можливість зміни значень окремих елементів схеми: резисторів та конденсаторів. В кожній схемі використано один, два або чотири елементи, значення яких можна змінювати. Схеми включення резисторів та конденсаторів наведено на рис. 2, а та б.

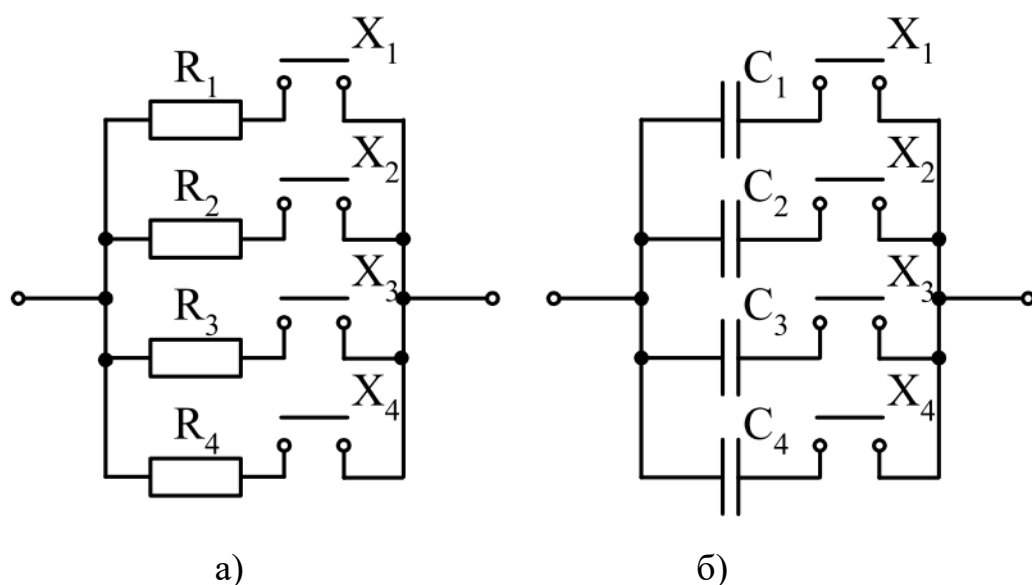


Рисунок 2 – Принципові схеми включення резисторів (а) та конденсаторів (б), які можна змінювати в лабораторному макеті

Як видно зі схем, включення резисторів та конденсаторів відбувається шляхом перемикання перемичок X1 – X4, причому одночасно може бути замкнена 1, 2, 3 або 4 перемички. Підключення елементів проводиться за паралельною схемою включення, отже при розрахунках слід пригадати формули розрахунків опорів резисторів та ємностей конденсаторів, які з'єднано за паралельними схемами включення. Можливість паралельного ввімкнення елементів збільшує кількість можливих індивідуальних завдань. Нумерація елементів починається від позначки (1) біля елемента, і нумерується зверху до низу, або зліва направо. Значення номіналів елементів знаходяться у відповідних таблицях до практичних робіт.

Усі внутрішні контрольно-вимірювальні пристрої розташовано у правій частині лабораторного стенду. До їх складу входять:

- два вольтметри;
- функціональний генератор, частота коливань задається кнопками (+) та (–);
- частотомір сигналів внутрішнього генератору;
- кнопка вибору форми сигналу (*SELECT*) із відповідною індикацією світлодіодами (синусоїдальної, прямокутної та трикутної);
- два змінних резистори які задають постійні напруги V_1 , V_2 ;
- змінний резистор, що задає напругу зсуву для деяких схем.

Блок живлення розташовано у верхній правій частині передньої панелі. Роз'єкти для підключення зовнішньої контрольно-вимірювальної апаратури розміщено у верхній лівій частині пристрою. До групи роз'єктів включено:

- два роз'єкти для підключення зовнішніх контрольно-вимірювальних приладів (типу BNC);
- три роз'єкти для підключення штирових виводів, один з яких з'єднано із загальною шиною 0 В.

Для організації внутрішніх зв'язків між окремими блоками лабораторного стенду використано 12 внутрішніх ліній зв'язку, конструктивно які виконано дванадцятьма друкованими провідниками. За допомогою перемичок будь-яку із

ліній можна з'єднати із входом або виходом будь-якої функціональної схеми, внутрішнім контрольно-вимірювальним пристроєм, розняттям. Конструктивне виконання переминок наступне. Біля кожного входу або виходу розташовано групу штирьових контактів розміщених у три ряди. Центральний ряд контактів з'єднано між собою та входом або виходом відповідного блоку макету. Контакти розміщено у крайніх рядах з'єднані кожний із своєю лінією зв'язку. Нумерація ліній проводиться від першої до шостої та від сьомої до дванадцятої лінії, біля яких розміщені відповідні цифрові позначки. Для підключення входу або виходу до відповідної лінії потрібно, надягнути на один із центральних штирків та штирок із відповідним номером на крайніх рядах, перемичку.

На рис. 3 зображено приклад комутаційного поля. Для передачі сигналу використовується лінія № 3. При встановленні перемички на іншому комутаційному полі в таке ж положення, ці лінії будуть замкнутими. Для передачі сигналу по деякій (обраній) інформаційній лінії необхідно штирок із відповідним номером замкнути перемичкою із спільним рядком на виході й вході відповідних схем.

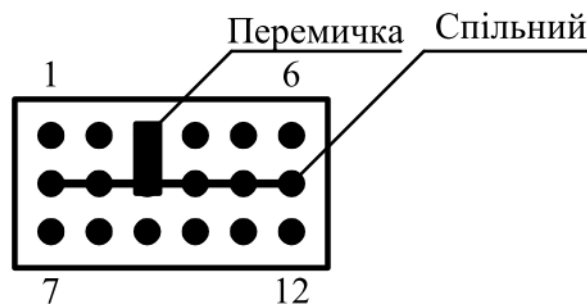


Рисунок 3 – Комутаційне поле

Для розміщення переминок використовується тридцять подвійних груп штирьових виводів у лівій частині передньої панелі лабораторного макету, які не під'єднано до жодного кола електричної схеми макету.

Внутрішній блок живлення лабораторного макету забезпечує постійну напругу живлення схем на ОП – ± 12 В.

Внутрішній генератор сигналів забезпечує встановлення вихідної частоти

у діапазоні частот від 1 Гц до 100 кГц.

Для виконання практичних робіт можна використовувати інші прилади (частотоміри, аналізатори спектру, лабораторні блоки живлення, генератори, осцилографи й інші).

Один з них, осцилограф, є універсальним приладом, що дозволяє робити різноманітні вимірювання в електричних та електронних колах. За допомогою осцилографа можна визначати амплітуду, форму сигналів, зсув фаз, спостерігати процеси, що змінюються у часі, досліджувати спектральні характеристики і проводити інші різні вимірювання. За допомогою осцилографа вимірюють також напругу постійного струму.

Для дослідження електронних схем бажано застосовувати двоканальні або двопроменеві осцилографи, що дозволяють побачити на екрані сигнали у двох різних точках досліджуваної схеми одночасно, наприклад вхідний та вихідний. Це дозволяє наочно простежити взаємозв'язок сигналів у будь-якій точці схеми. Аналогічний результат можна одержати і на однопроменевому осцилографі, якщо на його вхід підключити електронний комутатор, що по черзі підключає до входу осцилографа дві або чотири точки досліджуваної схеми. У залежності від частоти переключення генератором комутатору його входів на вихід (вхід осцилографа) осцилограми досліджуваних напруг на екрані зображуються штриховими або суцільними лініями. Поворотом відповідних ручок комутатора можна встановити бажані масштаби кривих, а також зміщати їхні зображення вгору та вниз від нейтралі, тобто розташовувати відповідно до вимог експерименту.

Практичні роботи з дослідження фільтрів нижніх та верхніх частот другого порядку на базі ОППС, автоколивального генератора прямокутних імпульсів та генератора синусоїдальних коливань на базі ОППС можна також провести у програмному середовищі схмотехнічного моделювання Multisim з пакету NI Circuit Design Suite.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ НИЖНІХ ЧАСТОТ ДРУГОГО ПОРЯДКУ НА БАЗІ ОППС

Мета роботи: експериментально перевірити основні функціональні залежності щодо принципів роботи та отримати практичні навички щодо методів та способів дослідження фільтрів нижніх частот (ФНЧ) другого порядку на базі мікросхем ОППС.

Основні теоретичні відомості. Операційні підсилювачі постійного струму застосовують для створення активних фільтрів. Під активними фільтрами зазвичай розуміють підсилювачі, що містять RC-кола, включені таким чином, щоб у підсилювача з'являлись вибіркові властивості.

Фільтр нижніх частот – електронний або будь-який інший фільтр, який ефективно пропускає частотний спектр сигналу нижче певної частоти (частоти зрізу ω_3) та придушує частоти сигналу вище цієї частоти. Ступінь придушення кожної частоти залежить від виду фільтра.

Зі зростанням порядку фільтра його вибіркові властивості покращуються. На базі однієї мікросхеми ОППС достатньо легко схемотехнічно реалізується ФНЧ другого порядку. У практичній роботі досліджується ФНЧ другого порядку, який побудовано за схемою Саллена-Кі. Принципову схему досліджуваного фільтра наведено на рис. 1.1.

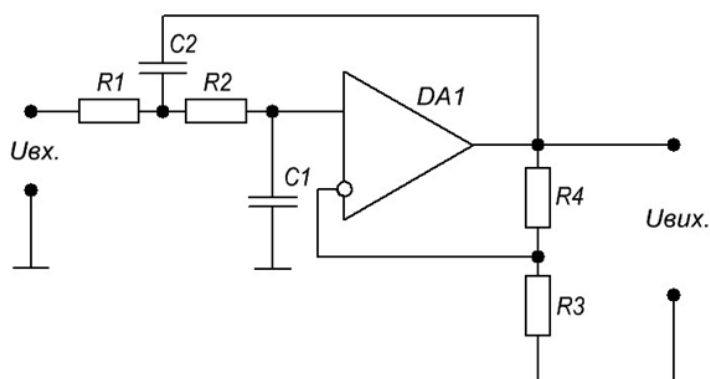


Рисунок 1.1 – Схема електрична принципова досліджуваного ФНЧ
другого порядку

Від'ємний зворотний зв'язок (ВЗЗ), який сформовано за допомогою дільника напруги R_4 та R_3 забезпечує коефіцієнт підсилення фільтру α , який розраховується за наступною формулою:

$$\alpha = \frac{R_4}{R_3} + 1 \quad (1.1)$$

Позитивний зворотний зв'язок (ПЗЗ) обумовлений наявністю конденсатора C_1 номінал, якого може бути обраний із наступної множини значень {1,2 нФ; 1,5 нФ; 3,9 нФ; 10 нФ} лабораторного стенду ОрАмр.

Передавальна характеристика досліджуваного ФНЧ описується рівнянням (1.2).

$$W(s) = \frac{\alpha}{1 + \omega_3[C_1(R_1 + R_2) + (1 - \alpha)R_1C_2]s + \omega_3^2 R_1 R_2 C_1 C_2 s^2}, \quad (1.2)$$

де $\omega_3 = 2\pi f_3$ – кутова частота зрізу фільтра, с^{-1} ;

f_3 – частота зрізу, Гц;

$s = j\omega/\omega_3$ – комплексна частотно-залежна змінна;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота, с^{-1} ;

C_1, C_2 – ємність конденсаторів, які використано для побудови фільтру, вибираються із відповідних множин $C_1 = \{1,2 \text{ нФ}; 1,5 \text{ нФ}; 3,9 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}\}$ та $C_2 = \{1,2 \text{ нФ}; 1,5 \text{ нФ}; 3,9 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}\}$ лабораторного стенду ОрАмр;

R_1, R_2, R_3, R_4 – опори резисторів, які використано для побудови фільтру, відповідно для лабораторного стенду ОрАмр вони рівні: 10 кОм, 10 кОм, 3,9 кОм, 4,3 кОм.

Основною характеристикою активних ФНЧ є частота зрізу f_3 , яка на підставі параметрів схеми розраховується за формулою (1.3).

Частота зрізу фільтра – це частота, на якій спостерігається зменшення коефіцієнта передачі фільтра на 3 дБ у порівнянні з коефіцієнтом передачі в смузі пропускання.

$$f_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad (1.3)$$

де R_1, R_2, C_1, C_2 – схемні параметри.

Підстановкою комплексної частотно-залежної змінної $s = j\omega/\omega_3$ у рівняння (1.2) отримаємо частотну передавальну характеристику $W(j\omega)$, яка є комплексним виразом:

$$W(j\omega) = Re(W(j\omega)) + Im(W(j\omega)), \quad (1.4)$$

де $Re(W(j\omega))$ – дійсна частина частотної передавальної характеристики;

$Im(W(j\omega))$ – уявна частина частотної передавальної характеристики.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – залежність відношення амплітуди вихідного сигналу до амплітуди вхідного сигналу від частоти і визначається як модуль частотної передавальної характеристики $W(j\omega)$:

$$A(\omega) = \sqrt{Re(W(j\omega))^2 + Im(W(j\omega))^2} \quad (1.5)$$

Логарифмічна АЧХ (ЛАЧХ) – залежність десятичного логарифма АЧХ від частоти (вимірюється у децибелах, дБ):

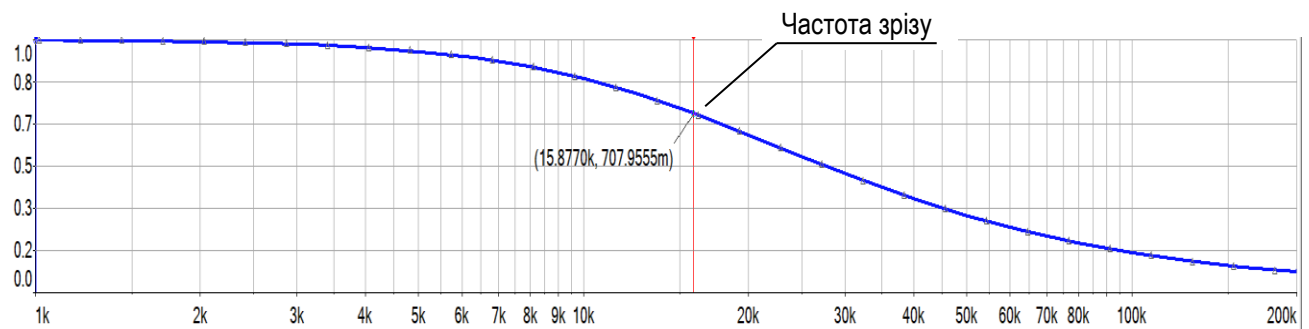
$$L(\omega) = 20\lg(A(\omega)) \quad (1.6)$$

Фазо-частотна характеристика (ФЧХ) – залежність зсуву за фазою вихідного сигналу стосовно вхідного сигналу від частоти визначається як аргумент частотної передавальної характеристики $W(j\omega)$:

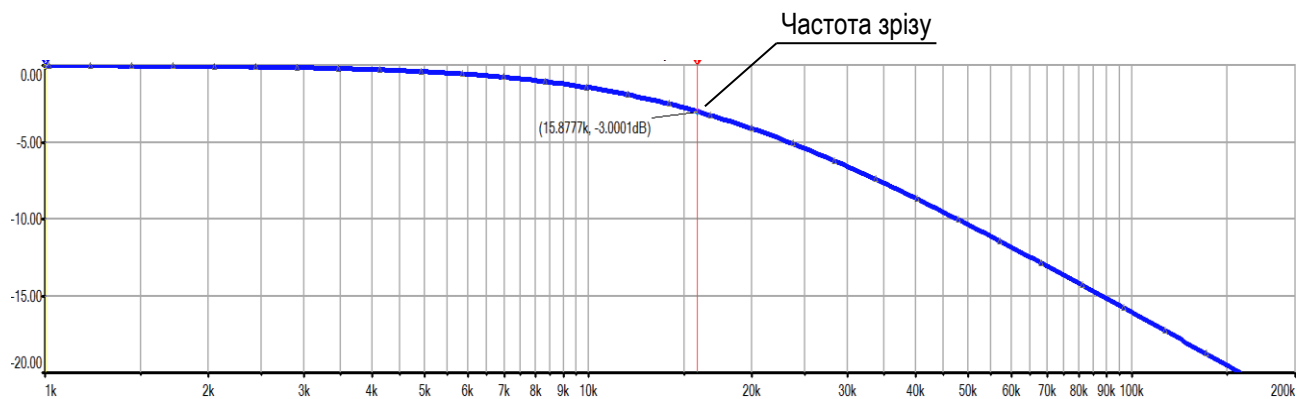
$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{\text{Im}(W(j\omega))}{\text{Re}(W(j\omega))} \right) \quad (1.7)$$

Загальний вигляд АЧХ, ЛАЧХ та ФЧХ наведено на рис. 1.2, а-в, відповідно.

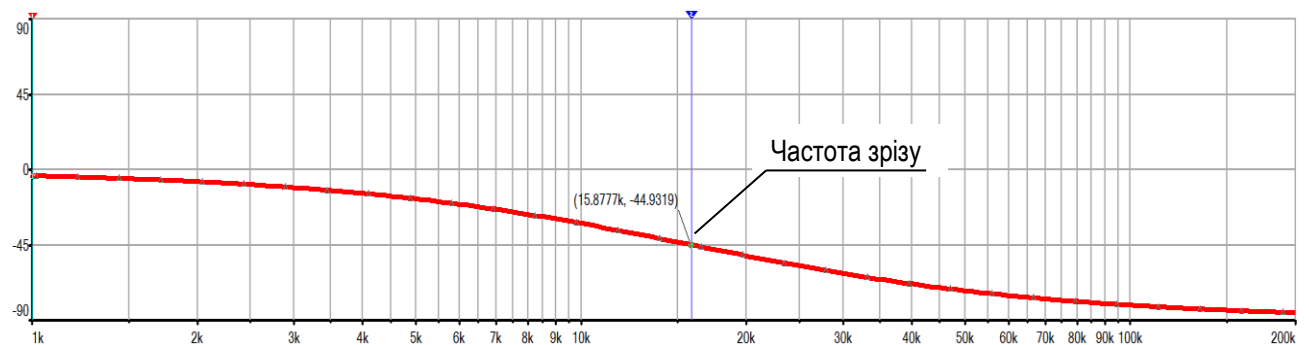
Частотні характеристики фільтра, які наведено на рис. 1.2, отримано шляхом моделювання в програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2 – АЧХ (а), ЛАЧХ (б) та ФЧХ (в) ФНЧ

Порядок виконання роботи із застосуванням стенду OpAmp:

1. Зібрати схему досліджуваного ФНЧ другого порядку (рис. 1.1). Схемні параметри задаються викладачем перед початком виконання експериментальних досліджень (по два варіанти для кожної підгрупи студентів).

2. Підключити до входу ФНЧ генератор синусоїдальної напруги, а до виходу необхідні контрольно-вимірювальні прилади.

3. Встановити діюче значення напруги на вході ФНЧ ($U_{вх}$) рівним 1 В.

4. Зняти експериментальну залежність вихідної напруги фільтра ($U_{вих}$) від напруги на вході ФНЧ ($U_{вх}$) в діапазоні частот від 20 Гц до 100 кГц. Діюче значення напруги на вході має залишатись незмінним протягом усього експерименту. Результати дослідів занести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати експериментальних досліджень ФНЧ другого порядку

$f, \text{Гц}$	20	200	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$
$U_{вх}, \text{В}$									
$U_{вих}, \text{В}$									
$W(s)$									

5. Повторити п. 3 та п. 4 для другого варіанту схемних параметрів.

6. За результатами двох дослідів за даними таблиці 1.1 розрахувати та побудувати АЧХ досліджуваного ФНЧ другого порядку $A(\omega) = U_{вих}(\omega)/U_{вх}(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$. Шкалу частоти за горизонтальною віссю прийняти логарифмічну.

7. На графічних залежностях $A(\omega)$ та $L(\omega)$ визначити значення частоти зрізу f_z і коефіцієнту підсилення фільтра α на цій частоті.

8. Для кожного дослідів виконати теоретичний розрахунок коефіцієнту підсилення фільтра α , частоти зрізу f_z , АЧХ $A(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega)$ та ФЧХ $\varphi(\omega)$ за формулами (1.1, 1.3, 1.5, 1.6, 1.7). За результатами розрахунків побудувати

графічні зображення $A(\omega)$, $L(\omega)$, $\varphi(\omega)$ та вказати на них частоту зрізу f_3 і коефіцієнт підсилення фільтра α на цій частоті.

9. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних, теоретичних розрахунків та графічних залежностей.

Порядок виконання роботи із застосуванням програмного середовища схемотехнічного моделювання Multisim:

Схема, яка представлена на рис. 1.1, дозволяє за допомогою резисторів R_3 та R_4 встановлювати коефіцієнт підсилення α незалежно від частотних характеристик фільтру. Однак зазвичай використовується її варіант з одиничним коефіцієнтом підсилення $\alpha = 1$, що забезпечує високу точність та низьке значення добротності $Q < 3$. В цьому випадку резистивний дільник напруги у колі НЗЗ можна виключити (рис. 1.3).

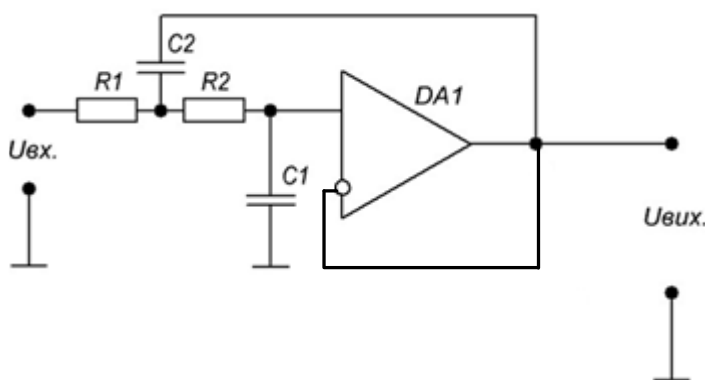


Рисунок 1.3 – Схема електрична принципова досліджуваного ФНЧ другого порядку одиничним коефіцієнтом підсилення

Для схеми з $\alpha = 1$ передавальна характеристика досліджуваного ФНЧ має вигляд:

$$W(s) = \frac{1}{1 + \omega_3 C_1 (R_1 + R_2) s + \omega_3^2 R_1 R_2 C_1 C_2 s^2} \quad (1.8)$$

А за умови, що $R_1 = R_2 = R$ і $C_1 = C_2 = C$ вона додатково спрощується:

$$W(s) = \frac{1}{1 + \omega_3 2CRs + \omega_3^2 R^2 C^3 s^2}, \quad (1.9)$$

Частота зрізу f_3 в цьому випадку визначається як:

$$f_3 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (1.10)$$

1. У програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim зібрати схему (рис.1.4) досліджуваного ФНЧ другого порядку з одиничним коефіцієнтом підсилення $\alpha=1$ (рис.1.3).

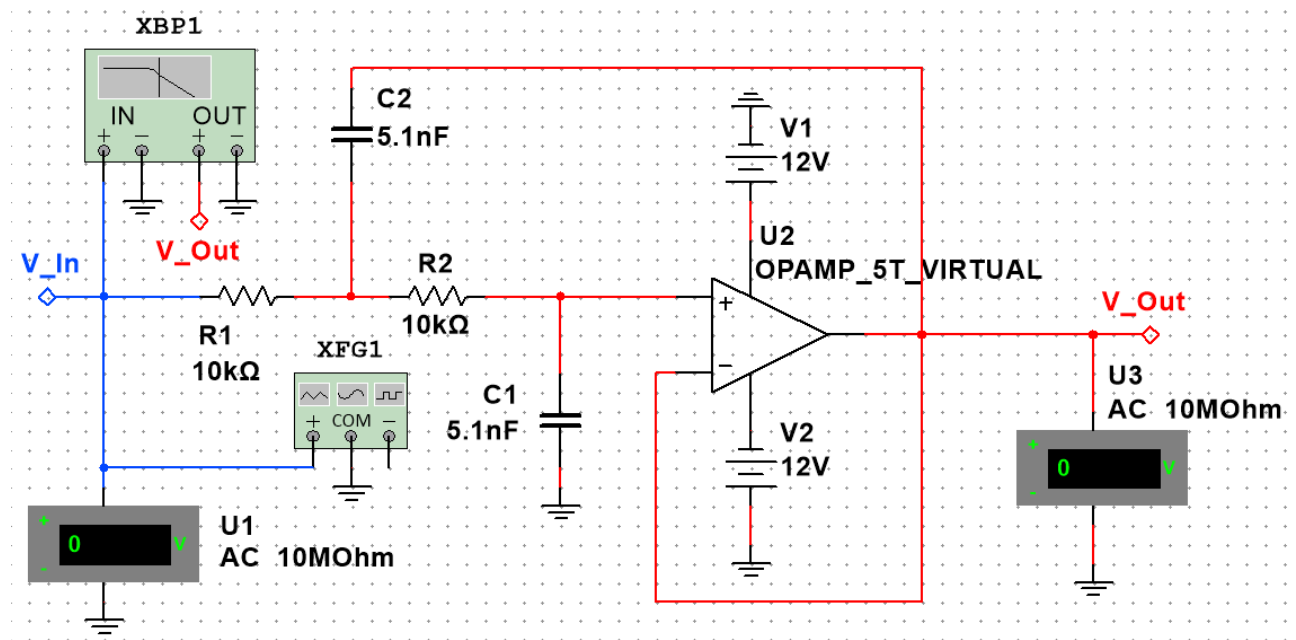


Рисунок 1.4 – Схема досліджуваного ФНЧ другого порядку у програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim

2. Величини ємності конденсаторів $C_1=C_2=C$ задаються викладачем з множини $C=\{5,1 \text{ нФ}; 5,6 \text{ нФ}; 6,2 \text{ нФ}; 6,8 \text{ нФ}; 7,5 \text{ нФ}; 8,2 \text{ нФ}; 9,1 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}; 11 \text{ нФ}; 12 \text{ нФ}; 13 \text{ нФ}; 15 \text{ нФ}\}$ для кожної підгрупи студентів. Опори резисторів прийняти $R_1=R_2=R=10 \text{ кОм}$.

3. Встановити діюче значення напруги на вході ФНЧ (U_{ex}) рівним 1 В.

4. Зняти експериментальну залежність вихідної напруги фільтра ($U_{вих}$) від напруги на вході ФНЧ ($U_{вх}$) в діапазоні частот від 20 Гц до 100 кГц. Діюче значення напруги на вході має залишатись незмінним протягом усього експерименту. Результати дослідів занести до табл. 1.1.

5. За допомогою плоттера Бode визначити ЛАЧХ досліджуваного ФНЧ та значення коефіцієнту підсилення ФНЧ на частоті зрізу f_z . Зробити знімок з екрану. Значення f_z розрахувати за формулою (1.10).

6. Змінити налаштування режиму симуляції програмного середовища схемотехнічного моделювання Multisim з Interactive Simulation на AC Sweep та встановити його параметри, як вказано на (рис.1.5);

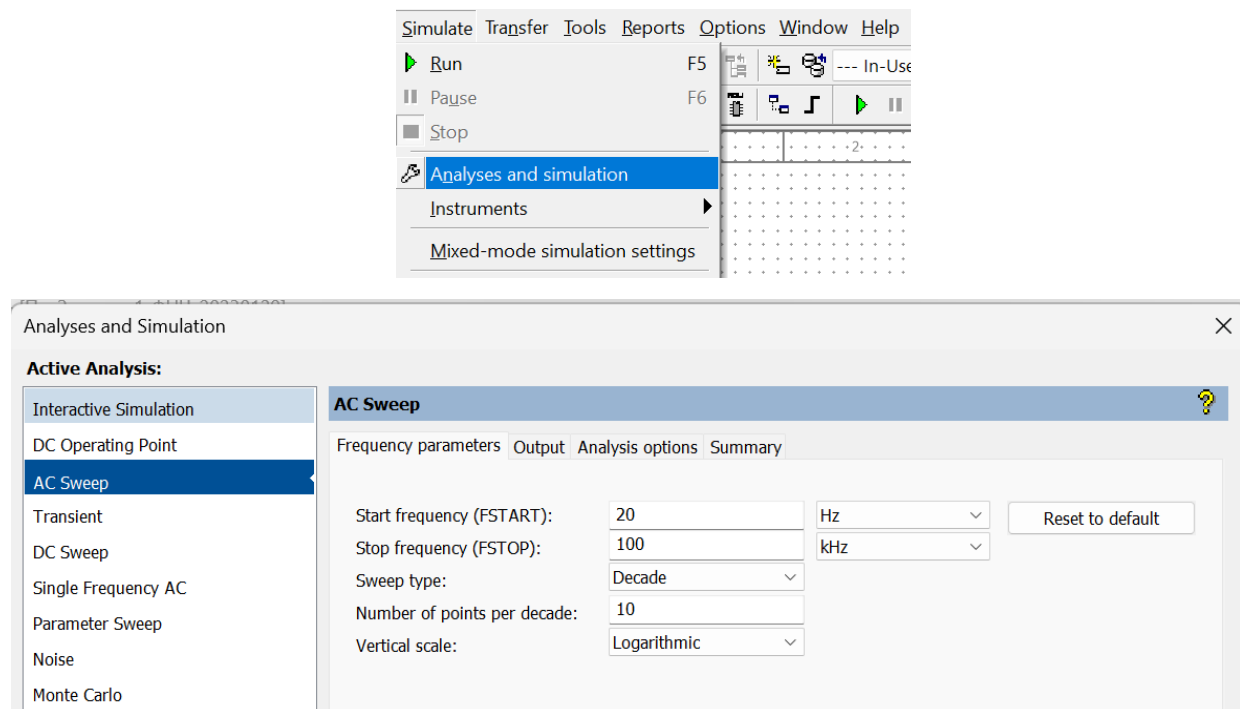


Рисунок 1.5 – Параметри режиму симуляції AC Sweep

7. На вкладці Output (рис.1.6) з переліку змінних Variables in circuit вибрати змінну $V(v_out)$ для аналізу, додати її у секцію Selected variables for analysis та натиснути кнопку Run для відображення АЧХ та ФЧХ досліджуваного ФНЧ.

8. У вікні Grafer View увімкнути Show grid i Show cursors. На діаграмі з АЧХ налаштувати формат відображення коефіцієнта підсилення ФНЧ за лівою віссю (Left axis) у режимі Linear. Встановити курсор на позначку, що відповідає

частоті f_3 та визначити коефіцієнт підсилення ФНЧ α на цій частоті і додати дані до курсора. Зробити знімок з екрану, або за допомогою пункту меню File-Print preview зберегти зображення АЧХ у PDF файл (рис.1.7, а).

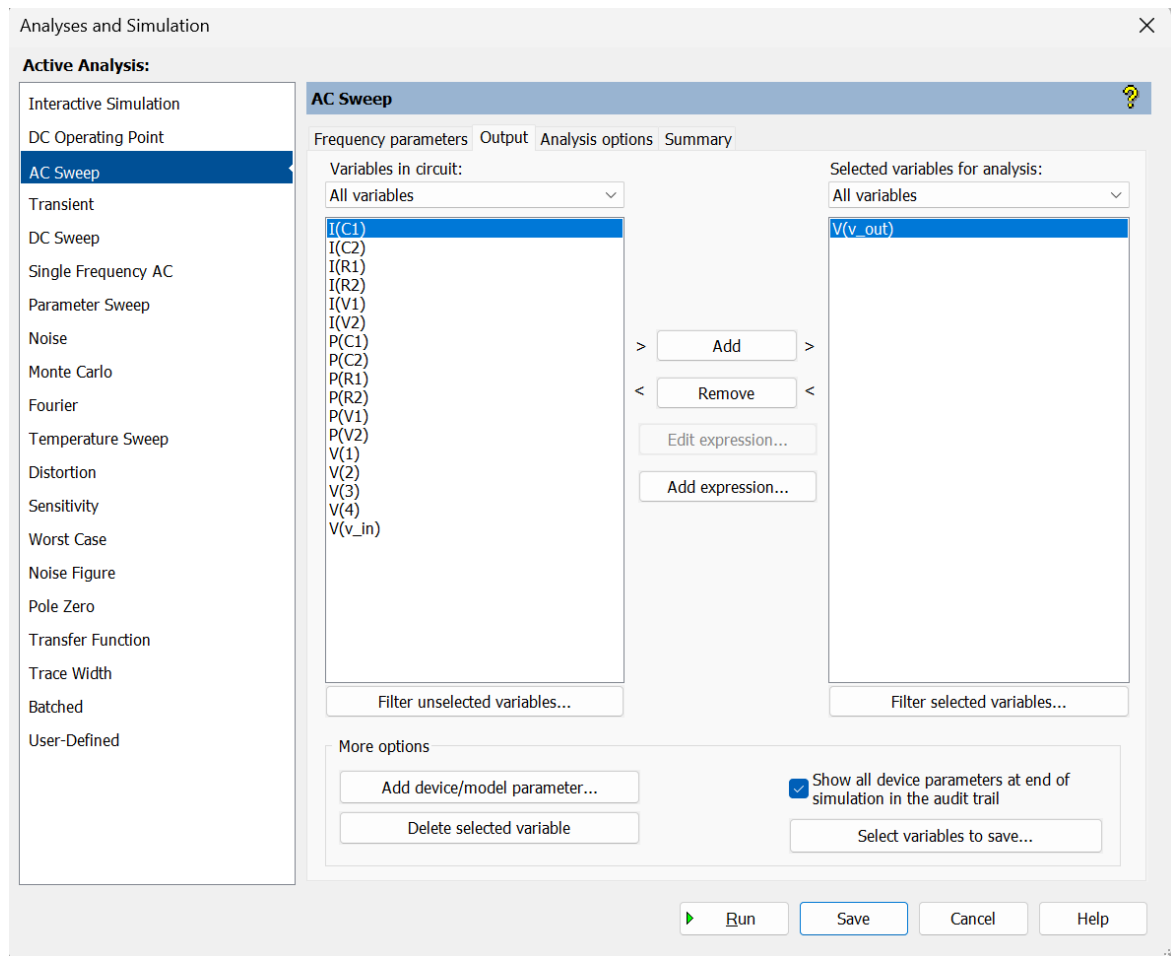
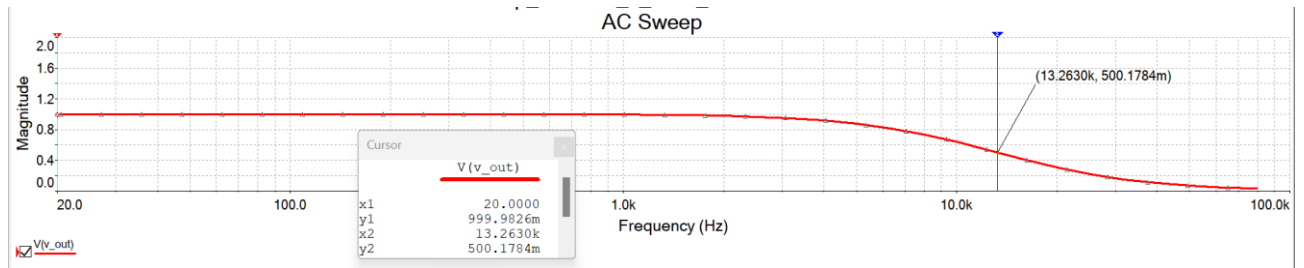


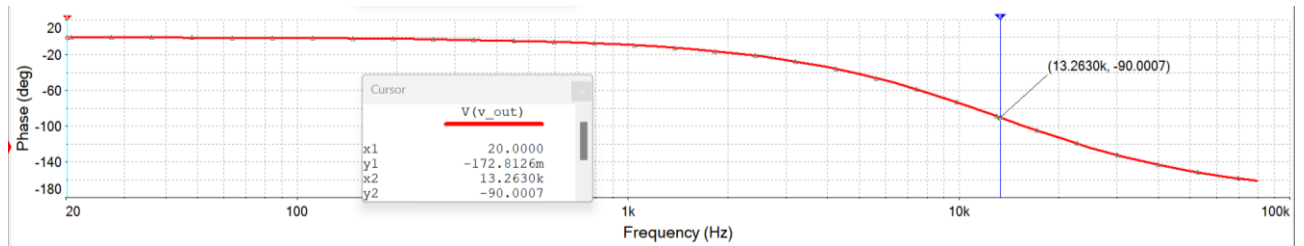
Рисунок 1.6 – Вибір змінної V(v_out) для аналізу

9. На ФЧХ досліджуваного ФНЧ визначити фазу вихідного сигналу на резонансній частоті f_3 . Додати дані до курсора. Зробити знімок з екрану, або за допомогою меню File-Print preview зберегти зображення ФЧХ у PDF файл (рис.1.7, б).

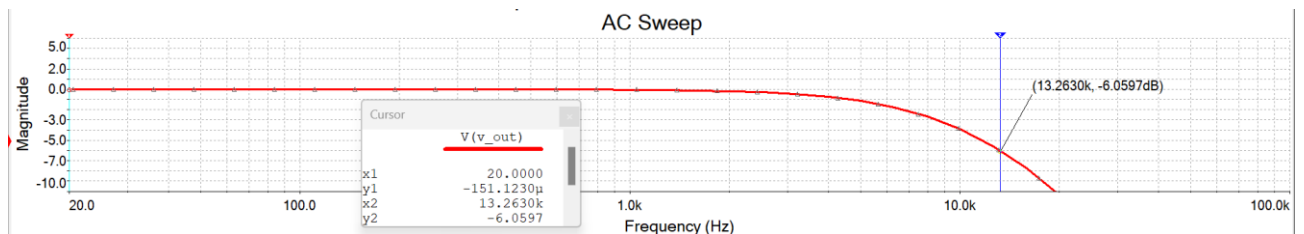
10. На діаграмі з АЧХ налаштувати формат відображення коефіцієнта підсилення ФНЧ за лівою віссю (Left axis) у режимі Decibels. Встановити курсор на позначку, що відповідає частоті f_3 та визначити коефіцієнт підсилення ФНЧ α на цій частоті і додати дані до курсора. Зробити знімок з екрану, або за допомогою меню File-Print preview зберегти зображення ЛАЧХ у PDF файл (рис.1.7, в).



a)



б)



в)

Рисунок 1.7 – АЧХ (а), ФЧХ (б) та ЛАЧХ (в) досліджуваного ФНЧ

11. За результатами моделювання в Multisim (табл.1.1), розрахувати та побудувати АЧХ досліджуваного ФНЧ другого порядку $A(\omega) = U_{вих}(\omega)/U_{вх}(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$. Шкалу частоти за горизонтальною віссю прийняти логарифмічну.

12. На графічних залежностях $A(\omega)$ та $L(\omega)$ визначити значення частоти зрізу f_z і коефіцієнту підсилення фільтра α на цій частоті.

13. Виконати теоретичний розрахунок коефіцієнту підсилення фільтра α , частоти зрізу f_z , АЧХ $A(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega)$ та ФЧХ $\phi(\omega)$ за формулами (1.1, 1.3, 1.5, 1.6, 1.7). За результатами розрахунків побудувати графічні зображення $A(\omega)$, $L(\omega)$, $\phi(\omega)$ та вказати на них частоту зрізу f_z і коефіцієнт підсилення фільтра α на цій частоті.

14. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних,

теоретичних розрахунків та графічних залежностей.

Зміст звіту:

1. Схема досліджуваного ФНЧ другого порядку із зазначенням основних переваг порівняно з іншими схемотехнічними рішеннями.
2. Експериментальні дані, які зведено до таблиць та знімки з екрану.
3. Результати теоретичних розрахунків із коментарями до них.
4. Графічне зображення АЧХ, ЛАЧХ та ФЧХ ФНЧ другого порядку за результатами експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків.
5. Порівняльний аналіз результатів теоретичних розрахунків та отриманих експериментальних даних.
6. Висновки, які мають містити кількісний та якісний аналіз отриманих результатів досліджень.

Контрольні питання:

1. Дайте визначення терміну фільтр нижніх частот.
2. Назвіть відмінні риси активних ФНЧ.
3. Від яких параметрів залежить коефіцієнт передачі досліджуваного ФНЧ другого порядку?
4. У чому полягає фізичний зміст поняття «частота зрізу»? На якому рівні визначається частота зрізу досліджуваного фільтра?
5. Запишіть формулу для визначення частоти зрізу ФНЧ при $\alpha=1$, $\alpha > 1$ та охарактеризуйте параметри, які до неї входять.
6. Який фізичний зміст закладено у АЧХ та ФЧХ фільтра?

Рекомендована література: [3, 4, 7, 8, 9, 10, 11]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ ВЕРХНІХ ЧАСТОТ ДРУГОГО ПОРЯДКУ НА БАЗІ ОППС

Мета роботи: експериментально перевірити основні функціональні залежності щодо принципів роботи та отримати практичні навички щодо методів та способів дослідження фільтрів верхніх частот (ФВЧ) другого порядку на базі мікросхем ОППС.

Основні теоретичні відомості. Від ФНЧ можна перейти до аналогічних ФВЧ. Цей перехід здійснюється шляхом дзеркального відображення амплітудно-частотної характеристики фільтра, яку представлено в логарифмічному масштабі, відносно частоти зрізу ω_z , тобто шляхом заміни ω_z на $1/\omega_z$. При цьому значення самої частоти зрізу залишається незмінним.

Фільтр верхніх частот – електронний або будь-який інший фільтр, що пропускає частотний спектр сигналу вище частоти зрізу (ω_z), при цьому придушуючи частоти сигналу нижче цієї частоти. Ступінь придушення кожної частоти залежить від виду фільтра.

Зі зростанням порядку фільтра його вибіркові властивості покращуються. На базі однієї мікросхеми ОППС достатньо легко схемотехнічно реалізується ФВЧ другого порядку. У практичній роботі досліджується ФВЧ другого порядку, який побудовано за схемою Саллена-Кі. Такий тип фільтру отримано шляхом заміни місцями конденсаторів (C_1, C_2) та резисторів (R_1, R_2) у схемі ФНЧ, яку наведено на рис. 1.1. Таким чином, отримуємо схему ФВЧ другого порядку, яку представлено на рис. 2.1.

ВЗЗ, який сформовано за допомогою діляника напруги ($R_4=4,3$ кОм та $R_3=3,9$ кОм) забезпечує коефіцієнт підсилення, який розраховується за формулою (1.1).

ПЗЗ, обумовлений наявністю резистора R_1 , номінал якого в

досліджуваній схемі (див. рис. 2.1) є фіксованим і дорівнює 10 кОм.

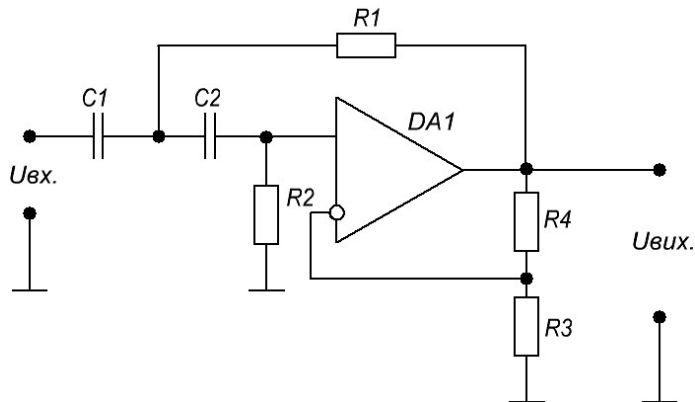


Рисунок 2.1 – Схема електрична принципова досліджуваного ФВЧ другого порядку

Передавальна характеристика досліджуваного ФВЧ другого порядку описується рівнянням (2.1).

$$W(s) = \frac{\alpha}{1 + \frac{R_1(C_1 + C_2) + (1 - \alpha)R_2C_2}{\omega_3 R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{\omega_3^2 R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{s^2}}, \quad (2.1)$$

де $\omega_3 = 2\pi f_3$ – кутова частота зрізу фільтра, с^{-1} ;

α – коефіцієнт підсилення фільтра, що розраховується за формулою (2.1);

C_1, C_2 – ємність конденсаторів, які використано для побудови фільтра, вибираються із відповідних множин $C_1 = \{1,2 \text{ нФ}; 1,5 \text{ нФ}; 3,9 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}\}$ та $C_2 = \{1,2 \text{ нФ}; 1,5 \text{ нФ}; 3,9 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}\}$;

R_1, R_2, R_3, R_4 – опори резисторів, які використано для побудови фільтра, відповідно рівні: 10 кОм, 10 кОм, 3,9 кОм, 4,2 кОм.

Основною характеристикою активних ФВЧ, як і ФНЧ, є частота зрізу f_3 , яка на підставі параметрів схеми розраховується за формулою (1.3).

Підстановкою комплексної частотно-залежної змінної $s = j\omega/\omega_3$ у рівняння (2.1) отримаємо частотну передавальну характеристику – $W(j\omega)$, рівняння (1.4), АЧХ – $A(\omega)$, рівняння (1.5), ЛАЧХ – $L(\omega)$, рівняння (1.6) та ФЧХ – $\varphi(\omega)$, рівняння (1.7).

Загальний вигляд АЧХ, ЛАЧХ та ФЧХ наведено на рис. 2.2, а-в, відповідно. Частотні характеристики фільтра, які наведено на рис. 2.2, отримано шляхом моделювання в програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim.

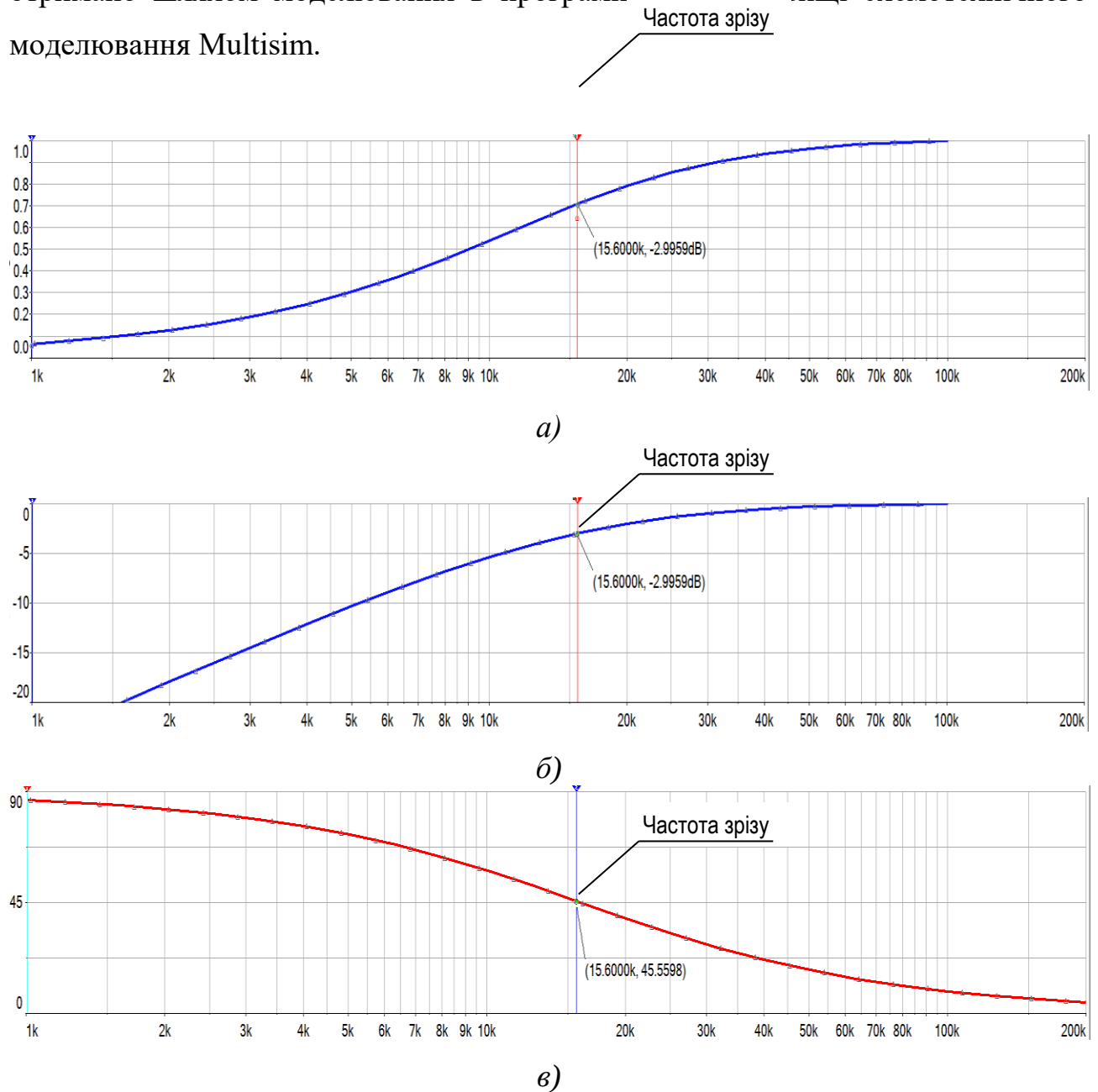


Рисунок 2.2 – АЧХ (а), ЛАЧХ (б) та ФЧХ (в) ФВЧ

Порядок виконання роботи із застосуванням стенду OpAmp:

1. Зібрати схему досліджуваного ФВЧ другого порядку (рис. 2.1). Схемні параметри задаються викладачем перед початком виконання експериментальних досліджень (по два варіанти для кожної підгрупи).
2. Підключити до входу ФВЧ генератор синусоїдальної напруги, а до

виходу необхідні контрольно-вимірювальні пристрої.

3. Встановити діюче значення напруги на вході ФВЧ ($U_{вх.}$) рівним 1 В.

4. Зняти експериментальну залежність вихідної напруги фільтра ($U_{вих}$) від напруги на вході ФВЧ ($U_{вх.}$) в діапазоні частот від 20 Гц до 100 кГц. Діюче значення напруги на вході має залишатись незмінним протягом усього експерименту. Результати дослідів занести до табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – – Результати експериментальних досліджень ФВЧ другого порядку

$f, \text{Гц}$	20	200	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$
$U_{вх.}, \text{В}$									
$U_{вих.}, \text{В}$									
$W(s)$									

5. Повторити п. 3 та п. 4 для другого варіанту схемних параметрів.

6. За результатами двох дослідів за даними таблиці 2.1 розрахувати та побудувати АЧХ досліджуваного ФНЧ другого порядку $A(\omega) = U_{вих}(\omega)/U_{вх}(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$. Шкалу частоти за горизонтальною віссю прийняти логарифмічну.

7. На графічних залежностях $A(\omega)$ та $L(\omega)$ визначити значення частоти зрізу f_z і коефіцієнту підсилення фільтра α на цій частоті.

8. Для кожного дослідів виконати теоретичний розрахунок коефіцієнту підсилення фільтра α , частоти зрізу f_z , АЧХ $A(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega)$ та ФЧХ $\varphi(\omega)$ за формулами (1.1, 1.3, 1.5, 1.6, 1.7). За результатами розрахунків побудувати графічні зображення $A(\omega)$, $L(\omega)$, $\varphi(\omega)$ та вказати на них частоту зрізу f_z і коефіцієнт підсилення фільтра α на цій частоті.

9. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних, теоретичних розрахунків та графічних залежностей.

10. Перевірити факт співпадіння частоти зрізу f_z ФВЧ з отриманим значенням для ФНЧ у попередній практичній роботі.

Порядок виконання роботи із застосуванням програмного середовища схемотехнічного моделювання Multisim:

Схема, яка представлена на рис. 2.1, дозволяє за допомогою резисторів R_3 та R_4 встановлювати коефіцієнт підсилення α незалежно від частотних характеристик фільтру. Фільтр з одиничним коефіцієнтом підсилення $\alpha = 1$, зазвичай використовується при необхідності отримання високої точності при низькому значенні добротності фільтра Q . В цьому випадку резистивний дільник напруги у колі НЗЗ можна виключити (рис. 2.3).

Для схеми з $\alpha = 1$ передавальна характеристика досліджуваного ФНЧ має вигляд:

$$W(s) = \frac{\alpha}{1 + \frac{R_1(C_1 + C_2)}{\omega_3 R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{\omega_3^2 R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{s^2}}, \quad (2.2)$$

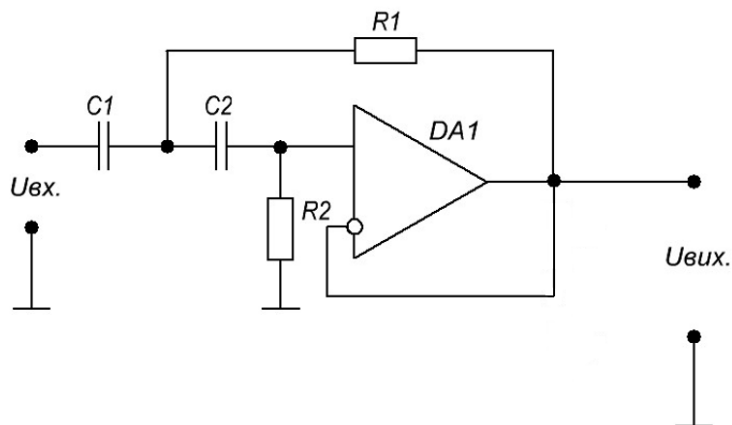


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова досліджуваного ФВЧ другого порядку одиничним коефіцієнтом підсилення

А за умови, що $R_1 = R_2 = R$ і $C_1 = C_2 = C$ вона додатково спрощується:

$$W(s) = \frac{\alpha}{1 + \frac{2}{\omega_3 RC} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{\omega_3^2 R^2 C^2} \cdot \frac{1}{s^2}}, \quad (2.2)$$

Частота зрізу f_3 в цьому випадку визначається за формулою (1.10).

1. У програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim зібрати схему (рис.2.4) досліджуваного ФВЧ другого порядку з одиничним коефіцієнтом підсилення $\alpha=1$ (рис.2.3).

2. Величини ємності конденсаторів $C_1=C_2=C$ задаються викладачем з множини $C=\{5,1 \text{ нФ}; 5,6 \text{ нФ}; 6,2 \text{ нФ}; 6,8 \text{ нФ}; 7,5 \text{ нФ}; 8,2 \text{ нФ}; 9,1 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}; 11 \text{ нФ}; 12 \text{ нФ}; 13 \text{ нФ}; 15 \text{ нФ}\}$ для кожної підгрупи студентів. Опори резисторів прийняти $R_1=R_2=R=10 \text{ кОм}$.

3. Встановити діюче значення напруги на вході ФВЧ ($U_{\text{вх}}$) рівним 1 В.

4. Зняти експериментальну залежність вихідної напруги фільтра ($U_{\text{вих}}$) від напруги на вході ФВЧ ($U_{\text{вх}}$) в діапазоні частот від 20 Гц до 100 кГц. Діюче значення напруги на вході має залишатись незмінним протягом усього експерименту. Результати дослідів занести до табл. 2.1.

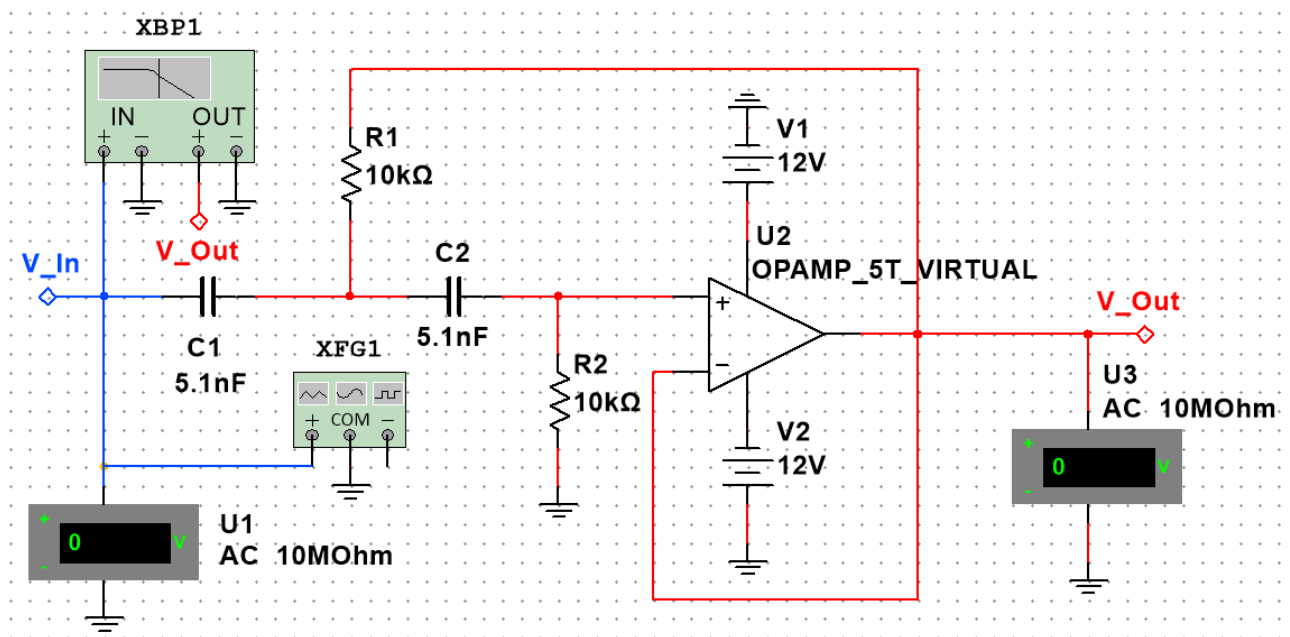


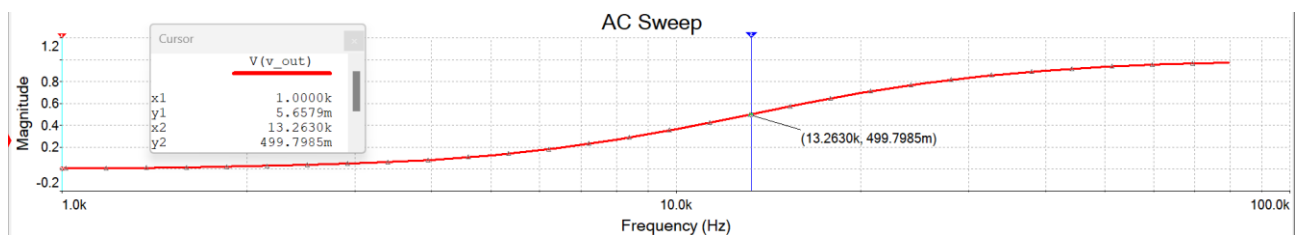
Рисунок 2.4 – Схема досліджуваного ФВЧ другого порядку у програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim

5. За допомогою плоттера Бодє визначити АЧХ досліджуваного ФВЧ та значення коефіцієнту підсилення ФВЧ на частоті зрізу f_3 . Зробити знімок з екрану. Значення f_3 розрахувати за формулою (1.10).

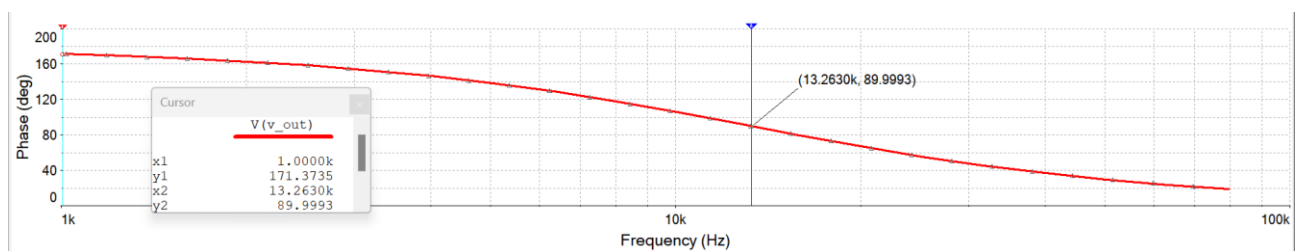
6. Змінити налаштування режиму симуляції програмного середовища схемотехнічного моделювання Multisim з Interactive Simulation на AC Sweep та встановити його параметри, як вказано на (рис.1.5);

7. На вкладці Output (рис.1.6) з переліку змінних Variables in circuit вибрати змінну V(v_out) для аналізу, додати її у секцію Selected variables for analysis та натиснути кнопку Run для відображення АЧХ та ФЧХ досліджуваного ФВЧ.

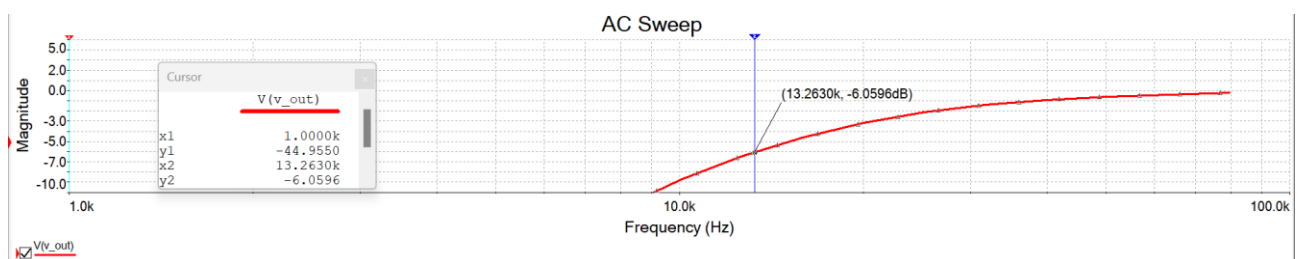
8. У вікні Grafer View увімкнути Show grid i Show cursors. На діаграмі з АЧХ налаштувати формат відображення коефіцієнта підсилення ФВЧ за лівою віссю (Left axis) у режимі Linear. Встановити курсор на позначку, що відповідає частоті f_3 та визначити коефіцієнт підсилення ФВЧ α на цій частоті і додати дані до курсора. Зробити знімок з екрану, або за допомогою пункту меню File-Print preview зберегти зображення АЧХ у PDF файл (рис.2.5, а).



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 – АЧХ (а), ФЧХ (б) та ЛАЧХ (в) досліджуваного ФВЧ

9. На ФЧХ досліджуваного ФВЧ визначити фазу вихідного сигналу на резонансній частоті f_z . Додати дані до курсора. Зробити знімок з екрану, або за допомогою меню File-Print preview зберегти зображення ФЧХ у PDF файл (рис.2.5, б).

10. На діаграмі з АЧХ налаштувати формат відображення коефіцієнта підсилення ФВЧ за лівою віссю (Left axis) у режимі Decibels. Встановити курсор на позначку, що відповідає частоті f_z та визначити коефіцієнт підсилення ФВЧ α на цій частоті і додати дані до курсора. Зробити знімок з екрану, або за допомогою меню File-Print preview зберегти зображення ЛАЧХ у PDF файл (рис.2.5, в).

11. За результатами моделювання в Multisim (табл.2.1), розрахувати та побудувати АЧХ досліджуваного ФВЧ другого порядку $A(\omega) = U_{\text{вих}}(\omega)/U_{\text{вх}}(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$. Шкалу частоти за горизонтальною віссю прийняти логарифмічну.

12. На графічних залежностях $A(\omega)$ та $L(\omega)$ визначити значення частоти зрізу f_z і коефіцієнту підсилення фільтра α на цій частоті.

13. Виконати теоретичний розрахунок коефіцієнту підсилення фільтра α , частоти зрізу f_z , АЧХ $A(\omega)$, ЛАЧХ $L(\omega)$ та ФЧХ $\varphi(\omega)$ за формулами (1.1, 1.10, 1.5, 1.6, 1.7) для передавальної характеристики ФВЧ (2.2). За результатами розрахунків побудувати графічні зображення $A(\omega)$, $L(\omega)$, $\varphi(\omega)$ та вказати на них частоту зрізу f_z і коефіцієнт підсилення фільтра α на цій частоті.

14. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних, теоретичних розрахунків та графічних залежностей.

15. Перевірити факт співпадіння частоти зрізу f_z ФВЧ з отриманим значенням для ФНЧ у попередній практичній роботі.

Зміст звіту:

1. Схема досліджуваного ФВЧ другого порядку із зазначенням основних переваг порівняно з іншими схемотехнічними рішеннями.

2. Експериментальні дані, які зведено до таблиць та знімки з екрану.
3. Результати теоретичних розрахунків із коментарями до них.
4. Графічне зображення АЧХ, ЛАЧХ та ФЧХ ФНЧ другого порядку за результатами експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків.
5. Порівняльний аналіз результатів теоретичних розрахунків та отриманих експериментальних даних.
6. Висновки, які мають містити кількісний та якісний аналіз отриманих результатів досліджень.

Контрольні питання:

1. Дайте визначення терміну фільтр верхніх частот.
2. Назвіть відмінні риси активних ФВЧ.
3. У чому полягає основна ідея схмотехнічного рішення отримання ФВЧ на базі аналогічного ФНЧ?
4. Від яких схемних параметрів залежить коефіцієнт передачі досліджуваного ФВЧ другого порядку?
5. На якому рівні визначається частота зрізу досліджуваного фільтра ФВЧ? Чи відрізняється вона від аналогічного значення для ФНЧ?
6. Запишіть формулу для визначення частоти зрізу ФВЧ при $\alpha=1$, $\alpha > 1$ та охарактеризуйте параметри, які до неї входять.
7. Який фізичний зміст закладено у АЧХ та ФЧХ фільтра?

Рекомендована література: [3, 4, 7, 8, 9, 10, 11]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРЯМОКУТНИХ ІМПУЛЬСІВ НА БАЗІ ОППС

Мета роботи: експериментально перевірити основні функціональні залежності щодо принципів роботи та отримати практичні навички щодо методів і способів дослідження автоколивального генератора (мультивібратора) на базі мікросхем ОППС.

Основні теоретичні відомості. *Мультивібратор* – це релаксаційний генератор електричних прямокутних коливань із короткими фронтами. Такий тип пристроїв є одним із найбільш поширених генераторів імпульсів прямокутної форми, який широко використовується в електронних та радіотехнічних системах.

В електронній техніці використовуються різноманітні схмотехнічні рішення щодо побудови мультивібраторів, які розрізняються між собою за типом активних компонентів, що використовуються: транзисторні, тиристорні, мікроелектронні та ін.; за режимом роботи: автоколивальні, очікувальні, із зовнішньою синхронізацією; за видом зв'язку між підсилювальними елементами; за способом регулювання тривалості й частоти генерованих імпульсів та іншими параметрами.

У даній практичній роботі дослідженню підлягає автоколивальний мультивібратор на базі мікросхеми ОППС. Принципову схему досліджуваного мультивібратора на базі ОППС наведено на рис. 3.1.

Такий мультивібратор складається з інвертуючого тригера Шмітта, який охоплено ВЗЗ за допомогою інтегруючої RC-ланки (див. рис. 3.1).

Коли напруга на конденсаторі U_C досягає одного з порогів спрацьовування, схема перемикається та її вихідна напруга стрибком приймає протилежне значення. При цьому конденсатор починає перезаряджатися в протилежному напрямку до тих пір, поки напруга на ньому не досягне другого

порогу спрацьовування. У цей момент схема перемикається в початковий стан, як показано на часовій діаграмі роботи мультивібратора на рис. 3.2. Типовий вигляд часових діаграм отримано шляхом моделювання в програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim.

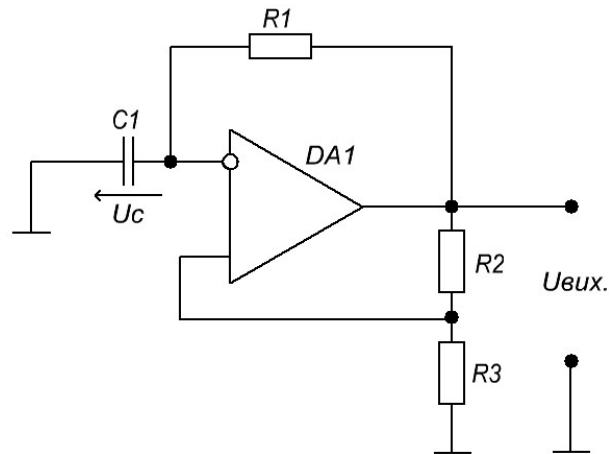


Рисунок 3.1 – Схема електрична принципова досліджуваного автоколивального генератора (мультивібратора)

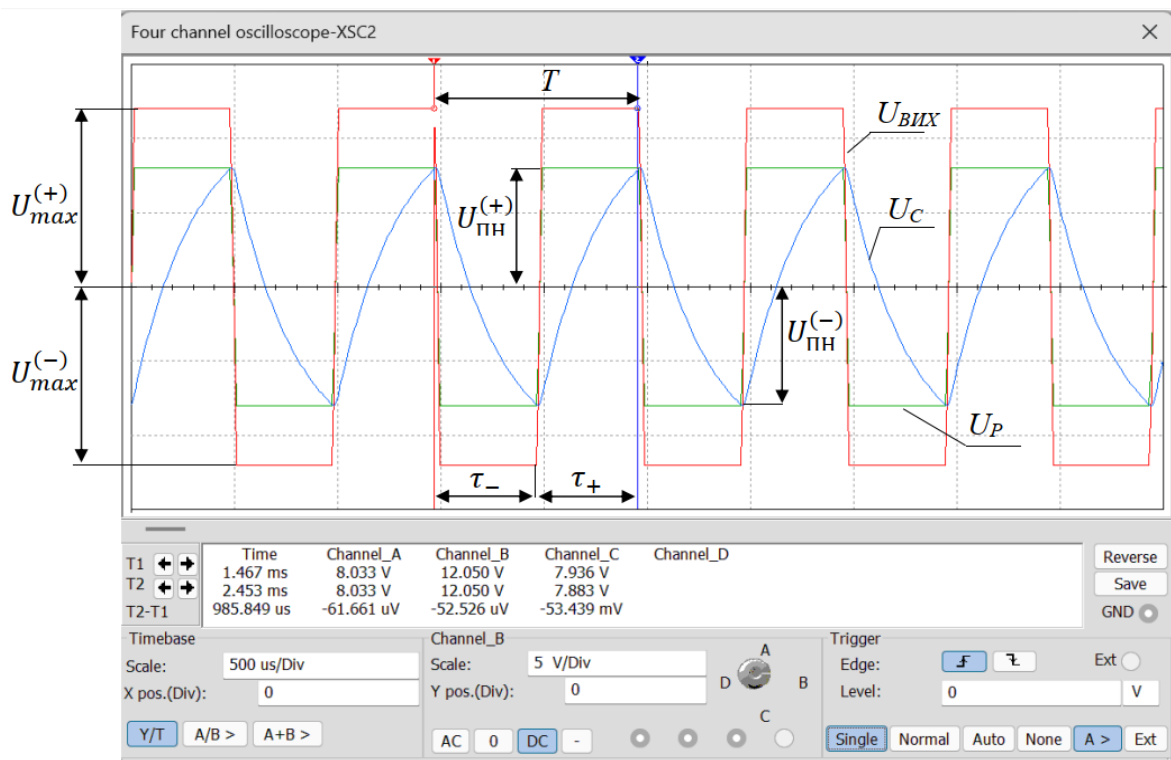


Рисунок 3.2 – Типова часова діаграма роботи автоколивального генератора (T – період коливання, τ_+ – тривалість позитивного імпульсу, τ_- – тривалість від'ємного імпульсу; U_p – напруга на неінвертуючому вході ОП)

Аналіз схеми мультивібратора, яку наведено на рис. 3.1, дозволяє записати наступне диференційне рівняння, що описує принцип роботи даного пристрою:

$$\frac{dU_c}{dt} = \pm \frac{U_{max} - U_c}{R_1 C_1}, \quad (3.1)$$

де U_{max} – амплітуда вихідного сигналу мультивібратора (для більшості схем на базі серійних ОППС знаходиться на рівні від 90 до 95 % від напруги живлення);

U_c – напруга на конденсаторі;

R_1 та C_1 – параметри схеми, що вибираються з множин: $R_1 = \{10 \text{ кОм}; 20 \text{ кОм}; 50 \text{ кОм}; 100 \text{ кОм}\}$ та $C_1 = \{3,3 \text{ нФ}; 10 \text{ нФ}; 15 \text{ нФ}; 22 \text{ нФ}\}$.

За початкових умов $U_c(0) = -U_{ПН}$ рішення диференційного рівняння (3.1) має вигляд:

$$U_c(t) = U_{max} - (U_{max} + U_{ПН}) \cdot e^{-t/R_1 C_1}, \quad (3.2)$$

де $U_{ПН}$ – порогова напруга перемикавання, що розраховується за формулою:

$$U_{ПН} = U_{max} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (3.3)$$

де R_2 та R_3 – параметри схеми, що вибираються з множин: $R_2 = \{2 \text{ кОм}; 5 \text{ кОм}; 10 \text{ кОм}; 20 \text{ кОм}\}$ та $R_3 = \{5 \text{ кОм}; 10 \text{ кОм}; 20 \text{ кОм}; 50 \text{ кОм}\}$.

Значення напруги, що дорівнює порогу спрацьовування тригера Шмітта (умова $U_c(t) = U_{ПН}$), буде досягнуто через проміжок часу:

$$\tau_+ = \tau_- = R_1 C_1 \ln[1 + (2R_3/R_2)]. \quad (3.4)$$

Отже, із урахуванням виразу (3.4) період коливань мультивібратора обчислюється за формулою:

$$T = \tau_+ + \tau_- = 2R_1C_1 \ln[1 + (2R_3/R_2)]. \quad (3.5)$$

Із аналізу формули (3.5) видно, що частота коливань мультивібратора не залежить від напруги U_{max} , яка в свою чергу, визначається напругою живлення $U_{жив.}$. Таким чином, частота коливань мультивібратора на ОППС не залежить від е.р.с. джерела живлення.

Порядок виконання роботи із застосуванням стенду OpAmp:

1. Зібрати схему автоколивального генератору, що досліджується в практичній роботі, як показано на рис. 3.1. Схемні параметри задаються викладачем перед початком виконання експериментальних досліджень.
2. Підключити до виходу мультивібратора двоканальний осцилограф.
3. Оцінити значення вихідної напруги мультивібратора U_{max} , порогової напруги перемикання $U_{ПН}$, напруги на конденсаторі U_C , а також зняти їх осцилограми у контрольних точках для різних сукупностей схемних параметрів (задаються викладачем під час виконання практичної роботи).
4. За отриманими осцилограмами визначити наступні параметри: тривалість позитивного імпульсу, тривалість від'ємного імпульсу, період та частоту вихідної напруги мультивібратора.
5. Провести теоретичні розрахунки параметрів, які вказано в п.3 та п.4, на підставі формул (3.2 - 3.5).
6. Виконати порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних та відповідних теоретичних розрахунків.

Порядок виконання роботи із застосуванням програмного середовища схемотехнічного моделювання Multisim:

1. У програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim зібрати схему (рис.3.3) автоколивального генератору, що досліджується в практичній роботі (рис. 3.1). Зробити знімок екрану.

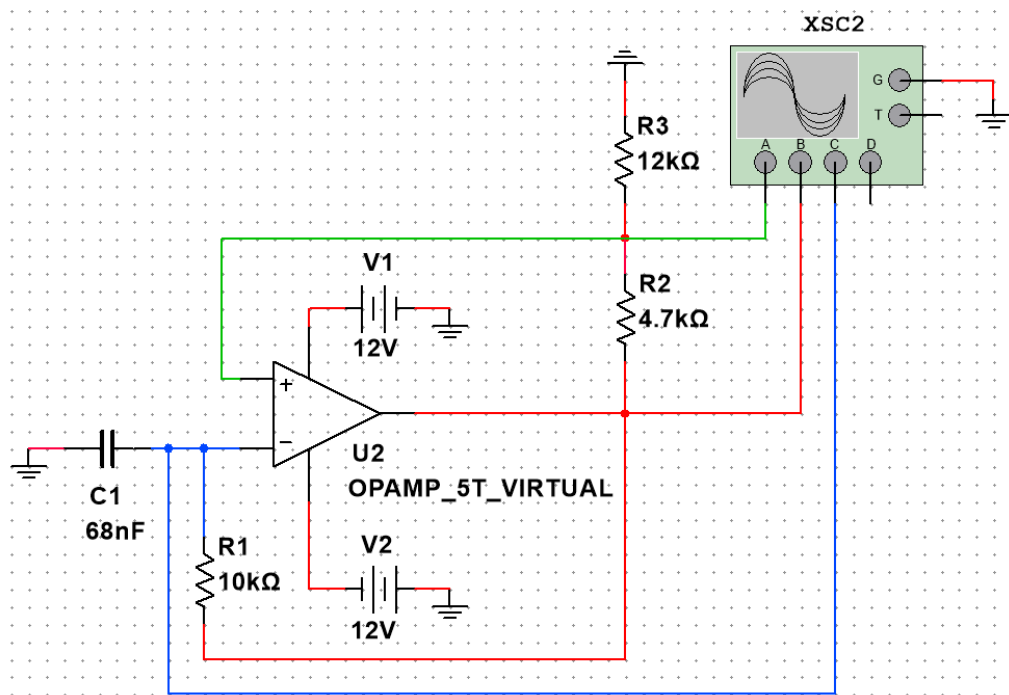


Рисунок 3.3 – Схема досліджуваного мультивібратора у програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim

2. Параметри елементів схеми задаються викладачем із таблиці 3.1 для кожної підгрупи студентів.

Таблиця 3.1 – Параметри елементів схеми

Варіант	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	C_1 , нФ
1	10	2	5	33
2	12	2,4	6,2	47
3	15	3	7,5	68
4	10	3,9	5	100
5	12	4,7	12	150
6	15	2	5	33
7	10	2,4	6,2	47
8	12	3	7,5	68
9	15	3,9	5	100
10	10	4,7	12	68

3. Оцінити значення вихідної напруги мультивібратора U_{max} , порогової напруги перемикання $U_{ПН}$, напруги на конденсаторі U_C , а також зняти їх

осцилограми у контрольних точках для різних сукупностей схемних параметрів (задаються викладачем під час виконання практичної роботи).

4. За отриманими осцилограмами визначити наступні параметри: тривалість позитивного імпульсу, тривалість від'ємного імпульсу, період та частоту вихідної напруги мультивібратора.

5. Змінити напругу живлення мультивібратора та повторити дії, вказані в п.4. Переконатись, що частота коливань мультивібратора не залежить від напруги.

6. Провести теоретичні розрахунки параметрів, які вказано в п.3 та п.4 за допомогою формул (3.2 - 3.5).

7. Виконати порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних та відповідних теоретичних розрахунків.

Зміст звіту:

1. Схема електрична принципова досліджуваного автоколивального генератора прямокутних імпульсів на базі ОППС (рис.3.1).

2. Експериментальні результати досліджень.

3. Осцилограми роботи досліджуваного мультивібратора.

4. Теоретичні розрахунки із відповідними коментарями до них.

5. Результати порівняльного аналізу результатів теоретичних розрахунків та отриманих експериментальних даних.

6. Висновки, які мають містити кількісний та якісний аналіз отриманих результатів досліджень.

Контрольні питання:

1. Дайте визначення терміну мультивібратор?

2. У чому полягає основне призначення мультивібраторів у галузі електроніки та радіотехніки?

3. Запишіть формулу для періоду сигналу на виході мультивібратора.

4. Від яких схемних параметрів залежить частота вихідної напруги

мультивібратора?

5. У чому полягає принцип роботи мультивібратора на базі ОППС?

6. Чи залежить період вихідного сигналу мультивібратора від напруги живлення? Чому?

Рекомендована література: [1, 2, 5]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ НА БАЗІ ОППС

Мета роботи: експериментально перевірити основні функціональні залежності щодо принципів роботи та отримати практичні навички щодо методів і способів дослідження генератора синусоїдальних коливань на базі мікросхем ОППС.

Основні теоретичні відомості. *Генератори синусоїдальних коливань* на базі ОППС відносяться до класу нестабільних схем. Їх спеціально конструюють таким чином, що б вони залишалися в нестабільному стані або в стані генерації. Генератори широко використовуються для формування стандартних сигналів, що використовуються в якості функціональних генераторів у цифрових та мікропроцесорних системах, а також у системах зв'язку.

Генератори синусоїдального сигналу працюють без подачі на них зовнішнього сигналу. Замість цього застосовується комбінація позитивного або від'ємного зворотного зв'язку задля переведення підсилювача до нестабільного стану, що призводить до циклічності зміни сигналу на виході від мінімальної до максимальної напруги живлення з постійною частотою. Амплітуда та частота коливань визначається сукупністю використовуваних активних та пасивних компонентів, які підключено до мікросхеми ОППС.

Генератори синусоїдальних коливань на базі ОППС обмежені низькочастотним діапазоном спектра сигналу, так як у них відсутня широка смуга пропускання, що необхідна для досягнення низького фазового зсуву на високих частотах. Операційні підсилювачі зі зворотним зв'язком за напругою обмежені кГц частотним діапазоном, так як домінуючий полюс при розімкненому колі зворотного зв'язку може перебувати на досить низькій частоті, наприклад 10 Гц. Сучасні мікросхеми ОППС зі струмовим зв'язком

мають набагато більшу смугу пропускання, але їх дуже важко використовувати в генераторних схемах через їх високу чутливість до ємностей у колах зворотного зв'язку.

Умови збудження генератора. Загальну структурну схему генератора синусоїдальних коливань зображено на рис. 4.1. Підсилювач збільшує вхідний сигнал у $\underline{K}_U$ разів. При цьому між вихідною ($\underline{U}_{вих.}$) та вхідною ($\underline{U}_{вх.}$) напругами підсилювача виникає фазовий зсув. До виходу підсилювача підключено схему частото-залежного зворотного зв'язку, яка може являти собою, наприклад, коливальний контур. У такому випадку напруга в колі зворотного зв'язку складає $\underline{\beta} \cdot \underline{U}_{вих.}$.

Умовою генерації стаціонарних коливань замкненої схеми є рівність вихідної напруги кола зворотного зв'язку та вхідної напруги підсилювача:

$$\underline{\beta} \cdot \underline{U}_{вих} = \underline{U}_{вх} = \frac{\underline{U}_{вих}}{\underline{K}_U}, \quad (4.1)$$

де $\underline{\beta}$ – комплексний коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку;

$\underline{U}_{вх}$ – комплексна вхідна напруга підсилювача;

$\underline{U}_{вих}$ – комплексна вихідна напруга схеми;

$\underline{K}_U$ – комплексний коефіцієнт підсилення схеми.



Рисунок 4.1 – Загальна структурна схема генератора синусоїдальних коливань

Коефіцієнт петльового підсилення обчислюється з наступної умови:

$$\underline{\beta} \cdot \underline{K_U} = 1. \quad (4.2)$$

Із комплексної умови (4.2) витікають дві дійсні:

$$|\underline{\beta}| \cdot |\underline{K_U}| = 1; \quad (4.3)$$

$$\varphi + \psi = 0, 2\pi, 4\pi \dots \quad (4.4)$$

де φ – фазовий зсув, який обумовлено підсилювачем;

ψ – фазовий зсув, який обумовлено колом зворотного зв'язку.

Рівняння (4.3) називається умовою балансу амплітуд, а (4.4) – балансу фаз. Баланс амплітуд означає, що коливання, які не згасають, у замкненому контурі можуть існувати тільки тоді, коли підсилювач компенсує втрати в колі зворотного зв'язку. Умова балансу фаз означає, що поповнення енергії в системі виконується в такт із її власними коливаннями.

У даній практичній роботі досліджується схема генератора синусоїдальних коливань на базі ОППС (генератор з мостом Віна), яку наведено на рис. 4.2. В якості кола зворотного зв'язку використано смуговий RC-фільтр.

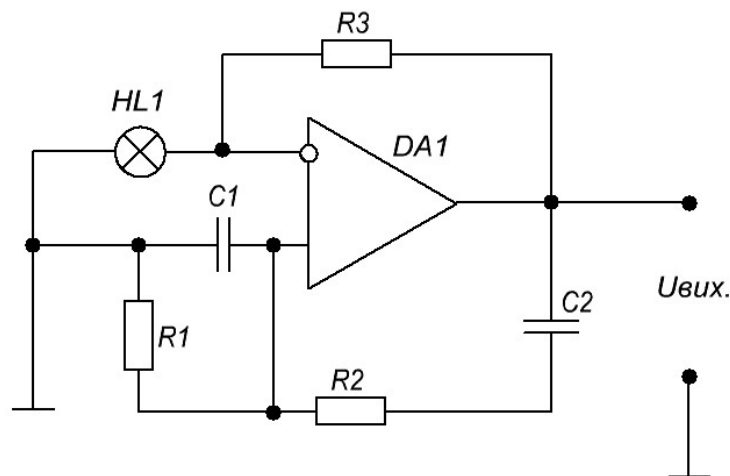


Рисунок 4.2 – Схема електрична принципова досліджуваного генератора синусоїдальних коливань

Задля виконання умови балансу амплітуд (4.3) необхідно щоб коефіцієнт підсилення ОППС $K_U = 3$. Для виконання цієї вимоги необхідно вибрати опір резистора R_3 таким, що дорівнює $R_3 = 2R_{HL1}$. Зміна опору R_3 у колі зворотного зв'язку на $\pm 1\%$ призводить до суттєвій зміни форми та амплітуди вихідної напруги. Зростання опору R_3 викликає збільшення спотворень, а його зменшення призводить до загасання коливань.

З метою зменшення спотворень форми вихідної напруги у досліджуваній схемі використано мікропотужну лампу розжарювання (HL_1). Вона виконує функцію автоматичного регулювання амплітуди вихідної напруги за рахунок зміни свого динамічного опору відповідно до коливань амплітуди струму.

Частота вихідної напруги генератора синусоїдальних коливань за умов $C_1 = C_2 = C$ та $R_1 = R_2 = R$ обчислюється за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.5)$$

де R , C – номінали елементів схеми в колі зворотного зв'язку за неінвертуючим входом.

Опір резисторів $R_1 = R_2 = R$ вибирається із сукупності {150 Ом; 3,3 кОм; 10 кОм; 33 кОм}, ємність конденсаторів $C_1 = C_2 = C$ дорівнює 91 нФ.

Порядок виконання роботи:

1. Зібрати схему генератора синусоїдальних коливань, що досліджується в практичній роботі, як показано на рис. 4.2. Схемні параметри задаються викладачем перед початком виконання експериментальних досліджень.

2. Підключити до виходу досліджуваного генератора необхідні контрольно-вимірювальні пристрої.

3. Оцінити діюче значення вихідної напруги генератора синусоїдальних коливань, а також зняти осцилограми його вихідної напруги для різних сукупностей схемних параметрів (задаються викладачем під час виконання

практичної роботи).

4. За отриманими в п. 3 даними оцінити частоту та період коливань вихідної напруги генератора синусоїдальних коливань.

5. Провести теоретичні розрахунки параметрів частоти за формулою (4.5) та періоду вихідної напруги генератора.

6. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних та відповідних теоретичних розрахунків.

Порядок виконання роботи із застосуванням програмного середовища схмотехнічного моделювання Multisim:

1. У програмному середовищі схмотехнічного моделювання Multisim зібрати схему (рис.4.3) генератора синусоїдальних коливань, що досліджується в практичній роботі (рис. 4.1).

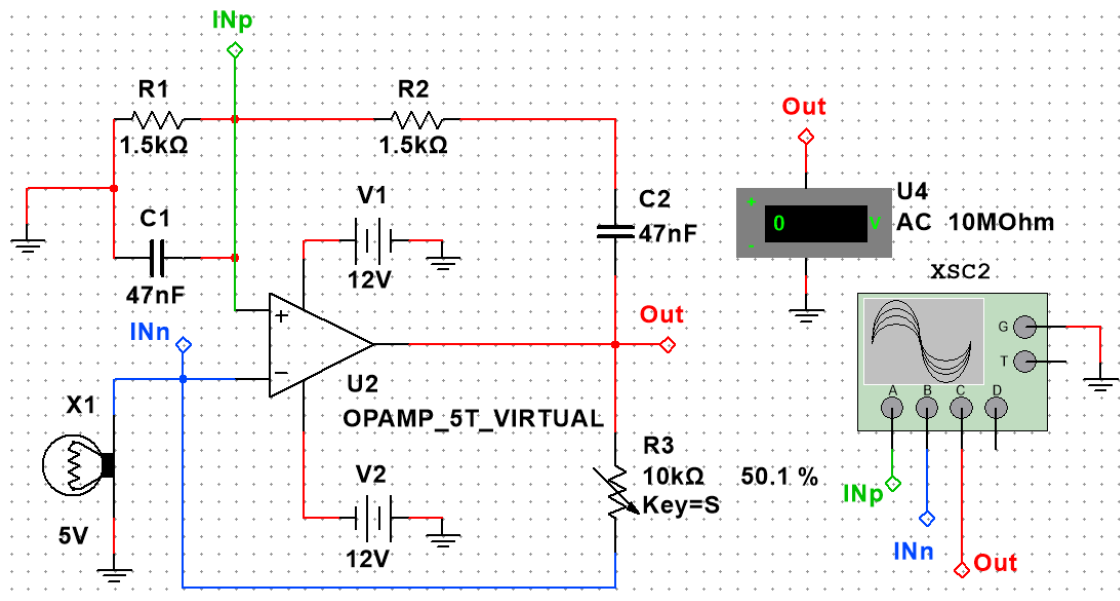


Рисунок 4.3 – Схема досліджуваного генератора синусоїдальних коливань у програмному середовищі схмотехнічного моделювання Multisim

2. Параметри елементів схеми задаються викладачем із таблиці 4.1 для кожної підгрупи студентів. Опор R_3 встановити рівним 10 кОм, крок зміни опору – 0,1%. Зробити знімок екрану.

Таблиця 4.1 – Параметри елементів схеми

Варіант	R , кОм	C , нФ
1	1	33
2	1,5	47
3	2	68
4	2,4	100
5	2,7	150
6	3,3	33
7	3,9	47
8	4,3	68
9	4,7	100
10	5,1	68

3. Змінюючи опір резистора R_3 встановити стабільну амплітуду неспотворених синусоїдальних коливань досліджуваного генератора.

4. Оцінити діюче значення вихідної напруги генератора синусоїдальних коливань, а також зняти осцилограми його вихідної напруги. Зробити знімок екрану.

5. За отриманими в п.4 даними оцінити частоту та період коливань вихідної напруги генератора синусоїдальних коливань.

6. Виконати теоретичний розрахунок частоти за формулою (4.5) та періоду коливань вихідної напруги генератора.

7. Змінюючи опір резистора R_3 переконатись, що його зростання викликає збільшення спотворень форми коливань, а зменшення призводить до їх загасання.

8. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних та відповідних теоретичних розрахунків.

9. У програмному середовищі схемотехнічного моделювання Multisim зібрати схему (рис.4.4) генератора синусоїдальних коливань. Параметри елементів схеми залишити такими, як у п.2. Опіри резисторів R_4 та R_5 встановити 10 кОм, крок зміни опору R_4 – 0,5%, R_5 – 0,1%. Співвідношення опорів $R_3 \approx 2R_4$. Зробити знімок екрану.

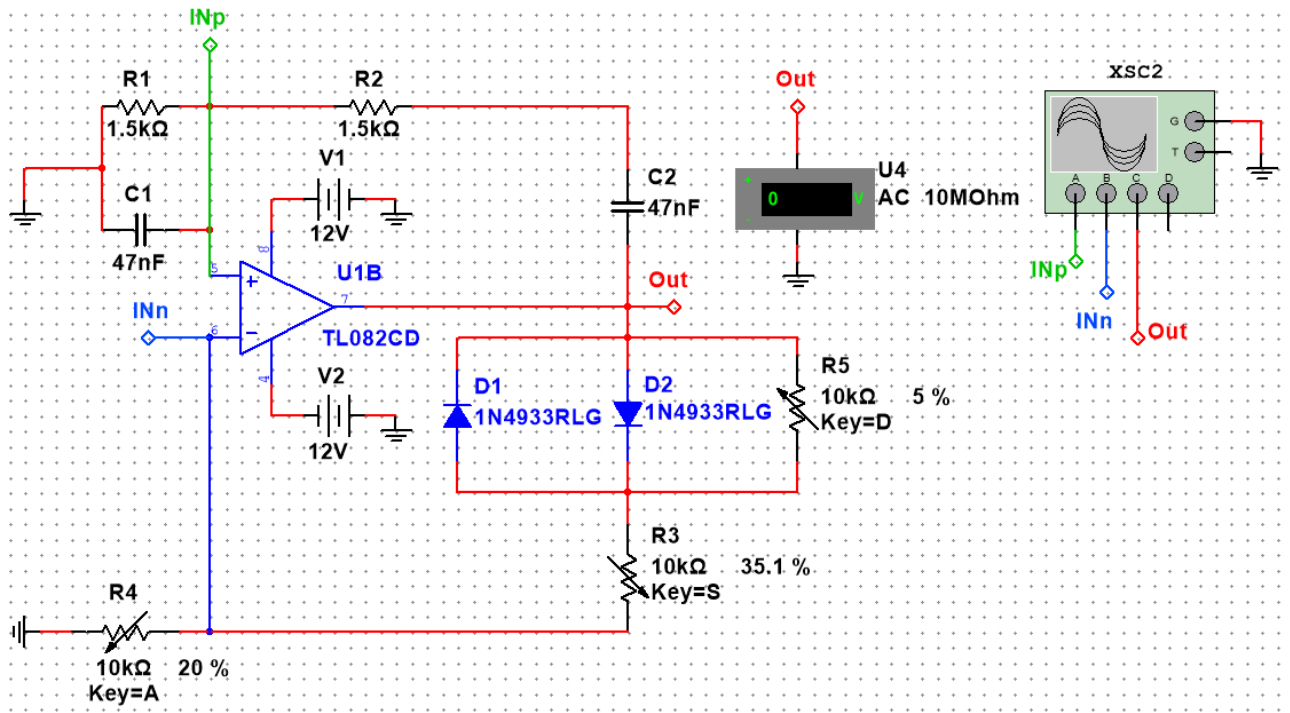


Рисунок 4.4 – Схема досліджуваного генератора синусоїдальних коливань з автоматичною стабілізацією коефіцієнта підсилення

10. Змінюючи опір резистора R_3 встановити стабільну амплітуду неспотворених синусоїдальних коливань досліджуваного генератора.

11. Змінюючи опір резистора R_5 додатково зменшити викривлення форми синусоїдальних коливань.

12. Повторити п.4 та п.5.

13. Переконатись, що генератор синусоїдальних коливань за схемою, представленою на рис. 4.4, у порівнянні зі схемою, зображеною на рис. 4.3, забезпечує більш стабільні коливання та припускає регулювання їх амплітуди у певному діапазоні за допомогою опору R_3 .

Зміст звіту:

1. Схеми досліджуваних генераторів синусоїдальних коливань на базі ОППС (рис.4.2, 4.3, 4.4) із зазначенням основних переваг порівняно з іншими схемотехнічними рішеннями.

2. Результати експериментальних досліджень.

3. Осцилограми роботи досліджуваних генераторів.

4. Результати теоретичних розрахунків із відповідними коментарями до них.

5. Результати порівняльного аналізу результатів теоретичних розрахунків та отриманих експериментальних даних.

6. Висновки, які мають містити кількісний та якісний аналіз отриманих результатів досліджень.

Контрольні питання:

1. До якого класу схем відноситься генератор синусоїдальних коливань на ОППС? Пояснити чому.

2. Наведіть структурну схему генератора синусоїдальних коливань та поясніть принцип її дії.

3. Розкрийте фізичний зміст умов балансу амплітуд і фаз.

4. Наведіть принципову схему генератора синусоїдальних коливань та поясніть принцип її дії.

5. Наведіть формулу для розрахунку частоти вихідної напруги генератора синусоїдальних коливань на базі ОППС та надайте пояснення величинам, що входять до неї.

6. Чи залежить період вихідного сигналу генератора синусоїдальних коливань від напруги живлення? Чому?

7. Яке призначення в схемі генератора синусоїдальних коливань на базі ОППС має елемент HL_1 , діоди D_1 , D_2 , опір R_5 ?

8. Яке схемотехнічне рішення використано в колі зворотного зв'язку за неінвертуючим входом для побудови генератора?

Рекомендована література: [1, 2, 5, 6, 8]

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник / С.О. Квітка. – Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.
2. Комп'ютерна схемотехніка : лаборатор. практи. для студ., що навчаються за спец. галузі знань 12 — Інформаційні технології денної та заочної форм навчання / уклад. : Ю.О. Борзов, О.О. Смотр. – Львів, 2019. – 67 с.
3. Пристрої аналогової електроніки : консп. лекцій / уклад. В. В. Гриненко. – Суми : Сумський держ. ун-т, 2015. – 272 с.
4. Horowitz, P. The Art of Electronics / P. Horowitz W. Hill. – 3rd edition. – NY : Cambrige University Press, 2015. – 1192 p.
5. Савицька, М.П., Ботнар Л.Б. Аналогові електронні пристрої: Навчальний посібник. Модуль 2 / М.П. Савицька, Л.Б. Ботнар. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2009. – 144 с.
6. Схемотехніка електронних систем. У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої : підручник / В.І. Бойко, А.М. Гуржий, В.Я. Жуйков та ін. – 2-ге вид., допов. і перероб. – К. : Вища шк., 2004 . – 366 с. : іл.
7. Fiore, Jim. Active Filters =Активні фільтри [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electronics/Operational_Amplifiers_and_Linear_Integrated_Circuits_-_Theory_and_Application_\(Fiore\)/11%3A_Active_Filters?mt-language=UK](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electronics/Operational_Amplifiers_and_Linear_Integrated_Circuits_-_Theory_and_Application_(Fiore)/11%3A_Active_Filters?mt-language=UK) . – Назва з екрана.
8. ElectronicsHub. A trusted hub for electronics enthusiasts=Надійний центр для ентузіастів електроніки [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.electronicshub.org/> . – Назва з екрана.
9. Analog Filter Wizard [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://tools.analog.com/ru/filterwizard/> . – Назва з екрана.
10. Filter design tool=Інструмент проектування фільтрів [Електронний

ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/filter-designer.html> . – Назва з екрана.

11. Karki, James. Analysis of the Sallen-Key Architecture. Application. Report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ml/sloa024b/sloa024b.pdf?ts=1680265326625>. – Назва з екрана.