УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Чайковський О.С., Фесечко В. О., Голубєва І.П., Сташкевич В.П.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КУРСУ «СХЕМОТЕХНІКА», РОЗДІЛ «АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНІКА», «ПРИСТРОЇ АНАЛОГОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ», ЧАСТИНА 1

для студентів факультету електроніки
усіх форм навчання

Затверджено на засіданні кафедри
фізичної та біомедичної електроніки
Протокол № 26 від 13.06.2012 р.

Київ КПІ 2012

Чайковський О.С. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсів «Схемотехніка», розділ «Аналогова схемотехніка», «Пристрої аналогової електроніки», частина 1 / О.С. Чайковський, В.О. Фесечко, І.П. Голубєва, В.П. Сташкевич. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 76 с.

Гриф надано _____
(протокол № _____ від ____. ____.2012 р.)

Затверджено на засіданні кафедри
фізичної та біомедичної електроніки
Протокол № 26 від 13.06.2012 р.

СХЕМОТЕХНІКА

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсів «Схемотехніка», розділ «Аналогова схемотехніка», «Пристрої аналогової електроніки», частина 1, для студентів факультету електроніки усіх форм навчання

Автори: Чайковський Олександр Семенович
Фесечко Володимир Опанасович
Голубєва Ірина Петрівна
Сташкевич Володимир Пилипович

Відповідальний редактор:_____
Рецензенти: _____, _____

Під редакцією авторів

ВСТУП

Ці методичні вказівки містять опис 4 лабораторних робіт з курсів «Схемотехніка», розділ «Аналогова схемотехніка», «Пристрої аналогової електроніки», що охоплюють різні підсилювачі на біполярних транзисторах, інтегральному операційному підсилювачі, а також і різні вимірювальні прилади лабораторної установки.

Основною метою даного циклу робіт є закріплення теоретичних знань, отриманих студентами при вивченні лекційного матеріалу і відповідної літератури, вироблення навичок і умінь збирати установку для досліджень аналогових пристроїв, проводити на ній різні вимірювання та їх подальшу обробку, робити висновки і оцінку результатів вимірювань.

У процесі підготовки до лабораторної роботи кожен студент повинен вивчити блок-схему установки для дослідження даного лабораторного модуля, схему електричну принципову цього модуля, виконати домашнє завдання, знати програму досліджень, відповісти на контрольні запитання.

Звіт по лабораторній роботі повинен містити назву лабораторної роботи, блок-схему лабораторної установки, назву, призначення і технічні дані вимірювальних приладів, схему електричну принципову лабораторного модуля, результати розрахунків і графіки, отримані при виконанні домашнього завдання, таблиці і значень з експериментальними даними, висновки і оцінка результатів експерименту. Звіт повинен бути оформлений на аркушах формату А4 відповідно до вимог до оформлення технічної документації і зданий в кінці поточного заняття.

Лабораторне заняття починається з перевірки теоретичної підготовки студентів та подальшим їх допуском до роботи.

Перед початком циклу лабораторних робіт всі студенти академічної групи повинні пройти інструктаж з техніки безпеки. При порушеннях

техніки безпеки, дисципліни, а також у разі непідготовленості до роботи студент усувається від виконання лабораторної роботи.

У додатку містяться методичні вказівки по вимірюванню різних характеристик і параметрів аналогових пристроїв, вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів, алгоритм складання матриці провідності схеми на інтегральному операційному підсилювачі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.
ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

1. Мета роботи

Вивчення принципів роботи, дослідження амплітудних та частотних характеристик і параметрів підсилювачів на основі біполярних транзисторів (зі Спільним Емітером (СЕ), Спільним Колектором (СК), Спільною Базою(СБ)).

2. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Підсилювачі на біполярних транзисторах»

Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Підсилювачі на біполярних транзисторах» («ПБТ») наведена на рис. 1.1.

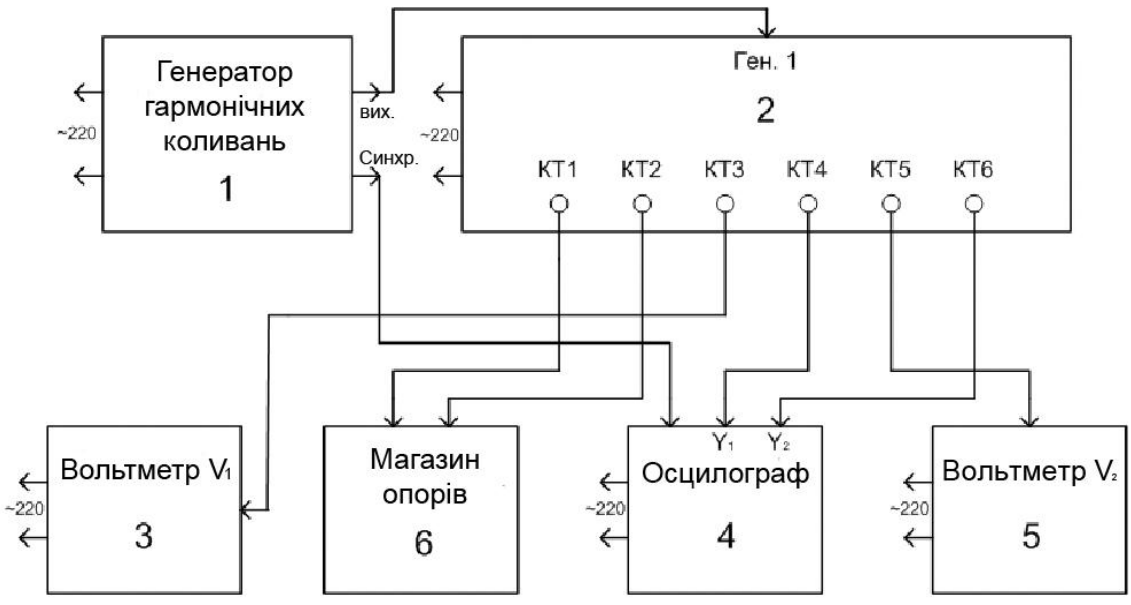


Рис. 1.1. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «ПБТ».

Лабораторна установка для дослідження лабораторного модуля «ПБТ» складається з генератора гармонічних коливань 1 типу Г3-112, лабораторного стенду 2 типу «Каскад М», вольтметрів 3 і 5 типу В3-38, осцилографа 4 типу С1-55, магазину опорів 6. До складу лабораторного стенду 2 входять стабілізований блок живлення, електронний комутатор, формувач імпульсів, чотири лабораторних модулі.

Генератор 1 є джерелом гармонійної вихідної напруги в частотному діапазоні від 20 Гц до 1 МГц та амплітудою від 0 до 6,3 В.

Вольтметри 3 та 5 призначені для вимірювання амплітуди відповідно вхідної U_1 та вихідної U_2 напруги від 0,1 мВ до 200 В у діапазоні частот від 20 Гц до 3 МГц.

Осцилограф 4 використовується для спостереження на екрані електронно-променевої трубки форми напруги та вимірювання параметрів напруги від 30 мВ до 140 В у частотному діапазоні від 3 Гц до 10 МГц.

Магазин опорів 6 забезпечує вибір необхідного опору.

Лабораторний стенд 2 забезпечує включення одного з чотирьох лабораторних модулів, включення певної схеми в даному лабораторному модулі, підключення джерел живлення і джерел змінної напруги.

3. Схема електрична принципова лабораторного модуля «Підсилювачі на біполярних транзисторах»

Схема принципова електрична лабораторного модуля «ПБТ», що реалізується за допомогою лабораторного стенду, наведена на рис. 1.2.

У табл. 1.1 наведені три схеми підсилювачів, які можна отримати в залежності від положень перемикачів лабораторного стенду. Активним підсилювальним елементом є біполярний *n-p-n* транзистор T_1 типу МП37Б.

За допомогою резистивного дільника R_1-R_2 задається початковий потенціал бази транзистора. Резистор в колі емітера R_3 задає початковий потенціал емітера транзистора T_1, є термостабілізуючим для всіх трьох схем включення транзистора, а для схеми зі спільним колектором, крім того, служить навантажувальним резистором транзистора по змінному струму. Резистор R_4 включений в коло колектора транзистора є навантажувальним резистором транзистора T_1 в схемах СЕ та СБ. Конденсатор C_2 є блокуючим (шунтувальним) відповідно в колах бази, емітера та колектора транзистора T_1. Розділювальні конденсатори C_1, C_3 пропускають тільки змінний струм відповідно у вхідне коло або у навантаження. Магазин опорів $R_м$ при розмиканні перемикача П6 підключається послідовно з вхідним опором підсилювача, або між гніздами КТ8 та нульовою шиною паралельно вихідному опору підсилювача, що використовується для вимірювання вхідного і вихідного опору підсилювача. Живлення підсилювача здійснюється від джерела напруги E = +7,5 В.

Вхідна напруга від генератора гармонічних коливань надходить через розділювальний конденсатор C_1 або на базу транзистора T_1 (в схемі з СЕ, СК), або в коло емітера (у схемі ОБ) T_1, та спостерігається на осцилографі та вольтметрі V_1. Вихідна напруга знімається через розділювальний конденсатор C_3 з колектора (в схемах СЕ та СБ) або емітера (у схемі СК) та спостерігається на осцилографі і вольтметрі V_2.

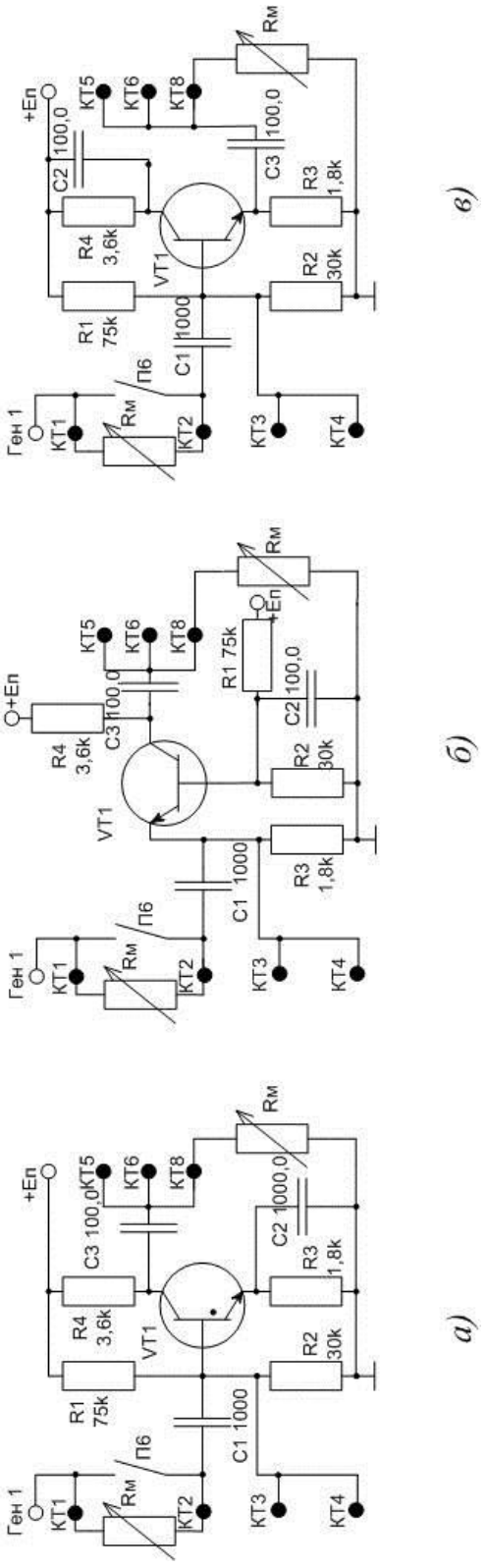
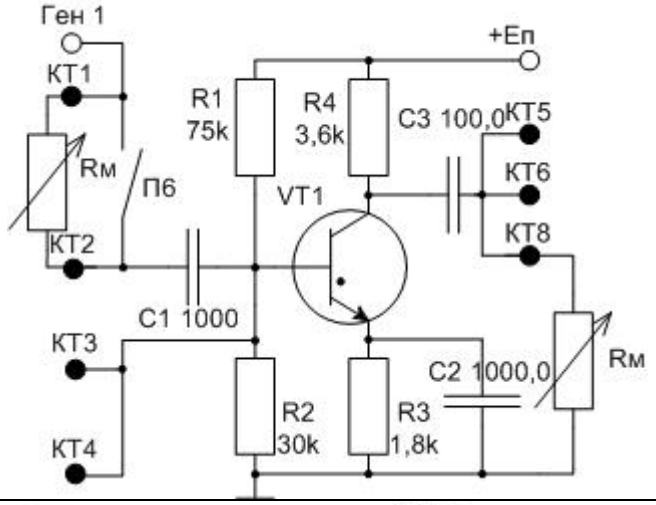
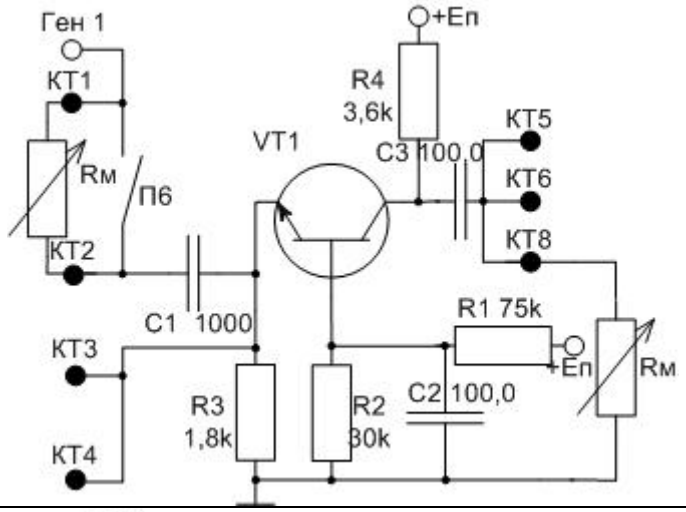
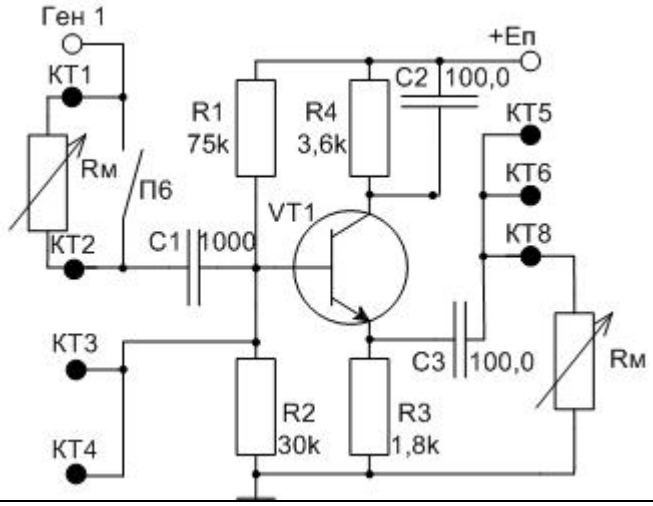


Рис. 1.2 Схема електрична принципова лабораторного модуля «ПБТ»: *а)* схема зі спільним емітером (П1-вкл), *б)* схема зі спільною базою (П2-вкл), *в)* схема зі спільним колектором (П3-вкл).

Таблиця 1.1. Реалізовані схеми в лабораторному модулі ПБТ.

Тип ПБТ	Перемикач замкнутий	Схема електрична принципова
Схема із СЕ	П1	
Схема із СБ	П2	
Схема із СК	П3	

4. Домашнє завдання

4.1. Вивчити схеми включення біполярного транзистора в підсилювачах СЕ, СБ, СК, характеристики і параметри, частотні (часові) показники підсилювачів для середніх, нижніх і верхніх частот (малих та великих часів).

4.2. Використовуючи Т-схему заміщення біполярного транзистора отримати аналітичні вирази для функцій $K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$, $K_I = \frac{I_н}{I_1}$, $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}$, $R_{вих} = \frac{U_{вих}}{I_{вих}}$ підсилювачів для області середніх частот в символьному вигляді та чисельно в схемах СЕ, СБ, СК при $R_г = 0$, $R_н = R_{вих}$, де $R_{вих}$ – вихідний опір підсилювача в даній схемі включення транзистора при $R_н = \infty$. Порівняти кожну функцію для різних схем. Скласти макромодель підсилювача для області середніх частот.

4.3. Для схеми (рис. 1.2), вважаючи $C_1 = C_2 = \infty$, $C_3 = 10$ мкФ, $R_н = R_{вых}$, скласти макромодель підсилювача, що працює в області нижніх частот (великих часів), і визначити в символьній формі та чисельно аналітичні вирази для передаточної функції $K_U(j\omega)$, частотних характеристик $K_U(\omega)$, $\varphi(\omega)$ (АЧХ, ФЧХ) і параметрів (коефіцієнт нерівномірності АЧХ $M_н(\omega)$ та нижню граничну частоту $\omega_н$ при допустимому коефіцієнті нерівномірності $M_{нд} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$).

4.4. Використовуючи Т-схему заміщення біполярного транзистора для області верхніх частот (малих часів), скласти модель підсилювача СЕ, СБ, СК для області верхніх частот. Отримати в символьній формі і чисельно аналітичні вирази для передаточної функції, а також формули

для отримання частотних характеристик (АЧХ, ФЧХ) і параметрів (коефіцієнт нерівномірності АЧХ $M_в(\omega)$ та верхню граничну частоту $\omega_в$, при допустимому коефіцієнті нерівномірності $M_{вд} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$).

4.5. Скласти повну макромодель підсилювача, що працює у всьому діапазоні частот.

5. Проведення лабораторних досліджень

5.1. Зібрати установку для дослідження лабораторного модуля «ПБТ» у відповідності з блок-схемою (рис. 1.1) та включити напругу мережі 220 В для живлення блоків 1-5.

5.2. Для схем включення каскадів СЕ, СБ, СК виміряти вхідний – $R_{вх}$, вихідний – $R_{вих}$ опір, коефіцієнт передачі напруги $K_U = \frac{U_2}{U_1}$ при $R_н = R_{вих}$ на середній частоті $f_г$=1 кГц при $R_г$=0 Ом, U_1=10 мВ для схем СЕ, СБ та U_1=100 мВ для схеми СК; для схем СЕ, СБ, СК обчислити коефіцієнти передачі струму $K_I = \frac{I_н}{I_1} = \frac{R_{вх}}{R_н} K_U$ та потужності $K_P = \frac{P_н}{P_1} = K_U \cdot K_I$, замалювати осцилограми вхідної U_1 та вихідної U_2 напруг схем СЕ, СБ, СК. Результати вимірювань функцій і осцилограми трьох схем внести в табл. 1.2. $R_м$ – опір магазину опорів, що підключається послідовно вхідному опору або паралельно вихідному опору підсилювача.

5.3. Виміряти та побудувати графіки амплітудної характеристики $U_2=U_2(U_1)$ підсилювачів СЕ (суцільна лінія), СБ (пунктирна лінія), СК (штрихпунктирна лінія) на середній частоті $f_г$=1 кГц, $R_г$=0 Ом, $R_н=R_{вих}$.

Відзначити знаками «+» і «–» відповідно найбільше значення вхідної напруги U_1 ($U_{1\max}^{+}$ и $U_{1\max}^{-}$), при яких з'являються помітні нелінійні спотворення вихідної напруги U_2 позитивної і негативної полярності. Обчислити динамічний діапазон вхідного напруги позитивної $Д^{+}$ та негативною $Д^{-}$ полярностей: $Д^{+} = \frac{U_{1\max}^{+}}{U_{1\min}}$ та $Д^{-} = \frac{U_{1\max}^{-}}{U_{1\min}}$, де $U_{1\min}$ – мінімальна амплітуда вхідної напруги, помітна на рівні шумів при заданому відношенні $\frac{сигнал}{шум}$ (взяти $\frac{сигнал}{шум} = 3$). Вкажіть, як і які елементи електричної схеми (рис. 1.2) потрібно змінити, щоб отримати без спотворень найбільшу амплітуду вихідної напруги U_2 тільки позитивної та тільки негативної полярності, а також двополярну симетричну напругу U_2. Результати вимірювань амплітудних характеристик представити в табл. 1.3 та на рис. 1.3.

Таблиця 1.2. До вимірюванню функцій підсилювачів.

№	Показники роботи підсилювача	Підсилювач в схемі			Примітка
		СЕ (П1)	СБ (П2)	СК (П3)	
1	При $R_м$=0 U_1=$U_г$, мВ (П6-замкнений)	10	10	100	Натиснути П6 і встановити ручкою вихід генератора U_1
2	При $R_м$=$R_{вх}$ U_1'=0,5$U_г$, мВ (П6- розімкнений)	5	5	50	Віджати П6 і за допомогою $R_м$ встановити U_1'
3	При U_1'=0,5$U_г$ $R_{вх} = \frac{U_1}{I_1} = R_м$, Ом				Записати покази $R_м$ (дорівнює $R_{вх}$)
4	При $R_м$=∞ U_2=U_{2xx}, мВ				Відключити $R_м$ від КТ8 та землі та виміряти U_{2xx} при U_1
5	При $R_м$=$R_{вих}$ $U_2' = 0,5 \cdot U_{2xx}$, мВ				Підключити $R_м$ до КТ8 та нульової шини та за допомогою $R_м$ встановити U_2'
6	$U_2' = 0,5 \cdot U_{2xx}$, $R_{вих} = \frac{U_2}{I_2} = R_м$, Ом				Записати покази $R_м$ (дорівнює $R_{вих}$)
7	$K_U = \frac{U_2'}{U_1}$				Обчислити відношення раніш виміряних U_2' та U_1
8	$K_I = \frac{I_н}{I_1} = \frac{R_{вх}}{R_н} \cdot K_U$				Обчислити відношення $R_{вх}$ до $R_н$=$R_{вих}$ та помножити на K_U
9	$K_P = \frac{P_н}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_н}{U_1 \cdot I_1} = K_U \cdot K_I$				Обчислити добуток K_U та K_I
10	Епюри напруг U_1 та U_2 —U_1 ·····U_2				Порівняти амплітуди та фази напруг U_1 та U_2 (змалювати з екрану)

Таблиця 1.3. До вимірюванню амплітудних характеристик підсилювача.

№	Підсилювач в схемі при $f_г$=10^3 Гц, $R_г$=0 Ом, $R_н$=$R_{вих}$					
	СЕ (П1) $R_{вих}$=		СБ (П2) $R_{вих}$=		СК (П3) $R_{вих}$=	
	U_1, мВ	U_2, мВ	U_1, мВ	U_2, мВ	U_1, мВ	U_2, мВ
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
$Д^+ = \frac{U^+_{1max}}{U_{1min}}$						
$Д^- = \frac{U^-_{1max}}{U_{1min}}$						

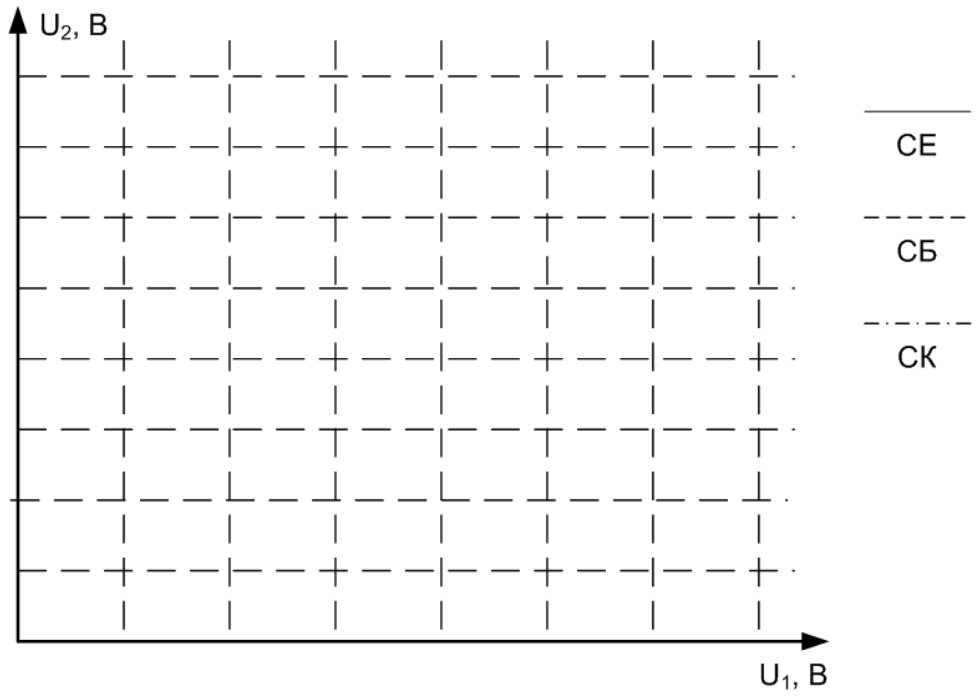


Рис. 1.3. Амплітудні характеристики підсилювачів в схемі СЕ, СБ, СК.

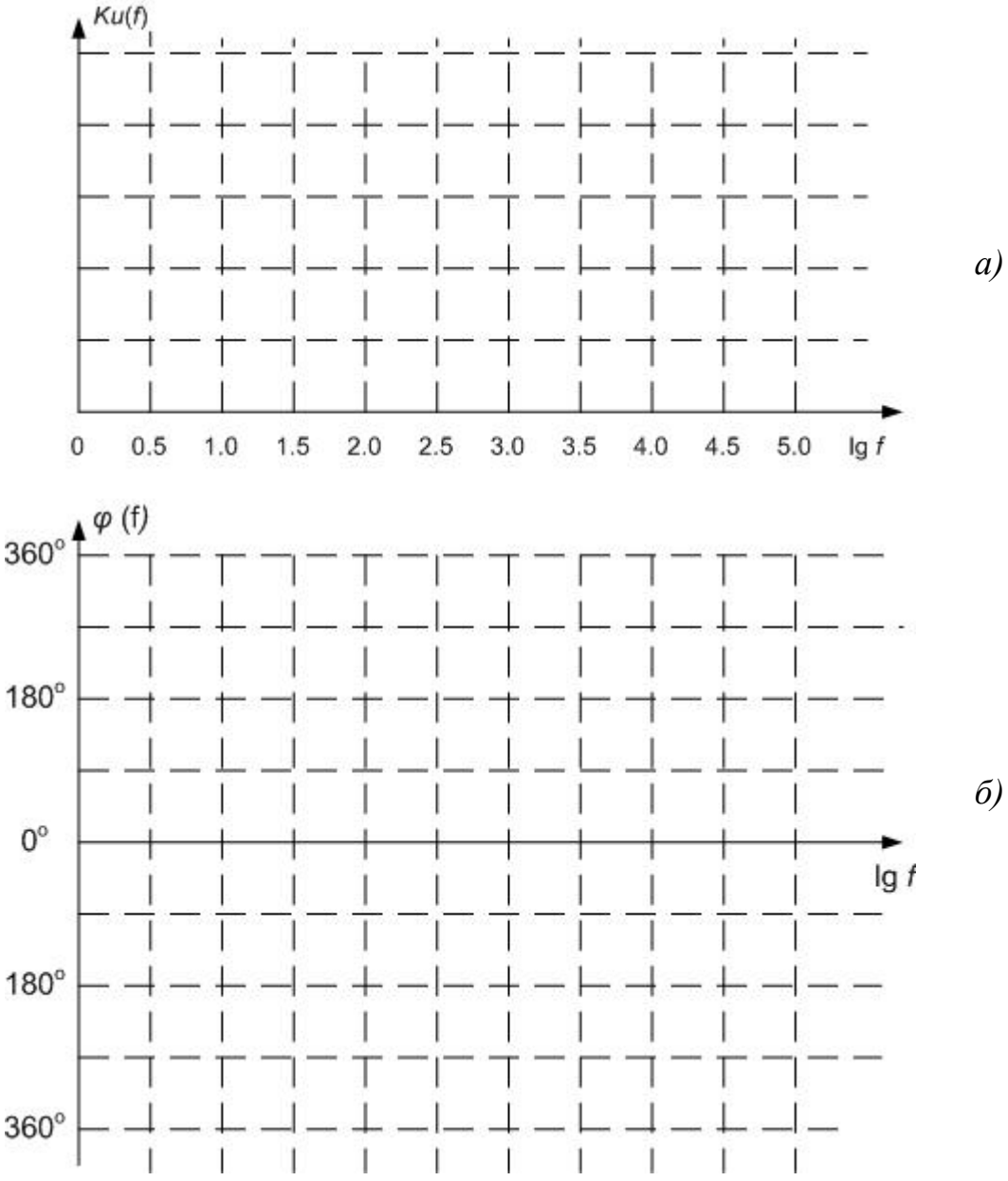
5.4. Виміряти та побудувати графіки амплітудно-частотної характеристики у нормованому вигляді $M(f)=\frac{K_U(f)}{\left|K_{U_0}\right|}$ та фазочастотної $\varphi=\varphi(f)$ характеристики підсилювачів СЕ (суцільна лінія), СБ (пунктирна лінія), СК (штрихпунктирная лінія) при $R_г$=0 Ом, $R_н=R_{вих}$, U_1=10 мВ (СЕ, СБ) та U_1=100 мВ (СК). Визначити параметри частотних характеристик: Нижню $f_н$ та верхню $f_в$ граничні частоти, смугу пропускання $\Delta f = f_в - f_н$, широкосмуговість $Д=K_{Uo}\cdot\Delta f$ при допустимих коефіцієнтах нерівномірності АЧХ на нижніх $M_{нд}$ та верхніх $M_{вд}$ частотах рівних 0,707, тобто $M_{нд}=M_{вд}=\frac{1}{\sqrt{2}}=0.707$. Результати вимірювань частотних характеристик внести в табл. 1.4 та на рис. 1.4.

Таблиця 1.4. До вимірюванню частотних характеристик підсилювача.

№	f, Гц (lg$f$)	Підсилювач при $R_г$=0 Ом, $R_н$=$R_{вих}$, U_1 , мВ								
		СЕ (П1) U_1=10			СБ (П2) U_1=10			СК (П3) U_1=10		
		U_2, мВ	$M(f)$	$\varphi(f)$	U_2, мВ	$M(f)$	$\varphi(f)$	U_2, мВ	$M(f)$	$\varphi(f)$
1	20 (1.3)									
2	50 (1.7)									
3	100 (2)									
4	$2\cdot10^2$ (2.3)									
5	$5\cdot10^2$ (2.7)									
6	10^3 (3)									
7	$2\cdot10^3$ (3.3)									
8	$5\cdot10^3$ (3.7)									
9	10^4 (4)									
10	$2\cdot10^4$ (4.3)									
11	$5\cdot10^4$ (4.7)									
12	10^5 (5)									
13	$2\cdot10^5$ (5.3)									
Параметри АЧХ	$f_н$, Гц									
	$f_в$, Гц									
	Δf, Гц									
	K_{U0}									
	$Д=K_{U0}*\Delta f$									

$$M(f)=\frac{K_U(f)}{K_{U0}}=\frac{U_2(f)/U_1}{U_2(f_0)/U_1}=\frac{U_2(f)}{U_2(f_0)},$$ де f_0 – середня частота, при якій

$$K_U(f)=K_{U0}\frac{U_2(f)}{U_2(f_0)}\approx const \text{ або } U_2(f)=U_2(f_0)\approx const.$$



а)

б)

Рис. 1.4. Частотні характеристики підсилювачів в схемі СЕ, СБ, СК:
а) АЧХ, *б)* ФЧХ.

5.5. Порівняти результати вимірювань з розрахунками, зробити висновки по кожному пункту досліджень.

5.6. Визначити споживану потужність і електричну енергію установки при проведенні лабораторних досліджень, знаючи час проведення досліджень і споживану потужність блоків установки.

6. Зміст звіту

6.1. Назва лабораторної роботи та її мета.

6.2. Блок-схема лабораторної установки: назва, призначення та технічні дані використаних блоків.

6.3. Схема електрична принципова лабораторного модуля.

6.4. Результати розрахунків, графіки, отримані при виконанні домашнього завдання.

6.5. Таблиці та графіки з експериментальними даними, отримані при вимірюванні частотних і амплітудних характеристик.

6.6. Висновки і оцінки результатів експерименту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.
ЗВОРОТНІЙ ЗВ'ЯЗОК У ПІДСИЛЮВАЧАХ

1. Мета роботи

Вивчення принципів роботи зворотного зв'язку, дослідження впливу негативного зворотного зв'язку на характеристики і параметри підсилювача.

2. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Зворотній зв'язок у підсилювачах»

Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Зворотній зв'язок у підсилювачах» («ЗЗП») наведена на рис. 2.1.

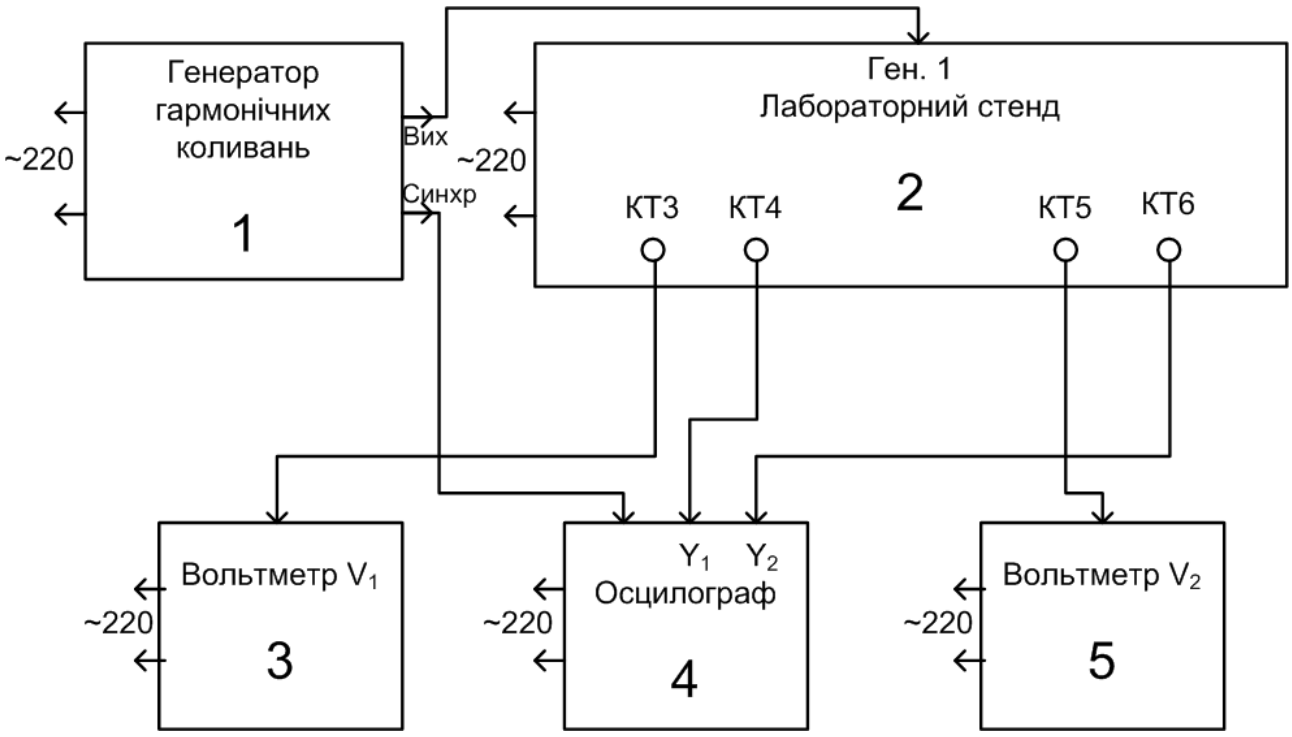


Рис. 2.1. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Зворотній зв'язок у підсилювачах».

Лабораторна установка для дослідження лабораторного модуля «ЗЗП» складається з генератора гармонічних коливань 1 типу Г3-112, лабораторного стенду 2 типу «Каскад М», вольтметрів 3 та 5 типу В3-38, осцилографа 4 типи С1-55. До складу лабораторного стенду 2 входять стабілізований блок живлення, електронний комутатор, формувач імпульсів, чотири лабораторних модуля.

Генератор 1 є джерелом гармонійної вихідної напруги в частотному діапазоні від 20 Гц до 1 МГц і амплітудою від 0 до 6,3 В.

Вольтметри 3 і 5 призначені для вимірювання амплітуди відповідно вхідної U_1 та вихідної U_2 напруги від 0,1 мВ до 200 В у діапазоні частот від 20 Гц до 3 МГц.

Осцилограф 4 використовується для спостереження на екрані електронно-променевої трубки форми напруги і вимірювання параметрів напруги від 30 мВ до 140 В у частотному діапазоні від 3 Гц до 10 МГц.

Лабораторний стенд 2 забезпечує включення одного з чотирьох лабораторних модулів, включення певної схеми в даному лабораторному модулі, підключення джерел живлення і джерел змінної напруги.

3. Схема електрична принципова лабораторного модуля «Зворотній зв'язок у підсилювачах»

Схема принципова електрична лабораторного модуля «ЗЗП» наведена на рис. 2.2.

Три підсилювача зібрані на біполярному *n-p-n* транзисторі VT_1 типу МП37Б. За допомогою резисторів R_2-R_3 задають напругу зміщення на базу транзистора VT_1. Резистор R_4 в колі емітера транзистора VT_1 є термостабілізуючим по постійному струму, задає початковий потенціал емітера, а при включенні перемикача П1 конденсатор C_2 відсутній,

забезпечується введення негативного зворотного зв'язку також і по змінному струму. Резистор R_5 в колі колектора є навантажувальним резистором транзистора, на якому виділяються підсилені напруга, струм і потужність каскаду. Через розділювальний конденсатор C_3 паралельно резистору R_5 по змінному струму підключаються, при замиканні перемикача П7, послідовно включені резистори R_6- R_7. При замиканні перемикача П5 резистор R_6 закорочується. При включенні перемикача П2 вводиться негативний зворотний зв'язок (НЗЗ) по напрузі, завдяки якому напруга зворотного зв'язку надходить паралельно на вхід підсилювача через резистор R_8 та розділювальний конденсатор C_4. Конденсатори C_1, C_3, C_4 – є розділювальними, які розривають відповідні кола по постійному струму та пов'язують безпосередньо ці кола по змінному струму. Конденсатор C_2 є блокуючим, який закорочує резистор в колі емітера R_4 та усуває НЗЗ по струму. Резистор R_1 включений послідовно з вхідним опором підсилювача при розімкнутому перемикачі П6.

Четвертий підсилювач зібраний на інтегральному підсилювачі DA_1 типу TL082 та резисторах R_2, R_3, R_4. Резистор R_1 включений послідовно з вхідним опором підсилювача при розімкнутому перемикачі П6. Резистор R_5 включений паралельно вихідному опору підсилювача при замиканні перемикача П7. При замиканні перемикачів П3, П4 включаються опір НЗЗ по напрузі відповідно R_3, R_4.

У табл. 2.1 вказано призначення перемикачів П1-П7, а в табл. 2.2 наведені електронні схеми підсилювачів без зворотного зв'язку та зі зворотними зв'язками.

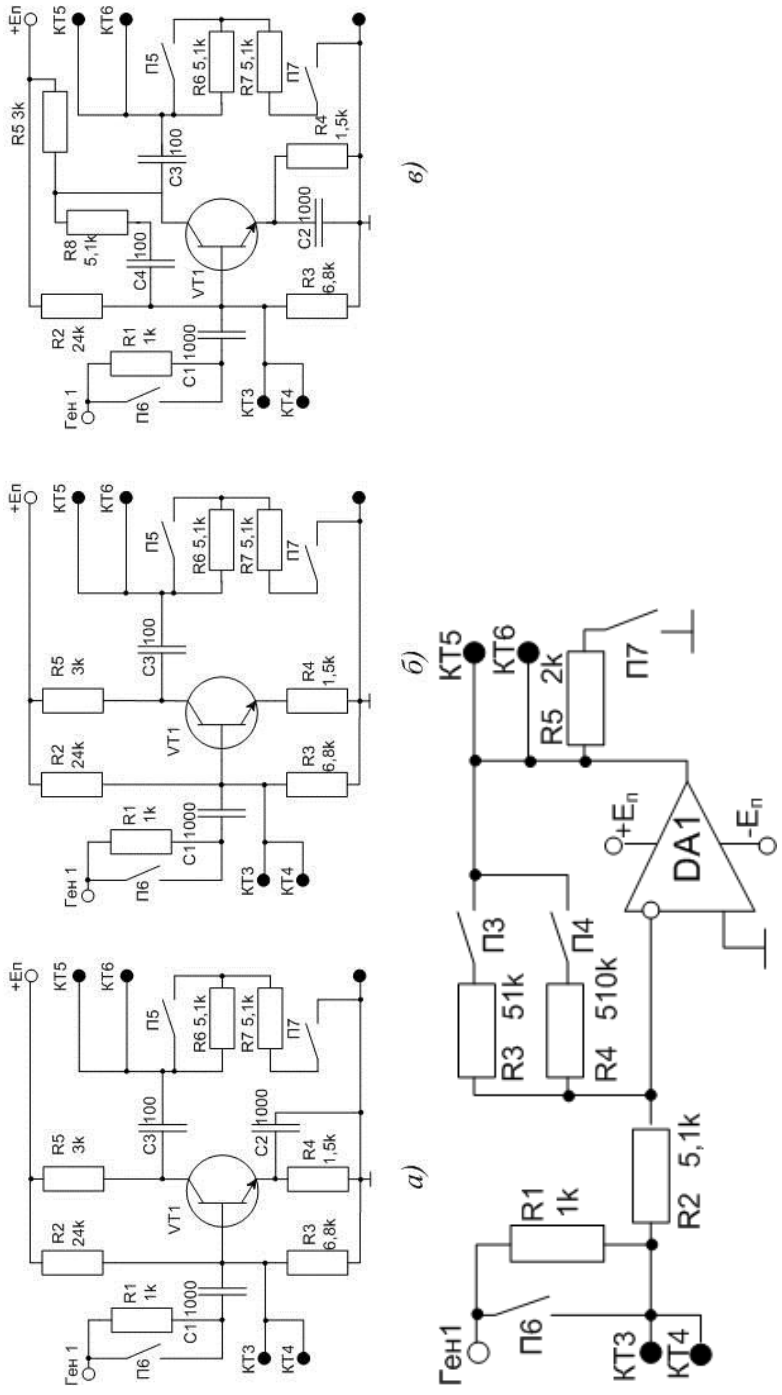


Рис. 2.2 Схема електрична принципова лабораторного модуля «ЗЗП»:

а) схема без ЗЗ (П1-вкл),

б) схема НЗЗ по току (П2-вкл),

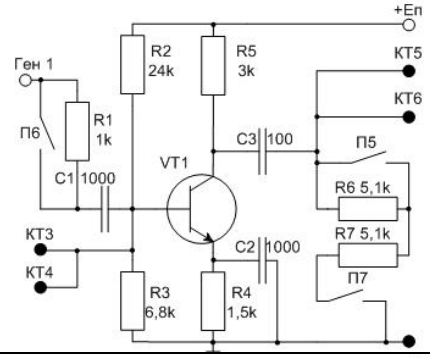
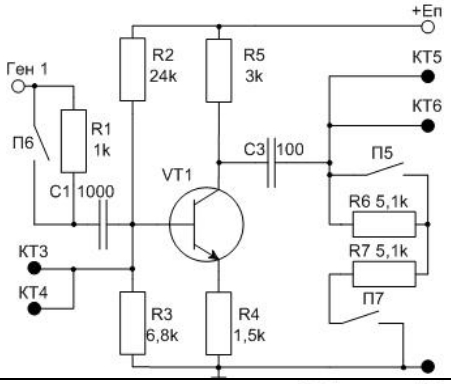
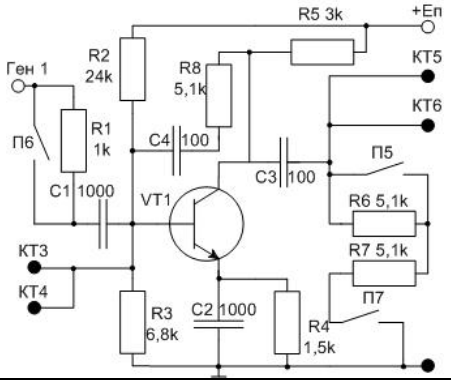
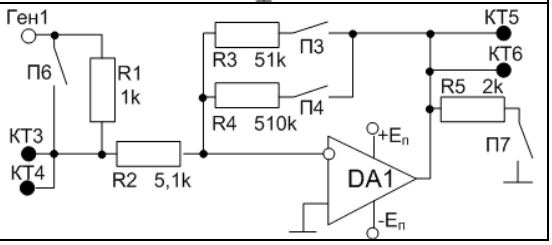
в) схема НЗЗ по напрузі (П3-вкл),

г) схема ЗЗ на операційному підсилювачі (П4-вкл).

Таблиця 2.1. Призначення перемикачів.

№	Призначення перемикачів
П1	Вмикає підсилювач на БТ з НЗЗ по току
П2	Вмикає підсилювач на БТ з НЗЗ по напрузі
П3	Вмикає підсилювач на ОП при K_U=10
П4	Вмикає підсилювач на ОП при K_U=100
П5	Закорочує резистор R_6 – навантаження підсилювача на БТ
П6	Закорочує резистор R_1 у підсилювачах на БТ та ОП
П7	Підключає резистори навантаження R_6-R_7 у підсилювач на БТ, або R_5 у ОП

Таблиця 2.2. Реалізовані в лабораторному модулі схеми.

Тип ЗЗ	Перемикач замкнутий	Схема електрична принципова
Підсилювач на БТ без ЗЗ	-	
Підсилювач на БТ із НЗЗ по току	П1	
Підсилювач на БТ із НЗЗ по напрузі	П2	
ОП із НЗЗ по напрузі	П3 (при K_U=10) П4 (при K_U=100)	

4. Домашнє завдання

4.1. Вивчити:

- • способи зняття напруги зворотного зв'язку з виходу та подачі на вхід підсилювача;
- • вплив зворотного зв'язку на функції підсилювача ($R_{вх}$, $R_{вих}$, K_U, K_I, $f_н$, $f_в$, Δf) та нестабільність цих функцій.

4.2. Розрахувати в символьному вигляді та чисельно функції ($R_{вх}$, $R_{вих}$, K_U) однокаскадного підсилювача на транзисторі T_1 без НЗЗ, із НЗЗ по току, із НЗЗ по напрузі на середніх, нижніх та верхніх частотах.

5. Проведення лабораторних досліджень

5.1. Включити установку для дослідження лабораторного модуля «НЗП» відповідно до блок-схеми (рис. 2.1) та включити мережеву напругу 220 В.

5.2. Дослідити однокаскадний RC-підсилювач на біполярному транзисторі:

5.2.1. Виміряти і побудувати графік амплітудної характеристики $U_2=U_2(U_1)$ при $f_г$=10 кГц підсилювача без ЗЗ (П1-П7 викл.), із НЗЗ по току (П1 включити), із НЗЗ по напрузі (включити П2).

Відмітити знаком «+» і «–» відповідно найбільше значення вхідної напруги, при яких з'являються помітні нелінійні спотворення вихідної напруги U_2 позитивної і негативної полярності. Обчислити динамічний діапазон вхідного сигналу позитивної $Д^+$ та негативною $Д^-$ полярностей

підсилювачів. Результати вимірювань представити в табл. 2.3 та на рис. 2.3 (криві 1, 2, 3 відповідно для підсилювача без ЗЗ, із $НЗЗ_I$, $НЗЗ_U$).

Таблиця 2.3. До вимірам амплітудних характеристик підсилювача $U_2=U_2(U_1)$ при $f_г$=10 кГц.

№	U_1, мВ	U_2, В		
		Без ЗЗ (П1- П7 викл.)	НЗЗ по току (П1- вкл.)	НЗЗ по напрузі (П2–вкл.)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
Визначити	$Д_г^+ = \frac{U_{вх\max}^+}{U_{вх\min}}$			
	$Д_г^- = \frac{U_{вх\max}^-}{U_{вх\min}}$			

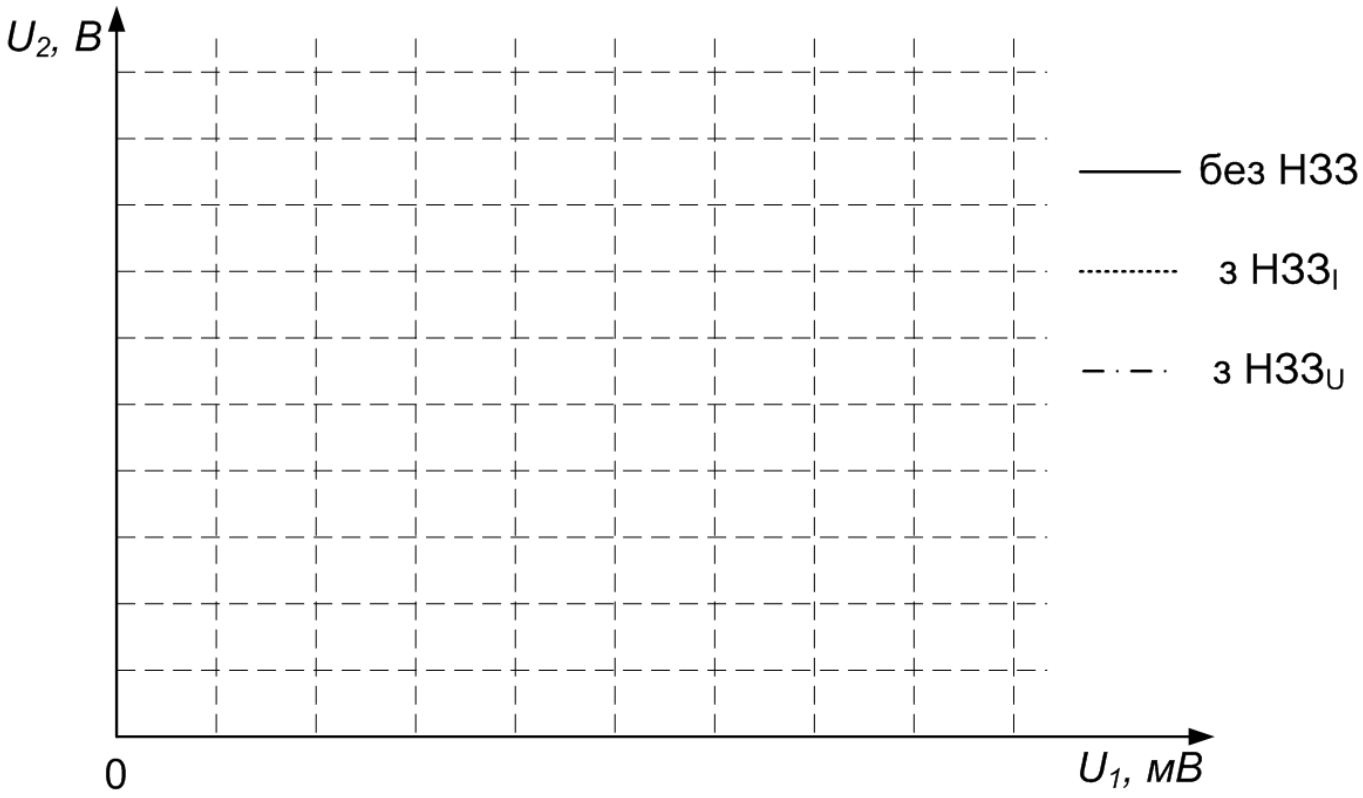


Рис. 2.3 Амплітудна характеристика підсилювача:

1 – без ЗЗ, 2 – із $НЗЗ_I$, 3 – із $НЗЗ_U$.

5.2.2. Виміряти і обчислити функції ($R_{вх}$, $R_{вих}$, K_U, K_I, K_P) підсилювача без ЗЗ, із НЗЗ по струму, із НЗЗ по напрузі при $f_г$=10 кГц, U_1=10…50 мВ, $R_н$=R_6+R_7. Результати вимірювань та обчислень функцій схем внести в табл. 2.4.

5.2.3. Виміряти три точки амплітудно-частотної характеристики U_2=U_2(f) підсилювача без ЗЗ (П1-П7 викл.), із НЗЗ по току (П1-вкл.), із НЗЗ по напрузі (П2-вкл.), U_1=10 мВ, на частотах f_1=$f_н$, f_2=10 кГц, f_3=$f_в$. Нижню $f_н$ та верхню $f_в$ частоти визначити відповідно як мінімальну та максимальну частоти, при яких вихідна напруга зменшується до 0,707*U_2 при f_2=10 кГц. Результати вимірювань внести в табл. 2.4.

5.2.4. Виміряти та визначити відносну нестабільність коефіцієнта передачі напруги підсилювача $\frac{\Delta K_U}{K_U}$ без зворотного зв'язку, із НЗЗ по струму (П1-вкл.), із НЗЗ по напрузі (П2-вкл.) Результат вимірювань і обчислень внести в табл. 2.6.

5.3. Досліджувати підсилювач на інтегральному операційному підсилювачі:

5.3.1. Виміряти і побудувати графік амплітудної характеристики U_2=U_2(U_1) при $f_г$=10 кГц підсилювача при K_U =10 (П3 викл.) та при K_U =100 (замкнути П4). Відмітити знаком «+» і «–» відповідно найбільше значення вхідної напруги, при яких з'являються помітні нелінійні спотворення вихідної напруги U_2 позитивної і негативної полярності. Обчислити

динамічний діапазон вхідного сигналу позитивної $Д^+$ та негативної $Д^-$ полярностей підсилювачів. Результати вимірювань представити в табл. 2.5 та на рис. 2.4.

5.3.2. Виміряти дві точки амплітудно-частотної характеристики *U2=U2(f)* підсилювача на інтегральному операційному підсилювачі (рис. 2.2., *г*) при різних $K_{U0}=\frac{U_2}{U_1}=10$ (при П3-вкл.) та $K_{U0}=\frac{U_2}{U_1}=100$ (при П4-вкл.), при U_1=10 мВ. Нижню $f_н$ та верхню $f_в$ частоти визначити відповідно як мінімальну та максимальну частоти, при яких вихідна напруга зменшується до 0,707*U_2 при $f_г$=1 кГц. Результати вимірювань внести в табл. 2.7.

Таблиця 2.4. До вимірюванню функцій підсилювачів.

№	Показники роботи підсилювача	Підсилювач в схемі			Примітки
		Без ЗЗ	$НЗЗ_I$ (П1)	$НЗЗ_U$ (П2)	
1	При R_1=0 $U_1=U_г$, мВ	10	50	10	Натиснути П6 і встановити ручкою вихід генератора U_1. Перемикач П7 розімкнений.
2	При R_1=1кОм (П6–розімкнений)U_1',мВ				Розімкнути П6 і виміряти вольтметром V_1 напругу U_1'. Перемикач П7 розімкнений.
3	$R_{вх} = R_1 \frac{U_1'}{Uг - U_1'}$, Ом				Обчислити вхідний опір (R_1=1кОм)
4	При відключенні $R_н=R_6+R_7$ U_{2xx}, мВ ($U_1=U_г$,)				Розімкнути П7 і вольтметром V_2 виміряти U_{2xx}. Перемикач П6 замкнутий.
5	При відключенні $R_н=R_6+R_7$ U_2, мВ				Замкнути П7 і вольтметром V_2 виміряти напругу U_2 Перемикач П6 замкнутий.
6	$R_{вих} = (R_6 + R_7)\frac{U_{2xx} - U_2}{U_2}$ де $R_н=R_6+R_7$=12 кОм				Обчислити вихідний опір $R_{вих}$
7	$K_U = \frac{U_2}{U_1}$				Обчислити відношення раніше виміряних U_1 та U_2
8	$K_I = \frac{I_н}{I_1} = \frac{R_{вх}}{R_н} K_U$				Обчислити коефіцієнт передачі струму як відношення $R_{вх}$ та $R_н$, помножене на K_U
9	$K_P = \frac{P_н}{P_1} = K_U \cdot K_I$				Обчислити добуток K_U и K_I
10	$f_н=f_{min}$, при U_2=0,707·U_2 (f=10 кГц)				Перемикач П6 замкнутий. Перемикач П7 замкнутий.
11	$f_в=f_{max}$, при U_2=0,707·U_2 (f=10 кГц)				Перемикач П6 замкнутий. Перемикач П7 замкнутий.
12	$\Delta f = f_в - f_н$				

Таблиця 2.5. До вимірювань амплітудних характеристик підсилювача $U_2=U_2(U_1)$, при $f_г$=10 кГц

№	U_1, мВ	U_2, В	
		K_U=10 (П3-вкл.)	K_U=100 (П4-вкл.)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
Визначити	$Д_г^+ = \frac{U_{вх\max}^+}{U_{вх\min}}$		
	$Д_г^- = \frac{U_{вх\max}^-}{U_{вх\min}}$		

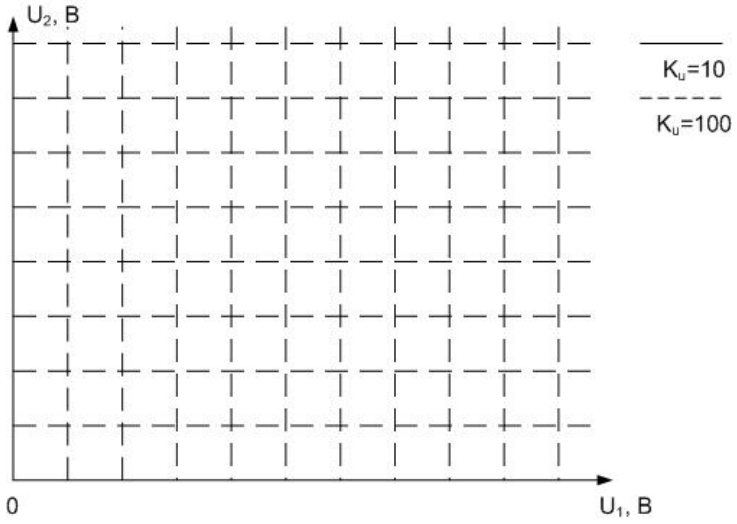


Рис. 2.4 Амплітудна характеристика підсилювача:1 – K_U=10, 2 – K_U=100.

Таблиця 2.6. До вимірювань відносної нестабільності коефіцієнта передачі напруги підсилювача при U_1=10 мВ, $f_г$=10 кГц (П6 – замкнутий).

Підсилювач без ЗЗ				Підсилювач із НЗЗ по току				Підсилювач із НЗЗ по напрузі			
П7 – включити				П1, П7 – включити				П2, П7 – включити			
$R_н$=R_6+R_7= =10,2 кОм П5- вимк.		$R_н$=R_6+R_7= =5,1 кОм П5-вкл.		$R_н$=R_6+R_7= =10,2 кОм П5- вимк.		$R_н$=R_6+R_7= =5,1 кОм П5-вкл.		$R_н$=R_6+R_7= =10,2 кОм П5- вимк.		$R_н$=R_6+R_7= =5,1 кОм П5-вкл.	
U_2,В	$K_U=\frac{U_2}{U_1}$	$U_2^{'}$,В	$K_U^{'}=\frac{U_2^{'}}{U_1}$	U_2,В	$K_U=\frac{U_2}{U_1}$	$U_2^{'}$,В	$K_U^{'}=\frac{U_2^{'}}{U_1}$	U_2,В	$K_U=\frac{U_2}{U_1}$	$U_2^{'}$,В	$K_U^{'}=\frac{U_2^{'}}{U_1}$
$\delta=\frac{K_U'-K_U}{K_U}100\%=\frac{U_2'-U_2}{U_2}100\%$				$\delta=\frac{K_{U\beta}'-K_{U\beta}}{K_{U\beta}}100\%=\frac{U_{2\beta}'-U_{2\beta}}{U_{2\beta}}100\%$				$\delta=\frac{K_{U\beta}'-K_{U\beta}}{K_{U\beta}}100\%=\frac{U_{2\beta}'-U_{2\beta}}{U_{2\beta}}100\%$			

Таблиця 2.7. До вимірюванню АЧХ підсилювача на ІОП.

	При U_1 =10мВ	
	K_{Uo}=10 (П3 – вкл.)	K_{Uo}=100 (П4 – вкл.)
При f_0 =10 кГц виміряти U_{2o}, мВ		
0,707* U_{2o}, мВ		
$fв$, Гц		

6. Зміст звіту

6.1. Назва лабораторної роботи та її мета.

6.2. Блок-схема лабораторної установки, назва та технічні дані використаних блоків.

6.3. Схема електрична принципова лабораторного модуля «ЗЗП».

6.4. Результати розрахунків, графіки, отримані при виконанні домашнього завдання.

6.5. Таблиці та графіки з експериментальними даними, отримані при вимірі частотних і амплітудних характеристик.

6.6. Висновки та оцінка результатів експерименту.

7. Контрольні питання

7.1. Що являє собою поняття зворотний зв'язок (ЗЗ), позитивний та негативний ЗЗ, ЗЗ по струму та напрузі?

7.2. Пояснити способи підключення ЗЗ на вхід підсилювача.

7.3. Пояснити за схемою (рис. 2.2) роботу місцевих ЗЗ по постійному струму та напрузі.

7.4. Як впливає ЗЗ на вхідний та вихідний опору схеми?

7.5. Як впливає ЗЗ на підсилення та нестабільність підсилення?

7.6. Пояснити призначення всіх компонентів підсилювача (рис. 2.2).

7.7. Як впливає ЗЗ на нижню $f_н$ та верхню $f_в$ граничні частоти та смугу пропускна Δf?

7.8. Як впливає ЗЗ на рівень шумів на виході підсилювача, зміни зовнішніх умов його роботи?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3.
ОПЕРАЦІЙНІ ЛАНКИ НУЛЬОВОГО ПОРЯДКУ

1. Мета роботи

Вивчення принципів роботи, дослідження амплітудних характеристик та параметрів різних функціональних ланок на основі інтегральних операційних підсилювачів (інвертуючого та неінвертуючого підсилювачів, сумуючого та віднімаючого підсилювачів).

2. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Операційні ланки нульового порядку»

Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Операційні ланки нульового порядку» («ОЛНП») наведена на рис. 3.1.

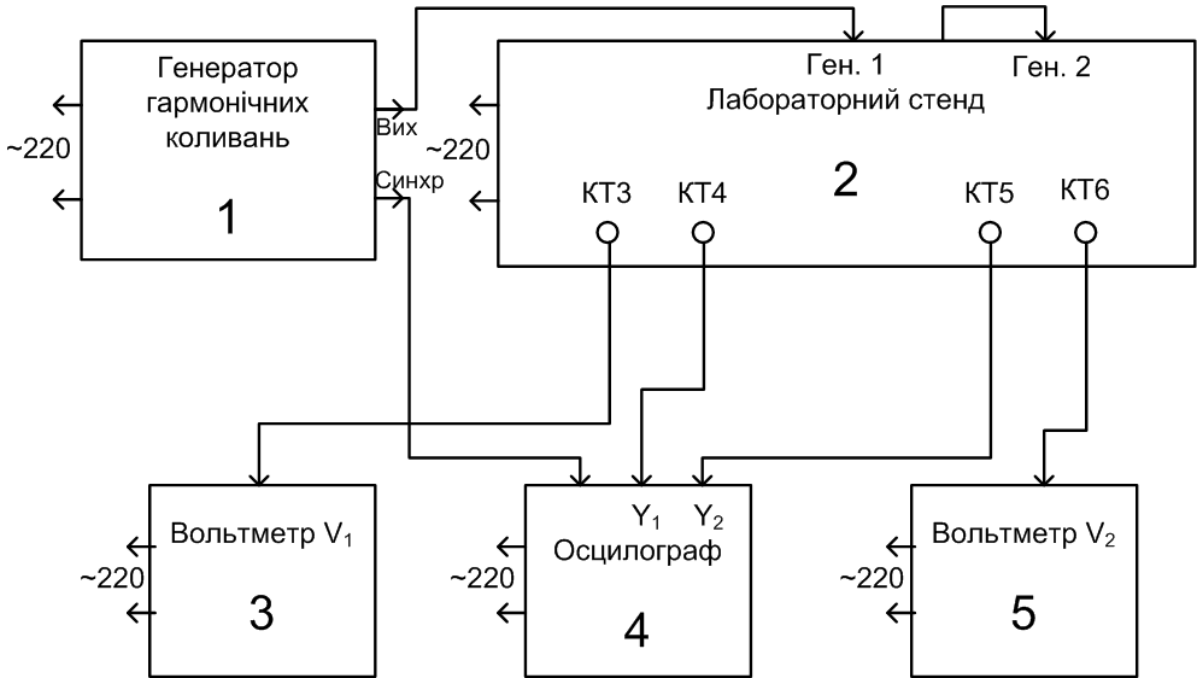


Рис. 3.1. Блок-схема лабораторного макета «Операційні ланки нульового порядку».

Лабораторна установка для дослідження лабораторного модуля «ОЛНП» складається з генератора гармонічних коливань 1 типу Г3-112, лабораторного стенду 2 типу «Каскад М», вольтметрів 3 і 5 типу В3-38, осцилографа 4 типи С1-55. До складу лабораторного стенду 2 входять стабілізований блок живлення, електронний комутатор, формувач імпульсів, чотири лабораторних модулі.

Генератор 1 є джерелом гармонійного вихідної напруги в частотному діапазоні від 20 Гц до 1 МГц і амплітудою від 0 до 6,3 В.

Вольтметри 3 і 5 призначені для вимірювання амплітуди відповідно вхідної U_1 та вихідної U_2 напруги від 0,1 мВ до 200 В у діапазоні частот від 20 Гц до 3 МГц.

Осцилограф 4 використовується для спостереження на екрані електронно-променевої трубки форми напруги та виміру параметрів напруги від 30 мВ до 140 В в частотному діапазоні від 3 Гц до 10 МГц.

Лабораторний стенд 2 забезпечує включення одного з чотирьох лабораторних модулів та підключення джерел живлення і джерел змінної напруги.

3. Схема електрична принципова лабораторного модуля «Операційні ланки нульового порядку»

Схема електрична принципова лабораторного модуля «ОЛНП», реалізується за допомогою лабораторного стенду, наведена на рис. 3.2.

У таблиці 3.1. наведено п'ять схем ланок нульового порядку, які можна отримати в залежності від включення перемикачів П1-П5 лабораторного стенду:

1. інвертуючий масштабний підсилювач (ІМП) при замиканні перемикача П1;

2. неінвертуючий масштабний підсилювач (НМП) при замиканні перемикача П2;

3. диференціальний масштабний підсилювач (ДМП) при замиканні перемикача П3;

4. інвертуючий сумуючий підсилювач (ІСП) при замиканні перемикача П4;

5. неінвертуючий сумуючий підсилювач (НСП) при замиканні перемикача П5;

У всіх операційних ланках нульового порядку використовується інтегральний операційний підсилювач *DA1-DA3* типу TL084CD, *DA4-DA5* типу TL082CD. Напруга живлення операційних підсилювачів $+E_П = +7{,}5$ В, $-E_П = -7{,}5$ В.

Реалізація операційних ланок нульового порядку здійснюється шляхом підключення резисторів R_2-R_5 до інформаційних затискачів операційних підсилювачів *DA1-DA5*.

Резистори R_1 та R_4 в схемах ІМП та НМП використовуються для визначення відповідно вхідного $R_{вх}$ та вихідного $R_{вих}$ опорів масштабних підсилювачів у відповідності з методиками, викладеними в додатку 3.

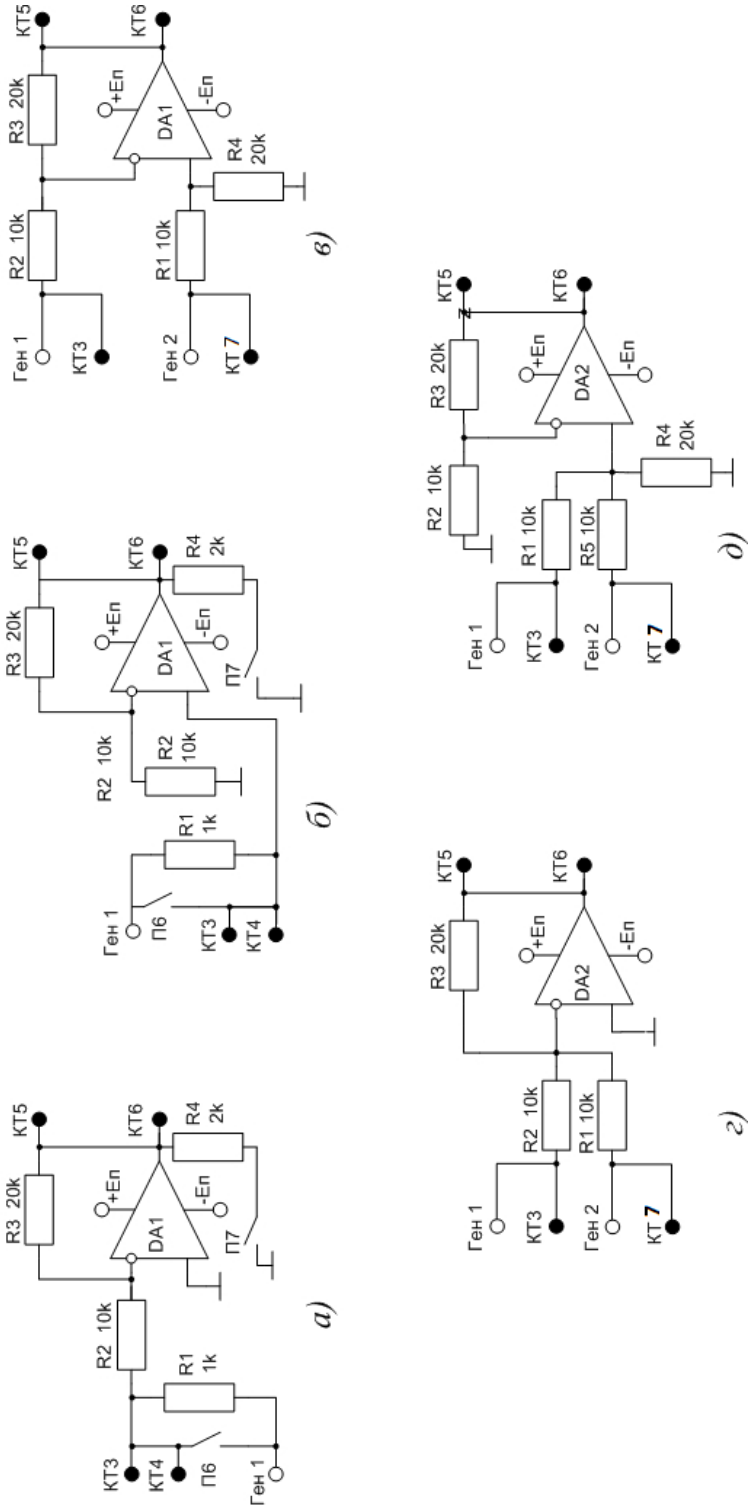
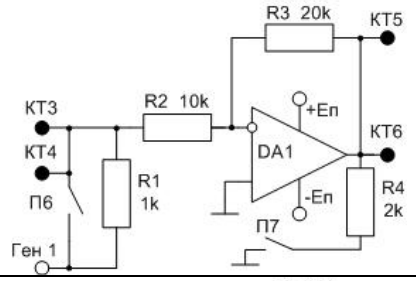
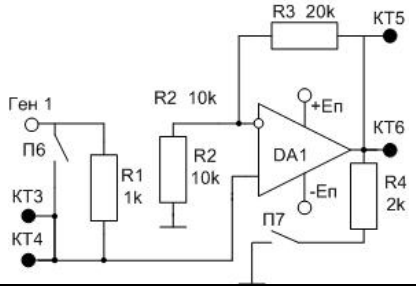
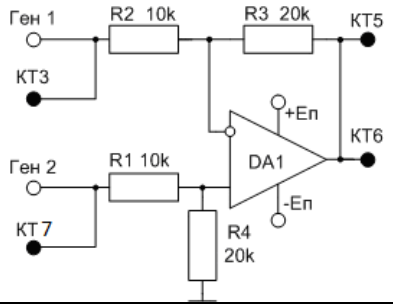
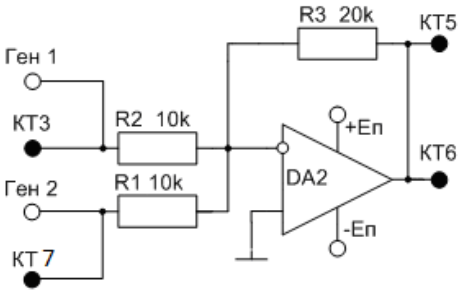
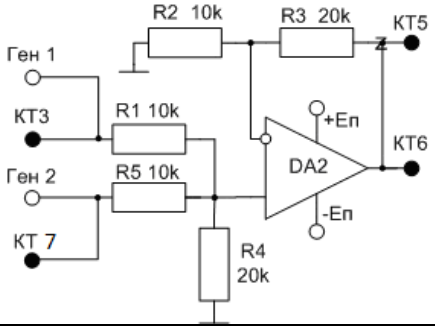


Рис. 3.2 Схема електрична принципова лабораторного модуля «ОЛНП»: *а)* схема ІМП (П1-вкл), *б)* схема НМП (П2-вкл), *в)* схема ДМП (П3-вкл), *г)* схема ІСП (П4-вкл), *д)* схема НСП (П5-вкл).

Таблиця 3.1. Реалізовані в лабораторному модулі схеми ОЛНП.

Тип ОЛНП	Перемикач замкнутий	Схема електрична принципова ОЛНП
ІМП	П1	
НМП	П2	
ДМП	П3	
ІСП	П4	
НСП	П5	

4. Домашнє завдання

4.1. Вивчити елементи інтегральної схемотехніки (джерела опорної напруги, генератор стабільного струму, транслятор рівня напруги, диференційний підсилювач напруги, вихідний каскад підсилювача).

4.2. Вивчити макромодель інтегрального підсилювача (реального, досконалого, ідеального) та алгоритми формування їх рівняння стану.

4.3. Вивчити схеми масштабних підсилювачів: інвертуючого, неінвертуючого, сумуючого і віднімаючого (диференціального).

4.4. Для схем інвертуючого і неінвертуючого масштабних підсилювачів визначити функції ($K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$, $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}$, $R_{вих} = \frac{U_{вих}}{I_{вих}}$), вважаючи операційний підсилювач досконалим та ідеальним.

4.5. Записати рівняння для вихідної напруги в схемах диференціального підсилювача, інвертуючого та неінвертуючого суматорів.

5. Проведення лабораторних досліджень

5.1. Включити лабораторну установку для дослідження операційних ланок нульового порядку. Підключити лабораторну установку відповідно до блок-схеми (рис. 3.1).

5.2. Для схем масштабного підсилювача з інвертування та без інвертування:

5.2.1. Виміряти вхідний $R_{вх}$ та вихідний $R_{вих}$ опір, коефіцієнт передачі напруги K_U при підключенні опорів R_1 та R_4 і $U_{вх}=U_1=0{,}1$ В на частоті $f_г=1$ кГц.

5.2.2. Обчислити коефіцієнти передачі напруги $K_U = \frac{U_2}{U_1}$, струму $K_I = \frac{I_н}{I_1} = \frac{R_{вх}}{R_4} K_U$ та потужності $K_P = \frac{P_н}{I_1} = K_U K_I$.

5.2.3. Визначити максимальну частоту масштабних підсилювачів при припустимому зменшенні коефіцієнта передачі до рівня $M_д = \frac{K_U(f_в)}{K_U(f_0 = 1кГц)} = 0{,}707$ (тобто $K_U(f_в) = 0{,}707 \cdot K_U(f_0 = 1кГц)$).

5.2.4. Змалювати з екрана осцилографа та порівняти амплітуди і фази напруг U_1 та U_2..

5.2.5. Результат вимірювань та осцилограми внести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. До вимірювань функцій масштабних підсилювачів (ІМП, НМП).

№	Показники роботи підсилювача	Підсилювач в схемі		Примітки
		ІМП (П1)	НМП (П2)	
1	При R_1=0 (П6– замкнутий) $U_г$, мВ	100	100	Замкнути перемикач П6 та встановити $U_г$=100 мВ ручкою виходу генератора
2	При R_1=1кОм (П6– розімкнений) U_1, мВ			Розімкнути П6 та виміряти вольтметром V_1 напругу U_1
3	$R_{вх} = R_1 \frac{U_1}{U_г - U_1}$, Ом			Обчислити вхідний опір
4	При R_4=∞, U_{2xx}, мВ			Розімкнути П7 та вольтметром V_2 виміряти U_{2xx} при U_1=$U_г$=100 мВ (П6 - замкнутий)
5	При R_4=2кОм, U_2, мВ			Замкнути П7 (підключити на вихід підсилювача резистор R_4=2кОм) та вольтметром V_2 виміряти напругу U_2 (П6 - замкнутий)
6	$R_{вих} = R_4 \frac{U_{2xx} - U_2}{U_2}$, Ом			Обчислити вихідний опір $R_{вих}$
7	$K_U = \frac{U_2}{U_1}$			Обчислити коефіцієнт передачі напруги як відношення раніше виміряних U_1 та U_2
8	$K_I = \frac{I_{R_4}}{I_1} = \frac{R_{вх}}{R_4} K_U$			Обчислити коефіцієнт передачі струму як відношення $R_{вх}$ та R_4, помножене на K_U
9	$K_P = \frac{P_{R_4}}{P_1} = K_U \cdot K_I$			Обчислити коефіцієнт передачі потужності як добуток K_U та K_I
10	Епюри напруги U_1(—) и U_2(·····)			Змалювати з екрана осцилографа та порівняти амплітуди і фази напруг U_1 та U_2 (П6 та П7 - замкнуті)
11	$f_в$=f_{max}, Гц при $U_{2в}$=0,707*U_2			Змінюючи частоту генеруючих коливань $f_г$ та підтримуючи амплітуду U_{1m}=100 мВ, визначити частоту, при якій U_{2m} знизиться до 0,707*U_{2m} (П6 і П7 - замкнуті)

5.3. Виміряти та побудувати графік амплітудної характеристики $U_2=U_2(U_1)$ неінвертуючого підсилювача (П2) на частоті $f_г$=1 кГц. Відзначити знаками «+» і «–» відповідно найбільше значення вхідної напруги U_1 ($U_{1\max}^{+}$ та $U_{1\max}^{-}$), при яких з'являються помітні нелінійні спотворення вихідної напруги U_2 позитивної та негативної полярності. Обчислити динамічний діапазон вхідного напруги позитивної $Д^{+}$ та негативною $Д^{-}$ полярностей: $Д^{+}=\frac{U_{1\max}^{+}}{U_{1\min}}$ та $Д^{-}=\frac{U_{1\max}^{-}}{U_{1\min}}$, де $U_{1\min}$ – мінімальна амплітуда вхідної напруги, помітна на рівні шумів при заданому відношенні $\frac{сигнал}{шум}$ (взяти $\frac{сигнал}{шум}=3$). Результат вимірювань амплітудної характеристики внести в таблицю 3.3 та рис. 3.3.

5.4. Для диференціального масштабного підсилювача, інвертуючого та неінвертуючого сумуючих підсилювачів змалювати осцилограми вхідних напруг ($U_{11}=U_г$, U_{12}) та вихідної напруги (U_2) на частоті $f_г$=1 кГц, U_{11m}=1 В, де:

$U_{11}(t)=U_{1m}\sin(\omega t+\phi)$ при $0\le t\le T$; U_{11} знімається з виходу КТ3,

$U_{12}(t)=\begin{cases}U_{2m}, & при \quad t_1\le t\le(t_1+t_u)\\ 0, & при\ (t_1+t_u)\le t\le(t_1+t_u+t_n)\end{cases}$, U_{12} знімається з виходу КТ7.

U_2 знімається з виходу КТ5.

Осцилограми зобразити на рис. 3.4.

Для зазначених трьох підсилювачів (ДМП, ІСП, НСП) записати аналітичний вираз для вихідної напруги $U_2(t)$ у символьному вигляді та чисельно і порівняти результати вимірювань з розрахунками, зробити висновки по кожному пункту досліджень.

Тут U_{1m} - амплітуда вхідного сигналу U_{11}, U_{2m} - максимальне значення

вхідного сигналу U_{12}, T - період вхідного сигналу U_{11}, t_u - тривалість імпульсу вхідного сигналу U_{12}, t_n - тривалість паузи вхідного сигналу U_{12}.

5.5. Визначити споживану потужність установки при проведенні лабораторних досліджень, знаючи час проведення досліджень та споживану потужність блоків установки.

6. Зміст звіту

6.1. Назва лабораторної роботи та її мета.

6.2. Блок-схема лабораторної установки: назва, призначення та технічні дані використаних блоків.

6.3. Схема електрична принципова лабораторного модуля.

6.4. Результати розрахунків, графіки, отримані при виконанні домашнього завдання.

6.5. Таблиці та графіки з експериментальними даними, отримані при вимірі частотних і амплітудних характеристик.

6.6. Висновки та оцінка результатів експерименту.

Таблиця 3.3. До вимірювань амплітудної характеристики неінвертуючого масштабного підсилювача.

									U^{-}_{1max}	U^{+}_{1max}	U_{1min}	$Д^{+}=\frac{U^{+}_{1max}}{U_{1min}}$	$Д^{-}=\frac{U^{-}_{1max}}{U_{1min}}$
U_{1m}, В													
U_{2m}, В													

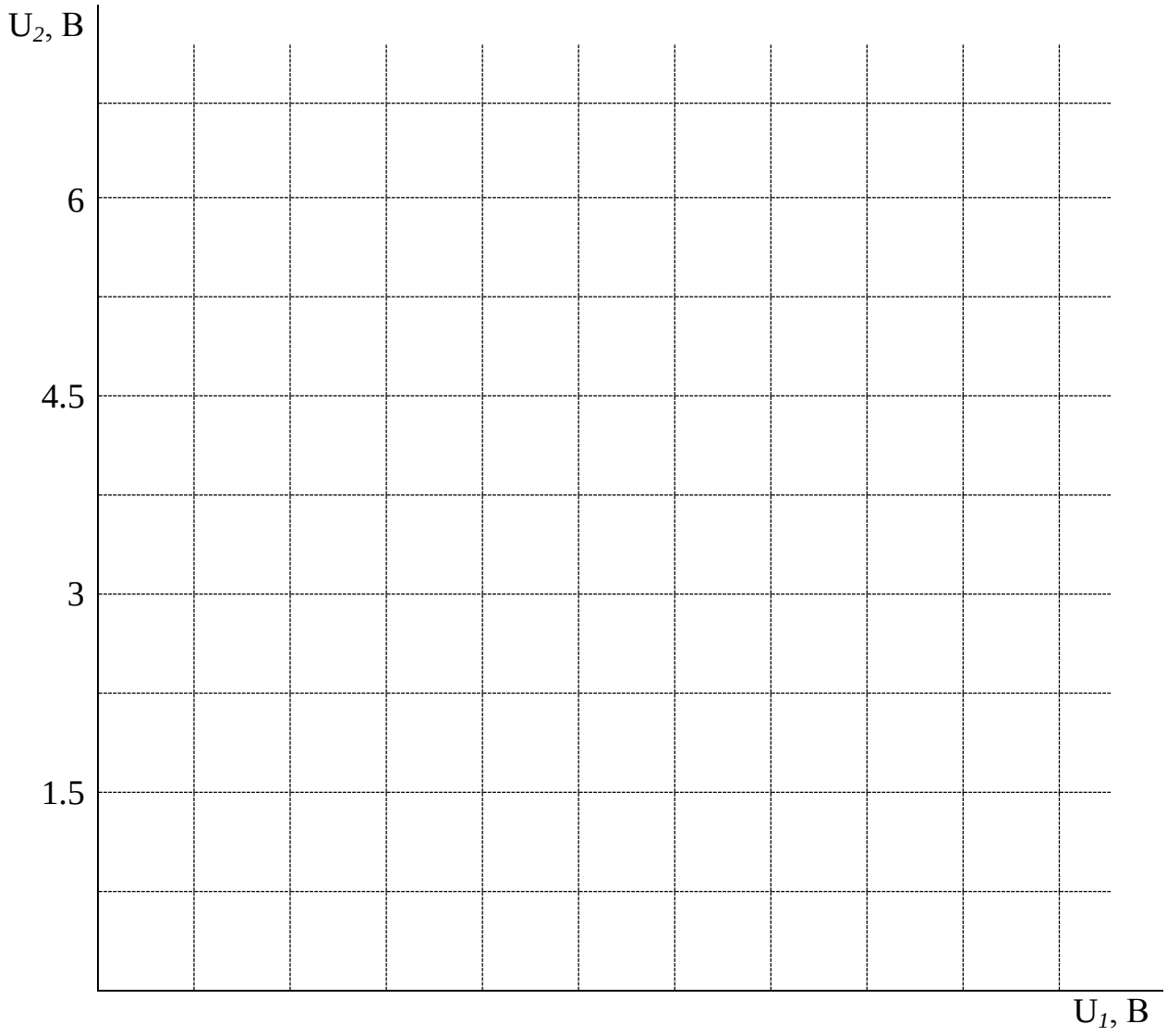


Рис. 3.3. Амплітудна характеристика НМП.

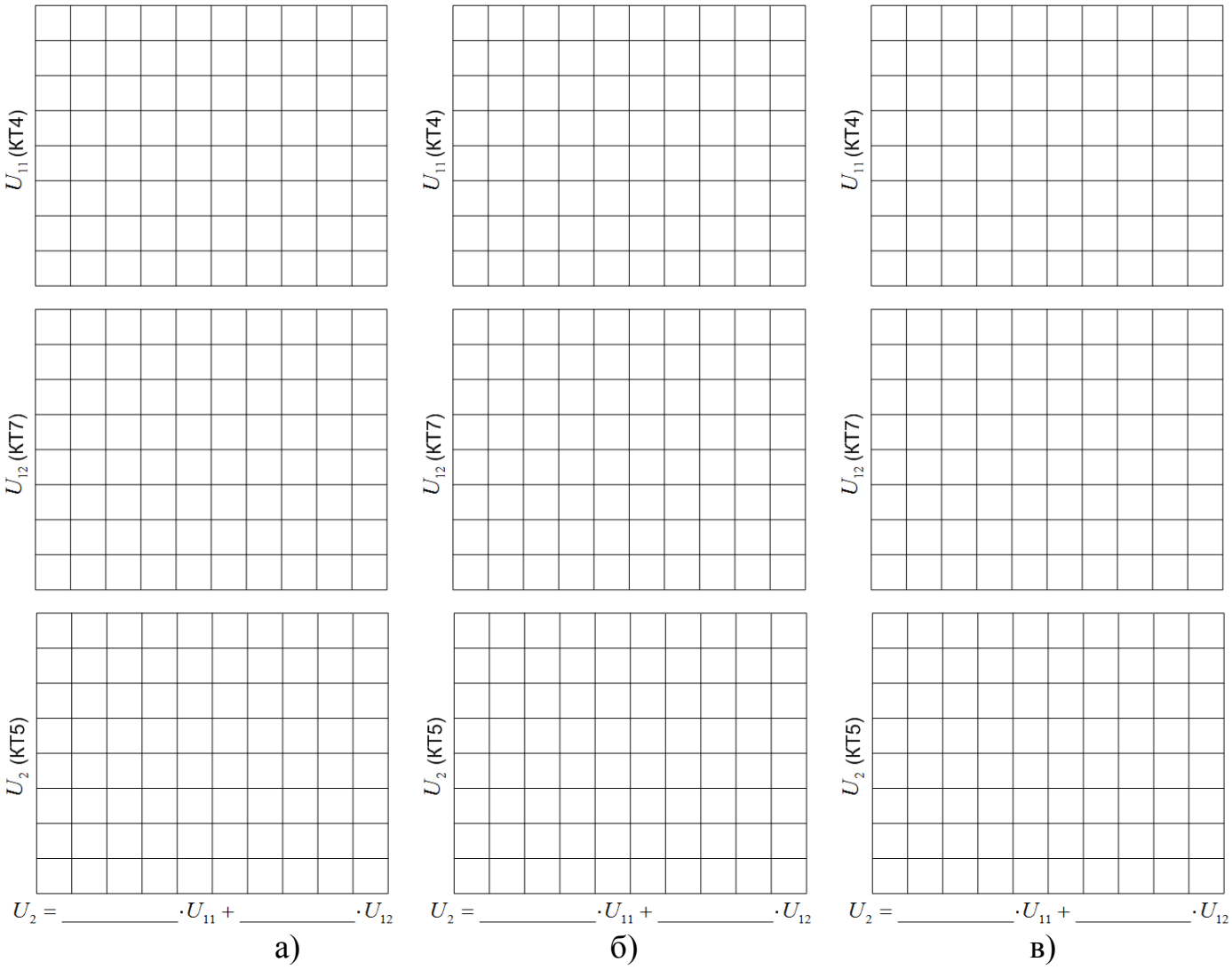


Рис. 3.4. Осциллограммы $U_{11}(t)$, $U_{12}(t)$ и $U_2(t)$ для ДМУ (а), ИСУ (б) и НСУ (в).

7. Контрольні питання

7.1. Назвіть призначення кожного компонента лабораторного модуля «ОЛНП».

7.2. Чим визначається вхідний опір ІМП та НМП?

7.3. Який зворотний зв'язок використовується в операційних ланках нульового порядку?

7.4. Як зміниться посилення НМП, якщо закоротити резистор R_2?

7.5. Як залежать функції K_U, K_I, K_P, $R_{вх}$, $R_{вих}$ від чисельних значень первинних параметрів компонентів?

7.6. Що являє собою амплітудна характеристика підсилювача?

7.7. Що являє собою динамічний діапазон вхідної напруги та чим він обмежений?

7.8. Чи зміниться динамічний діапазон вхідної напруги при зміні джерела живлення підсилювача?

7.9. На скільки відрізняються потенціали інвертуючого та неінвертуючого вхідних затискачів операційного підсилювача?

7.10. В якому діапазоні частот можуть працювати операційні ланки нульового порядку?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4.
АКТИВНІ RC-ФІЛЬТРИ

1. Мета роботи

Вивчення принципів роботи, дослідження амплітудних та частотних характеристик і параметрів активних RC-фільтрів нижніх та верхніх частот, полосно-пропускаючого та полосно-затримуючого фільтрів на інтегральному операційному підсилювачі.

2. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Активні RC-фільтри»

Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «Активні RC-фільтри» («ARC-Ф») наведена на рис. 4.1.

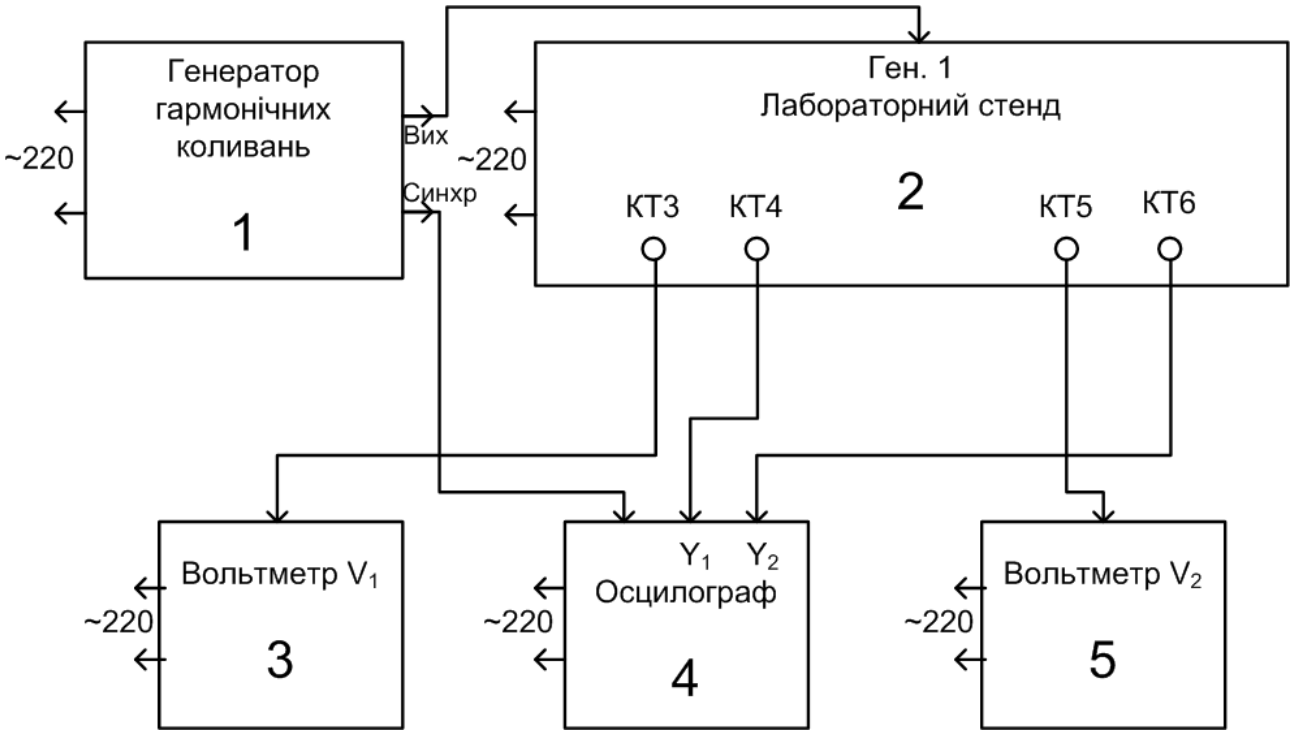


Рис. 4.1. Блок-схема установки для дослідження лабораторного модуля «ARC-фільтр».

Лабораторна установка для дослідження лабораторного модуля «ARC-Ф» складається з генератора гармонічних коливань 1 типу Г3-112, лабораторного стенду 2 типу «Каскад М», вольтметрів 3 та 5 типу В3-38, осцилографа 4 типи С1-55. До складу лабораторного стенду 2 входять стабілізований блок живлення, електронний комутатор, формувач імпульсів, чотири лабораторних модуля.

Генератор 1 є джерелом гармонійної вихідної напруги в частотному діапазоні від 20 Гц до 1 МГц та амплітудою від 0 до 6,3 В.

Вольтметри 3 та 5 призначені для вимірювання амплітуди відповідно вхідної U_1 та вихідної U_2 напруги від 0,1 мВ до 200 В у діапазоні частот від 20 Гц до 3 МГц.

Осцилограф 4 використовується для спостереження на екрані електронно-променевої трубки форми напруги та виміру параметрів напруги від 30 мВ до 140 В у частотному діапазоні від 3 Гц до 10 МГц.

Лабораторний стенд 2 забезпечує включення одного з чотирьох лабораторних модулів, включення певної схеми в даному лабораторному модулі, підключення джерел живлення та джерел змінної напруги.

3. Схема електрична принципова лабораторного модуля «Активні RC-фільтри»

Схема принципова електрична лабораторного модуля «Активні RC фільтри», що реалізується за допомогою лабораторного стенду, наведена на рис. 4.2.

У даному модулі може бути реалізовано 6 видів активних фільтрів: два фільтра нижніх частот - ФНЧ (ФНЧ-1 першого порядку та ФНЧ-2 другого порядку), два фільтра верхніх частот - ФВЧ (ФВЧ-1 першого порядку та ФВЧ-2 другого порядку), полосно-пропускачюий фільтр

другого порядку - ПФ-2, полосно-затримуючий фільтр другого порядку – ЗФ-2. Вибір конкретного фільтру здійснюється за допомогою перемикачів П1-П6, розташованих на лицьовій панелі лабораторного стенду (див. табл. 4.1). Активним підсилювальним елементом є інтегральний операційний підсилювач *DA1* типу TL082. Пасивні ланцюги R_1-C_1 відносяться до ФНЧ-1 та ФВЧ-1 (рис. 4.2, *а*) та *б*) відповідно). Пасивний ланцюг R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 (рис. 4.2, *в*) відносяться до ФНЧ-2. Пасивний ланцюг R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 (рис. 4.2, *г*) відноситься до ФВЧ-2. За допомогою ланцюга R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 (рис. 4.2, *д*) реалізується ПФ-2, а за допомогою ланцюга R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, C_3 (рис. 4.2, *е*) ЗФ-2. Вхідна напруга U_1 від генератора надходить по кабелю на макет та контролюється осцилографом та вольтметром В3-38, підключеним до гнізда «V_1» та спостерігається на екрані осцилографа С1-55, підключеного через кабель до гнізда «Осц. 2 ». Напругу живлення $+E_П = +7.5B$ та $–E_П = -7{,}5B$ надходять на ОП при натисканні кнопки «Вкл.» лабораторного стенду.

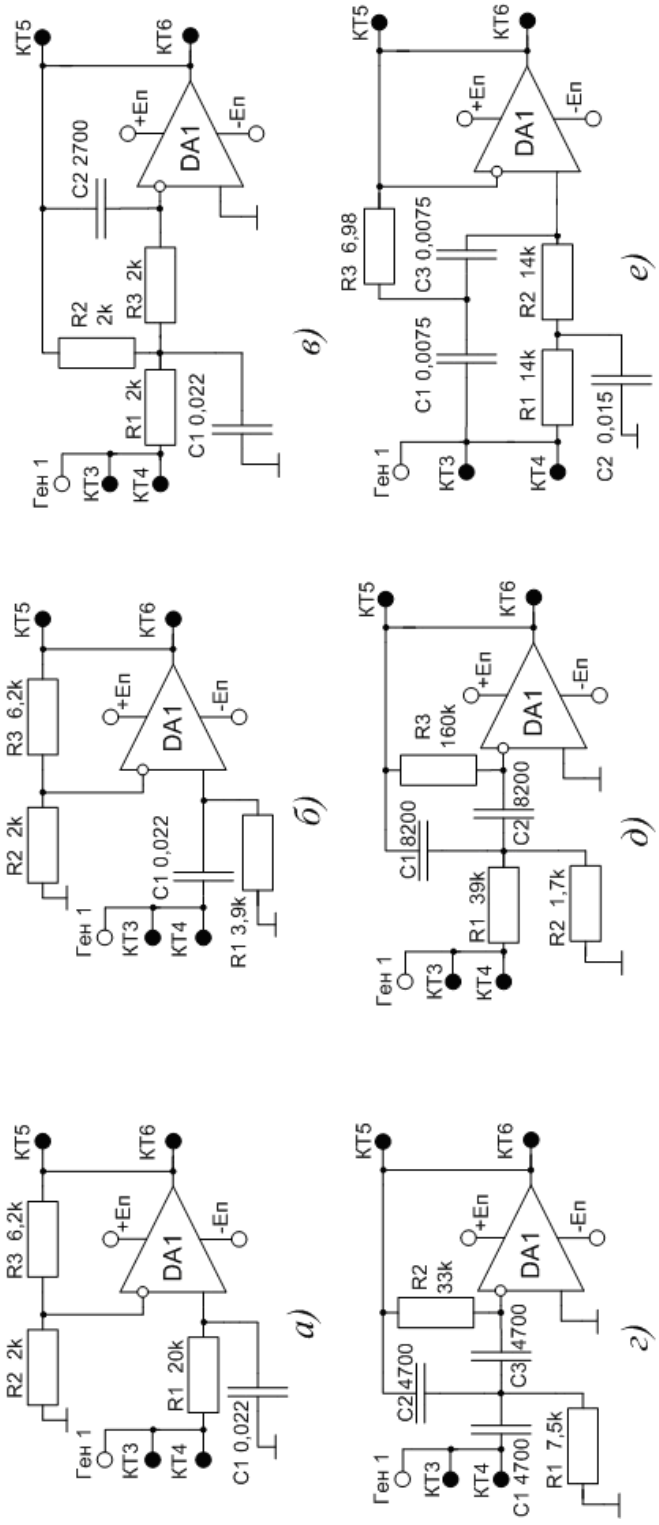
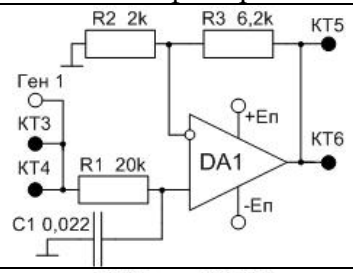
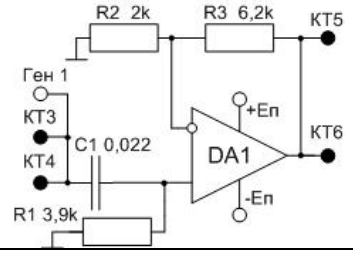
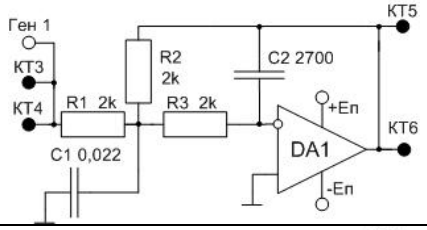
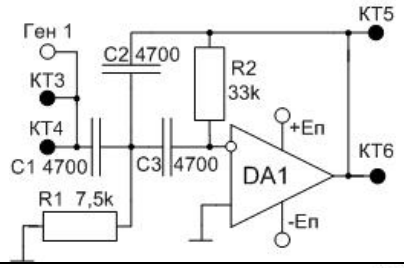
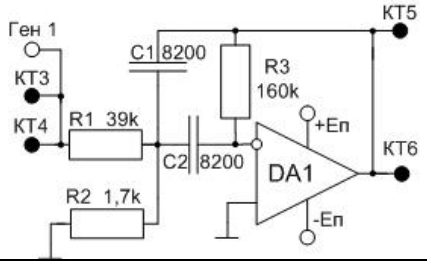
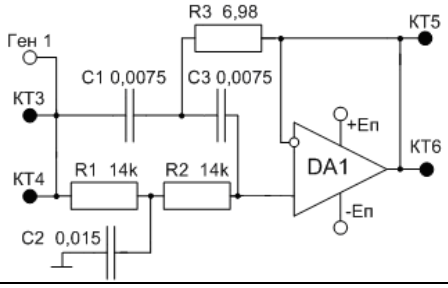


Рис. 4.2. Схема електрична принципова лабораторного модуля «ARC фільтри»: *а)* схема ФНЧ-1 (П1-вкл), *б)* схема ФВЧ-1 (П2-вкл), *в)* схема ФНЧ-2 (П3-вкл), *г)* схема ФВЧ-2 (П4-вкл), *д)* схема ПФ-2 (П5-вкл), *е)* схема ЗФ-2 (П6-вкл).

Таблиця 4.1. Реалізовані в лабораторному модулі схеми ARC-фільтрів.

ARC-фільтр	Перемикач замкнутий	Схема електрична принципова ARC-фільтра
ФНЧ-1	П1	
ФВЧ-1	П2	
ФНЧ-2	П3	
ФВЧ-2	П4	
ПФ-2	П5	
ЗФ-2	П6	

4. Домашнє завдання

4.1. Вивчити схеми різних фільтрів - ФНЧ, ФВЧ, ПФ, ЗФ та фізичні процеси в них.

4.2. Вважаючи, що інтегральний операційний підсилювач ідеальний ($R_{вх}=\infty$, $R_{вих}=0$, підсилення $\mu=\infty$ та $\Delta f=\infty$) визначити функції передачі $K_U(p)$ приведених в табл. 4.1 фільтрів в символьній формі.

4.3. Для даних на схемі (рис. 4.2) чисельних значень параметрів резисторів та конденсаторів отримати аналітичні вирази для модуля $K_U(f)$ та аргументу $\varphi(f)$ функцій передачі всіх фільтрів.

4.4. Побудувати графіки (в олівці) частотних характеристик фільтрів:

4.4.1. амплітудно-частотну характеристику $K_U = K_U(f)$,

4.4.2. фазочастотну характеристику $\varphi = \varphi(f)$.

5. Проведення лабораторних досліджень

5.1. Включити установку для дослідження лабораторного модуля «ARC-Ф» відповідно до блок-схеми (рис. 4.1.) та включити мережеву напругу 220 В.

5.2. Виміряти і побудувати графіки амплітудно-частотної $K_U(f)$ та фазочастотної $\varphi(f)$ характеристик активних фільтрів ФНЧ-1, ФВЧ-1, ФНЧ-2, ФВЧ-2, ПФ-2, ЗФ-2 при $R_г = 0$ Ом, $U_1 = 0.5$ В. Визначити параметри частотних характеристик:

- нижню граничну частоту $f_н$,

- верхню граничну частоту $f_в$,
- смугу пропускання $\Delta f = f_в - f_н$,
- широкосмузність $Д=K_{U0}\cdot\Delta f$, при допустимих

коефіцієнтах нерівномірності на нижніх і верхніх частотах $M_{нд}$=0.707 та $M_{нд}$=0.707.

Результати вимірювань частотних характеристик в табл. 4.2 та на рис. 4.3 та рис. 4.4.

Таблиця 4.2. До вимірювань АЧХ та ФЧХ ARC-фільтрів, при $R_г$ = 0 Ом, U_1 = 0.5 В.

ФНЧ								ФВЧ								ПФ				ЗФ			
ФНЧ-1 (П1)				ФНЧ-2 (П3)				ФВЧ-1 (П2)				ФВЧ-2 (П4)				ПФ-2 (П5)				ЗФ-2 (П6)			
f, Гц lg *f*	U_2,мВ	K_U	φ	*f*, Гц lg *f*	U_2,мВ	K_U	φ	*f*, Гц lg *f*	U_2,мВ	K_U	φ	*f*, Гц lg *f*	U_2,мВ	K_U	φ	*f*, Гц lg *f*	U_2,мВ	K_U	φ	*f*, Гц lg *f*	U_2,мВ	K_U	φ
20 1.30				20 1.30				20 1.30				20 1.30				20 1.30				100 2.0			
100 2.0				500 2.70				100 2.0				200 2.3				500 2.70				200 2.3			
150 2.18				1000 3.00				500 2.70				500 2.70				600 2.78				500 2.70			
200 2.3				5000 3.70				1000 3.00				1000 3.00				800 2.90				800 2.90			
300 2.48				10000 4.00				2000 3.30				1500 3.18				900 2.95				1000 3.00			
500 2.70				13000 4.11				3000 3.48				2000 3.30				1000 3.00				1200 3.08			
1000 3.00				15000 4.18				5000 3.70				3000 3.48				1200 3.08				1500 3.18			
2000 3.30				20000 4.30				8000 3.90				4000 3.60				1500 3.18				2000 3.30			
5000 3.70				30000 4.48				15000 4.18				5000 3.70				2000 3.30				5000 3.70			
10000 4.00				50000 4.70				20000 4.30				20000 4.30				3000 3.48				10000 4.00			
f_c				f_c				f_c				f_c				f_0				f_0			
																$f_н$				$f_н$			
																$f_в$				$f_в$			
Δf				Δf				-		-		-		-		Δf				Δf			
Д=$K_U\Delta$f				Д=$K_U\Delta$f				-		-		-		-		Д=$K_U\Delta$f				Д=$K_U\Delta$f			

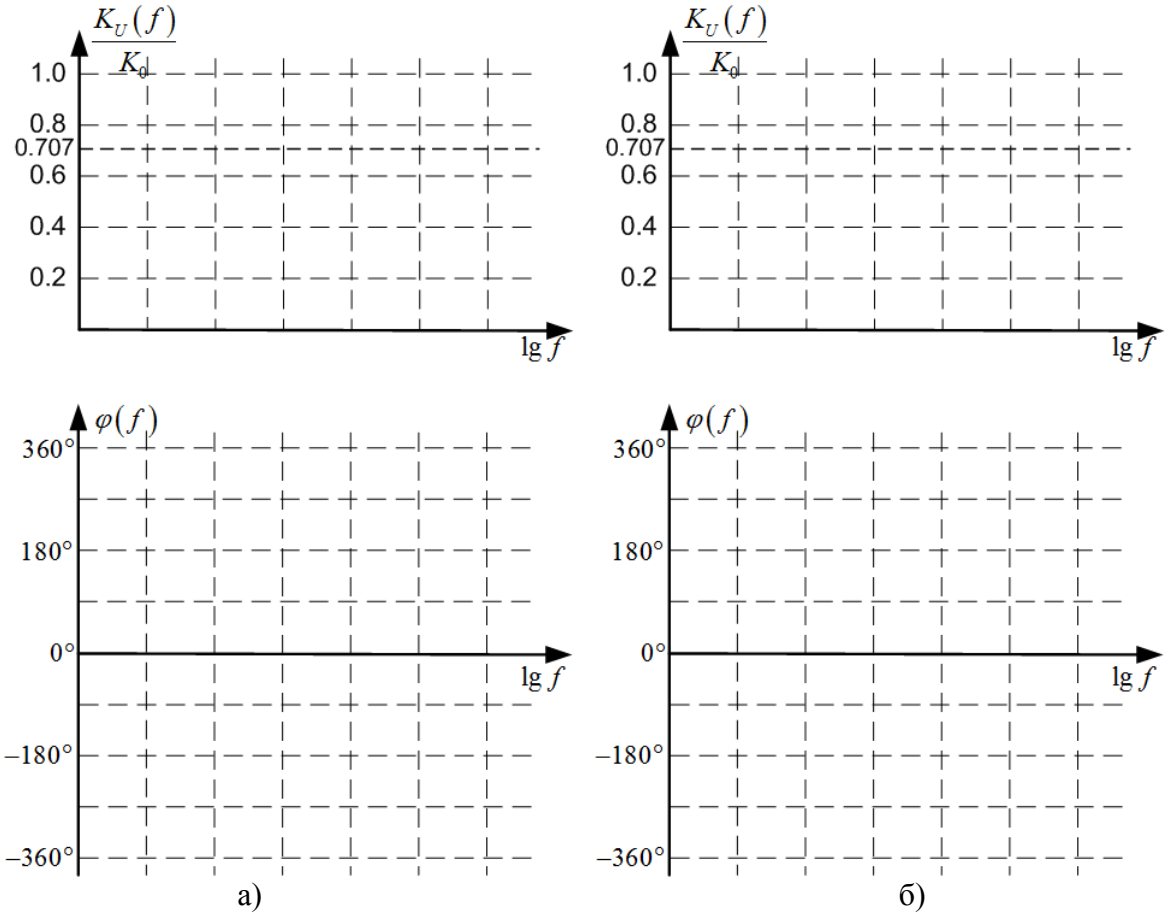


Рис. 4.3. Нормовані АЧХ та ФЧХ: *а)* ФНЧ, *б)* ФВЧ.

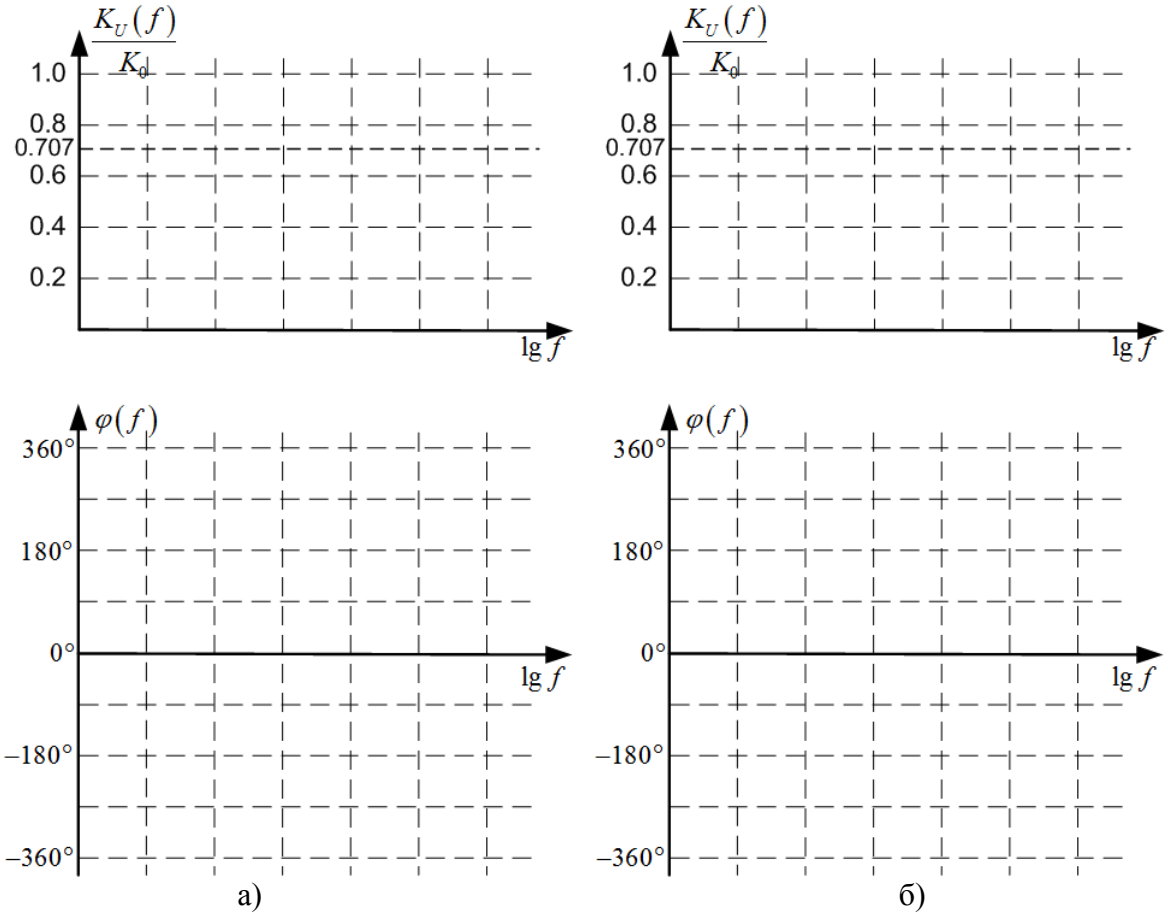


Рис. 4.4. Нормовані АЧХ та ФЧХ: *а)* ПФ-2, *б)* ЗФ-2.

5.3. Виміряти та побудувати графіки амплітудних характеристик $U_2 = U_2(U_1)$ на частоті зрізу f_c ФНЧ-2, ФВЧ-2, ПФ-2, ЗФ-2 при $R_г$ = 0 Ом. Визначити вхідний динамічний діапазон вхідного сигналу $Д = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$, де U_{max} - максимальна амплітуда вхідної напруги, при якій виникають допустимі нелінійні спотворення вихідної напруги, U_{min} - мінімальна амплітуда вхідної напруги, помітна на рівні шумів при заданому відношенні $\frac{сигнал}{шум}$. Результати вимірювань амплітудних характеристик внести в табл. 4.3 та на рис. 4.5.

5.4. Порівняти результати розрахунків і вимірювань. Сформулювати висновки по кожному пункту робочого завдання.

Таблиця 4.3. До вимірювань амплітудної характеристики ARC-фільтрів, при $f=f_{гр}$, $R_г$=0 Ом.

№	Амплітудна характеристика							
	ФНЧ-2 (П3) f_c=		ФВЧ-2 (П4) f_c=		ПФ-2 (П5) $f_н$=		ЗФ-2 (П6) $f_н$=	
	U_1, мВ	U_2, мВ	U_1, мВ	U_2, мВ	U_1, мВ	U_2, мВ	U_1, мВ	U_2, мВ
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
U_{max}								
U_{min}								
$Д = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$								

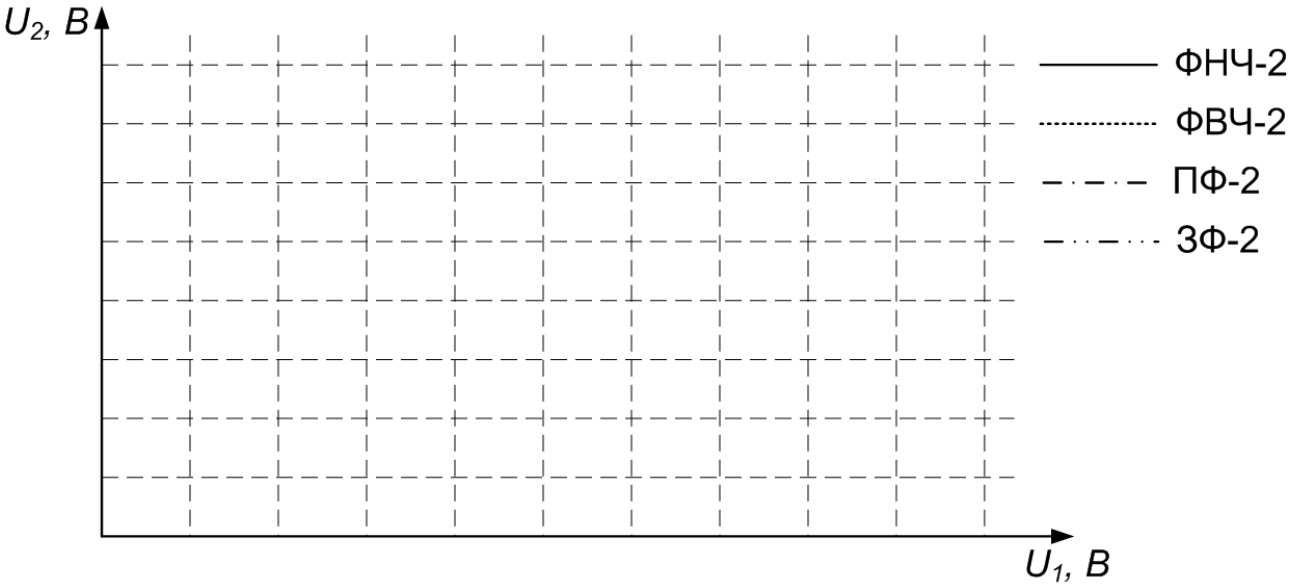


Рис. 4.5. Амплітудні характеристики:

ФНЧ-2 (1), ФВЧ-2 (2), ПФ-2 (3), ЗФ-2 (4).

6. Зміст звіту

6.1. Назва лабораторної роботи та її мета.

6.2. Блок-схема лабораторної установки: назва, призначення та технічні дані використаних блоків.

6.3. Схема електрична принципова лабораторного модуля «ARC-Ф», що реалізується за допомогою лабораторного стенду.

6.4. Результати розрахунків, графіки, отримані при виконанні домашнього завдання.

6.5. Таблиці та графіки з експериментальними даними, отримані при вимірі частотних та амплітудних характеристик.

6.6. Висновки та оцінка результатів експерименту.

7. 7. Контрольні питання

7.1. Визначити за принциповою схемою в якому фільтрі відбувається передача напруги з інвертуванням та без інвертування.

7.2. Чим відрізняється фільтр першого та другого порядку.

7.3. Назвати основні параметри фільтрів ФНЧ, ФВЧ, ПФ та ЗФ.

7.4. Визначити до яких фільтрам належать схеми з передатними функціями

$$K_1 = \frac{a_0}{b_0 + b_1 \cdot p},$$

$$K_2 = \frac{a_1 \cdot p}{b_0 + b_1 \cdot p},$$

$$K_3 = \frac{a_0}{b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2},$$

$$K_4 = \frac{a_0 \cdot p^2}{b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2},$$

$$K_5 = \frac{a_1 \cdot p}{b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2},$$

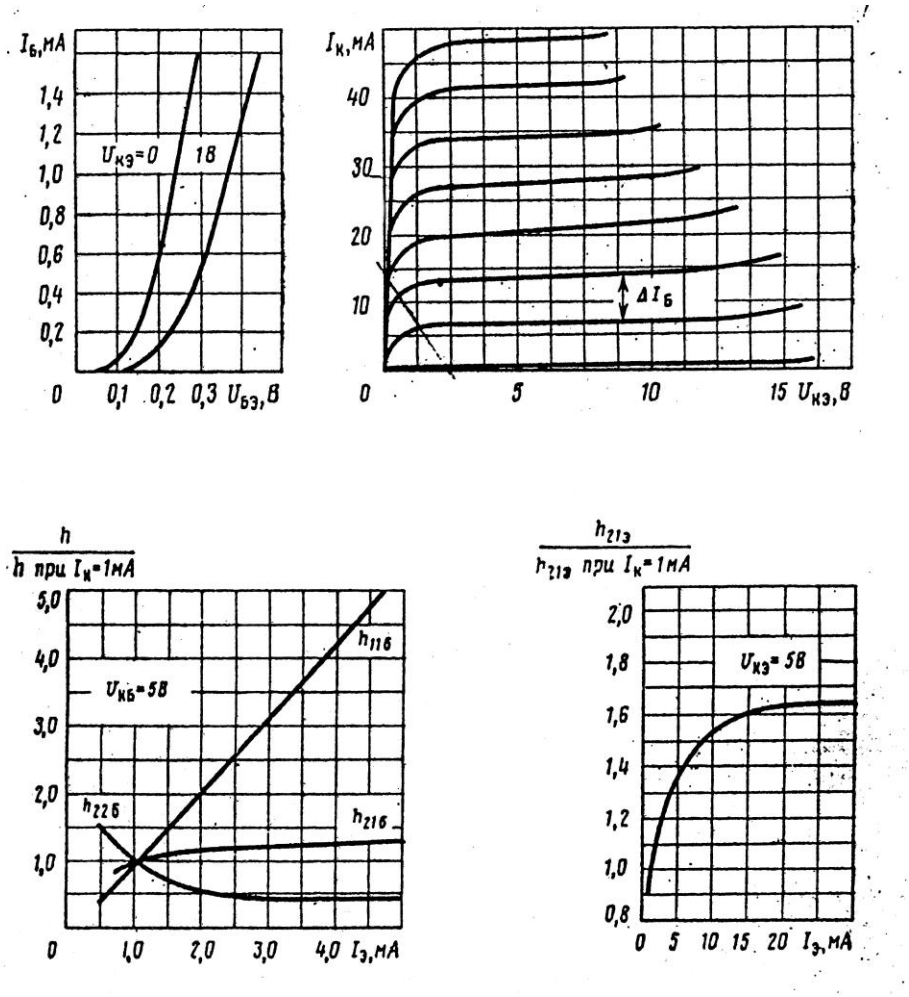
$$K_6 = \frac{a_0 + a_2 \cdot p^2}{b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2}$$

7.5. Побудувати АЧХ, ЛАЧХ, ФЧХ по заданих у п. 7.4 функціям.

7.6. Пояснити призначення кожного компонента схем фільтрів, фізику процесів в них.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Характеристики біполярного транзистора МП37Б



Транзистор МП37Б

Структура технології: *n-p-n*, С;

P_{Kmax}, мВт: 150;

$f_{гр}$, МГц: ≥1*;

$U_{КБОпроб}$, $U_{КЭОпроб}$, В: 30;

I_{Kmax}, мА: 20 (150)*;

$\Delta I_Б$, мкА: 200.

Додаток 2. До вимірювання вхідного та вихідного опорів підсилювачів

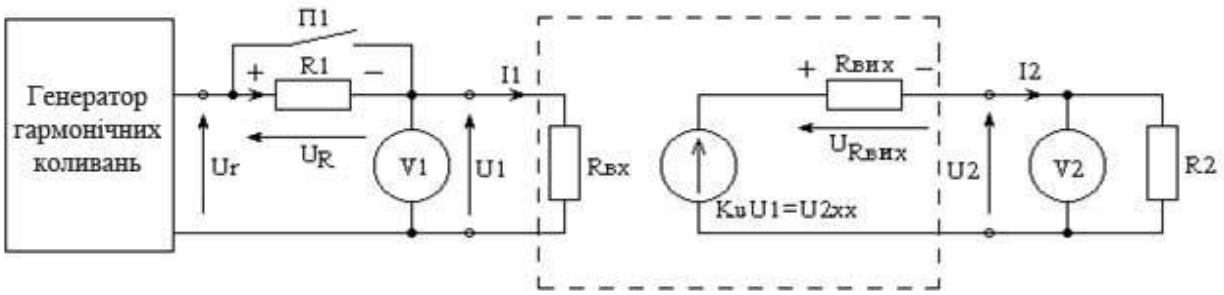


Рис. Д.2.1. Схема установки для вимірювання вхідного і вихідного опору підсилювача.

Вхідний опір підсилювача - опір з боку його вхідних затискачів, яке визначається формулою:

$$R_{вх} = \frac{U_1}{I_1},$$

де U_1 та I_1 - відповідно вхідна напруга і вхідний струм підсилювача.

$R_{вх}$ можна експериментально виміряти, підключивши послідовно до вхідних затискачів додатковий резистор R_1 відомого номіналу за формулою:

$$R_{вх} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_г - U_R}{\frac{U_R}{R_1}} = R_1 \frac{U_г - U_R}{U_R} = R_1 \frac{U_1}{U_г - U_1},$$

де $U_г$ - напруга генератора вхідного сигналу, яке можна виміряти вольтметром V_1 при замиканні перемикача П1; U_1 - вхідна напруга, яка визначається вольтметром V_1 при розімкнутому перемикача П1.

Якщо вибрати за допомогою резистора R_1 (в якості резистора R_1 можна взяти магазин опорів Р33) $U_R = 0.5U_Г$, то очевидно:

$$R_{вх} = R_1 \frac{U_г - 0.5 \cdot U_г}{0.5 \cdot U_г} = R_1 \frac{0.5 \cdot U_г}{U_г - 0.5 \cdot U_г} = R_1.$$

Вихідний опір підсилювача - опір з боку його вихідних затискачів, яке визначається виразом:

$$R_{вих} = \frac{U_2}{I_2},$$

де U_2 та I_2 - відповідно вихідна напруга і вхідний струм підсилювача. $R_{вих}$ можна експериментально виміряти, підключивши паралельно до вихідних затискачів додатковий резистор R_2 відомого номіналу за формулою:

$$R_{вих} = \frac{U_{R_{вих}}}{I_2} = \frac{U_{2xx} - U_2}{\frac{U_2}{R_2}} = R_2 \frac{U_{2xx} - U_2}{U_2}.$$

Якщо встановити за допомогою резистора R_2 (в якості резистора R_2 можна взяти магазин опорів *Р33*) $U_2 = \frac{U_{2xx}}{2}$, то очевидно

$$R_{вих} = R_2 \frac{U_{2xx} - 0.5 \cdot U_{2xx}}{\frac{U_{2xx}}{2}} = R_2.$$

Додаток 3. До вимірювання амплітудно-частотних характеристик і частотних параметрів підсилювача

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) - залежність модуля схемної функції $F(f)$ от частоти f гармонійного вхідної напруги U_1 або струму I_1 (як правило постійної амплітуди тобто $U_{1m} = const$).

В якості схемної функції $F(f)$ можуть виступати вихідна напруга $U_2(f)$ або струм $I_2(f)$, або вторинний параметр:

$K_U(f) = \frac{U_2(f)}{U_{1m}}$ - коефіцієнт передачі напруги,

$K_I(f) = \frac{I_2(f)}{U_{1m}}$ - коефіцієнт передачі струму,

$Z_{вх} = \frac{U_1(f)}{I_1(f)}$ - вхідний опір і т.д.

На практиці найчастіше цікавить АЧХ у вигляді залежностей $U_2(f)$, $K_U(f)$ (рис. Д.4.1, а) або в нормованому вигляді – $M(f) = \frac{K_U(f)}{K_{U0}}$, де K_{U0} - коефіцієнт передачі напруги для області середніх частот (область частот, при якій модуль схемної функції змінюється до величини не менше заданого значення $M_Д \cdot K_{U0}$ або $M_Д$).

Якщо схемної функції $K_U(f)$, $M(f)$ та частота f змінюється в широкому діапазоні значень, то будують АЧХ в логарифмічному масштабі (рис. Д.3.1, *в, г*). При цьому відкладають на осі ординат $K_U(f) = 20\lg\left(K_U(f)\right)[дБ]$ або $M(f) = 20\lg\left(M(f)\right)[дБ]$, а по осі абсцис - значення $\lg(f)$.

Часто вибирають допустимий коефіцієнт нерівномірності (він же нормований коефіцієнт передачі напруги) $M_Д = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$.

Параметрами АЧХ підсилювача є:

- нижня $f_н$ та верхня $f_в$ граничні частоти смуги пропускання - відповідно мінімальне і максимальне значення частоти гармонійної вхідної напруги, при яких модуль схемної функції зменшується до значення $M_Д \cdot K_{U0}$;
- смуга пропускання $\Delta f = f_в - f_н$;
- широкосмуговість або добротність підсилювача: $Q = K_U \cdot f \le Q = K_U f.$

Блок-схема установки для вимірювання АЧХ наведена на рис. Д.3.2.

Для вимірювання АЧХ до вхідних затискачів підсилювача 2 підключають генератор гармонійних коливань 1, вольтметр V_1 4 та один вхід осцилографа 5, а до вихідних затискачів - вольтметр V_2 3 та інший вхід осцилографа 5.

За допомогою відповідних ручок змінюють частоту коливань генератора 1 і підтримують амплітуду постійної, спостерігаючи показання вольтметра V_1 4. Потім зчитують показання вихідного вольтметра V_2. Осцилографа 5 дозволяє спостерігати і вимірювати осцилограми вхідної U_1 та вихідної U_2 напруг підсилювача.

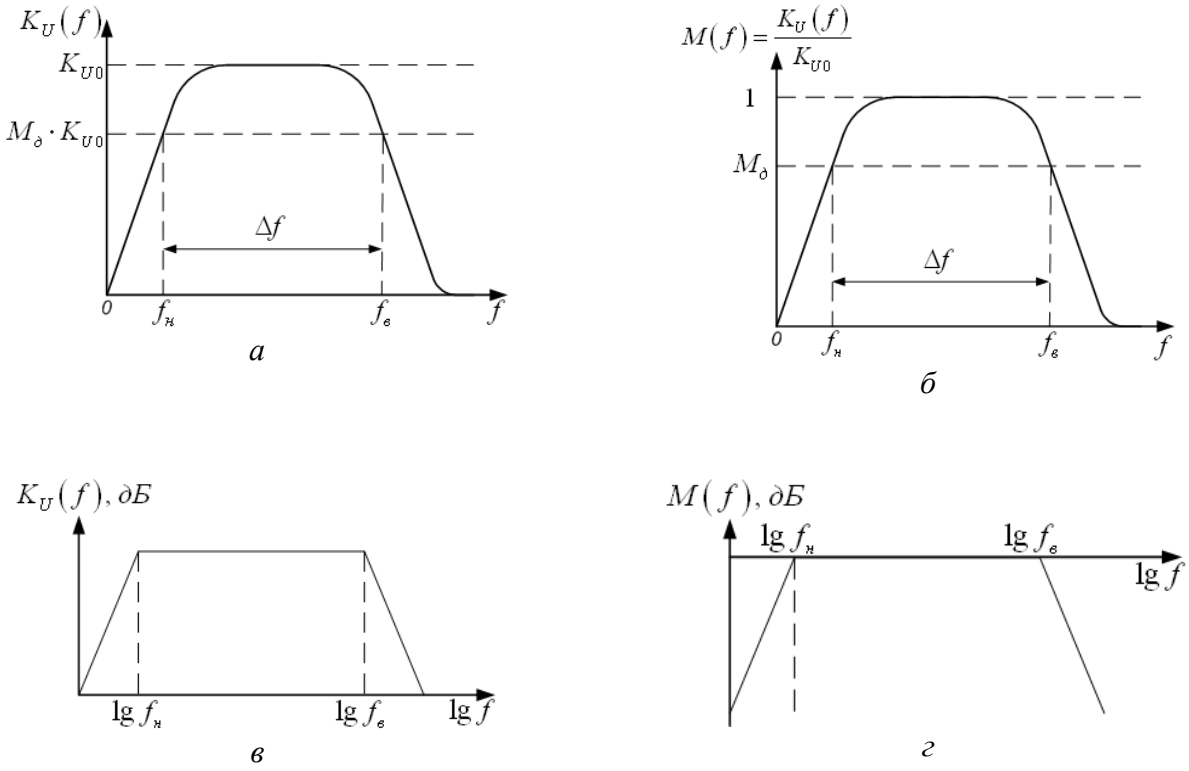


Рис. Д.3.1. Амплітудно-частотні характеристики:

а – залежність коефіцієнта передачі напруги;

б - залежність коефіцієнта нерівномірності АЧХ;

в, г - логарифмічні амплітудно-частотні характеристики відповідно для функцій $K_U(f)$[*дБ*] та $M(f)$[*дБ*].

Рис. Д.3.2. Блок-схема установки для вимірювання АЧХ підсилювача.

Додаток 4. До вимірювання фазочастотної характеристики підсилювача

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) являє собою залежність аргументу $\varphi(f)$ або $\varphi(\omega)$ схемної функції (наприклад $K_U(j\omega)$) від частоти f (або ω) гармонійного вхідної напруги U_1 постійної амплітуди ($U_{1m} = const$).

При вимірах залежностей вихідної напруги U_2 від частоти f ФЧХ визначається кутом зсуву фаз $\varphi(f)$ вихідної напруги U_2 щодо вхідної гармонійної напруги U_1.

Вимірюють ФЧХ з точністю до 1° за допомогою аналогових електронних фазометрів або з більшою точністю за допомогою цифрових фазометрів.

З невисокою точністю виміряти ФЧХ можна за допомогою двопроменевого осцилографа. Блок-схема лабораторної установки для вимірювання фазочастотної характеристики наведена на рис. Д.5.1. При вимірюванні ФЧХ можна обійтися без вольтметрів V_1 та V_2.

Передавальна функція підсилювача визначається виразом:

$$K_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{U_{2m} \cdot ej^{\varphi_2(\omega)}}{U_{1m} \cdot e^{j\varphi_1(\omega)}} = \frac{U_{2m}(\omega)}{U_{1m}(\omega)} \cdot e^{j(\varphi_2(\omega)-\varphi_1(\omega))} = K_U(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

де $K_U(\omega) = \frac{U_{2m}(\omega)}{U_{1m}(\omega)}$ - модуль функції передачі;

$\varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)$ – аргумент функції передачі, рівний різниці фаз вихідної напруги U_2 та вхідної напруги U_1, $U_{1m} = const$, U_{2m} - амплітуди відповідно вхідної та вихідної напруг.

При вимірюванні ФЧХ необхідно на один вхід осцилографа подати вхідну напругу U_1 та засинхронізувати розгортку осцилографа цією ж напругою U_1, а на другий вхід цього осцилографа подати напругу U_2. Потім за допомогою перемикачів тривалості розгортки встановити один період гармонійного напруги на всю шкалу (на 10 поділок) екрана трубки осцилографа. За допомогою регулювань Y_1 та Y_2 (а також за допомогою

калібрувальних регулювань підсилення) встановити однакові амплітуди напруг U_1, U_2 на всю шкалу по вертикалі (см. рис. Д.4.2).

Враховуючи, що по осі x на 10 поділках відкладається фазовий зсув $\varphi(\omega) = 2\pi = 360^\circ$ можна знайти масштабний коефіцієнт фази $m_\varphi = \frac{2\pi}{10} = \frac{360^\circ}{10} = 36\frac{град}{дел}$.

Фазовий зсув $\varphi(\omega)$ визначається виразом $\varphi(\omega) = n \cdot m_\varphi$, де n – число поділок по осі x, що визначають фазовий зсув U_1 та U_2.

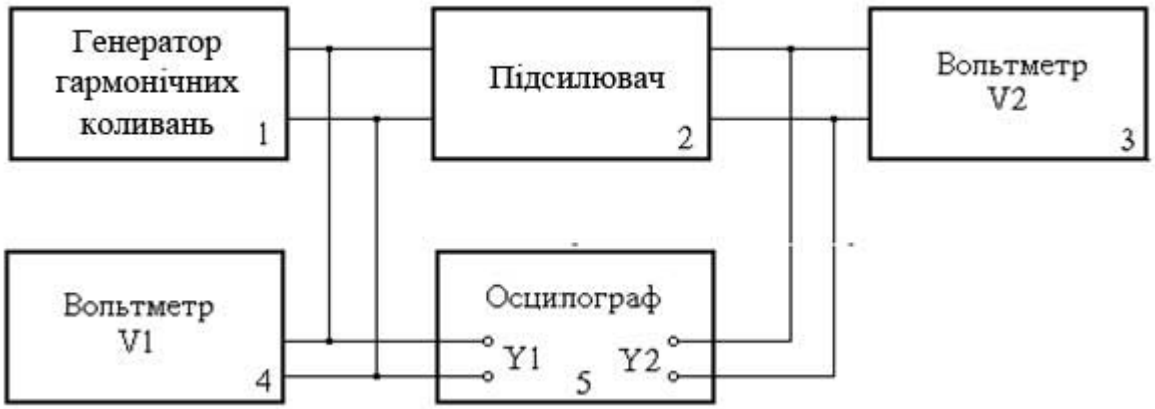


Рис. Д.4.1. Блок-схема установки для вимірювання ФЧХ підсилювача.

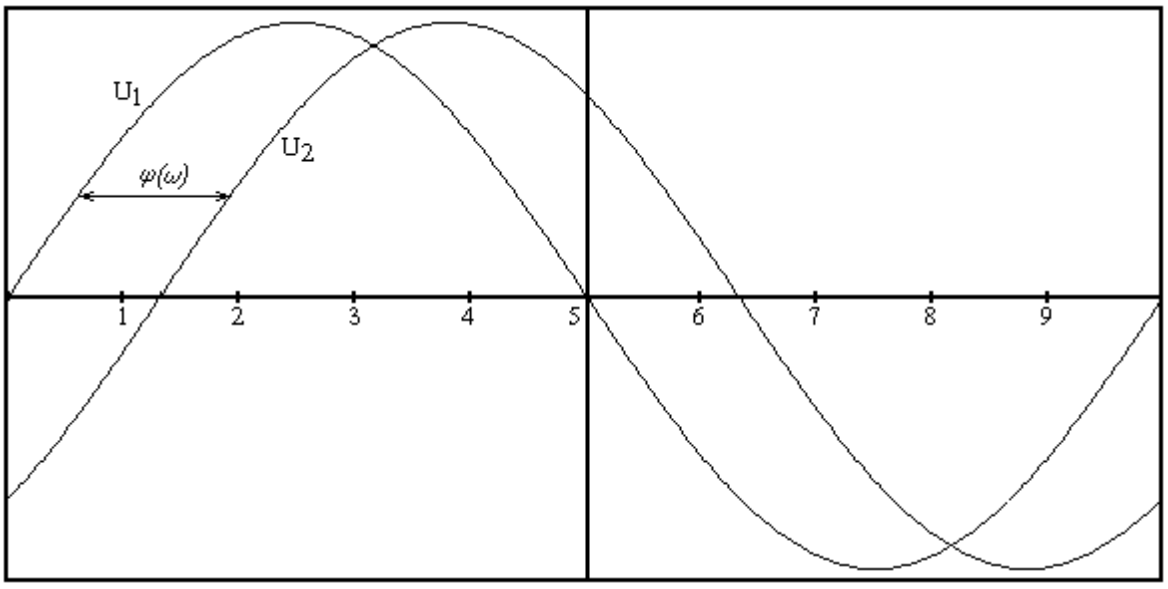


Рис. Д.4.2. Осцилограми вхідної U_1 та вихідної U_2 напруг підсилювача.

Додаток 5. До вимірювання амплітудної характеристики і динамічного діапазону вхідної напруги підсилювача

Амплітудна характеристика підсилювача - залежність амплітуди вихідної напруги U_2 від амплітуди вхідного напруги, тобто $U_2=U_2(U_1)$.

Блок-схема установки для вимірювання амплітудної характеристики має такий же вигляд як і при вимірюванні амплітудно-частотної характеристики (див. додаток 3). Очевидно, що зі зростанням вхідної напруги U_1 збільшується вихідна напруга U_2 (див. рис. Д.5.1).

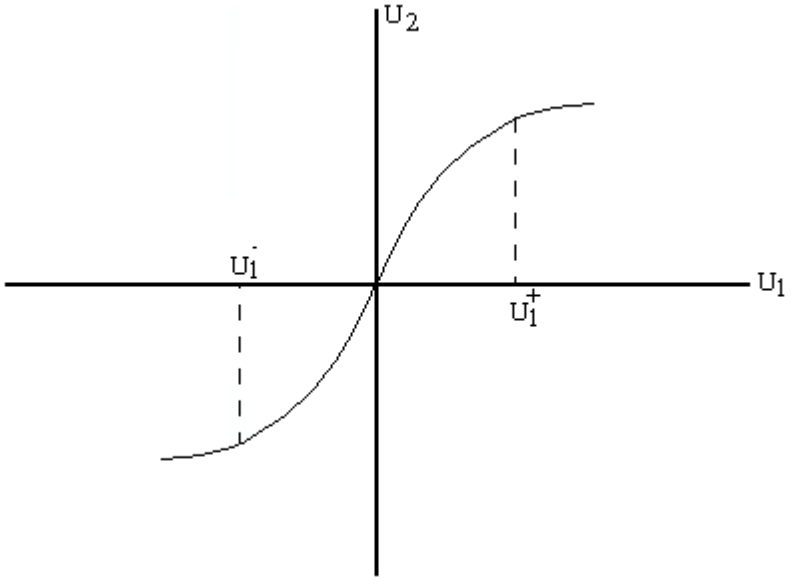


Рис. Д.6.1. Залежність вихідної напруги U_2 від вхідної U_1.

Однак, при певній величині вхідної напруги U_1^+ та U_1^- з'являються помітні зміни положення робочої точки активного елемента (транзистора, електровакуумного приладу), в режим насичення або відсічення. При цьому сповільнюється ріст вихідної напруги U_2 при подальшому збільшенні вхідної напруги U_1.

Динамічний діапазон вхідної напруги визначається виразом:

$$Д = \frac{U_{1\max}}{U_{1\min}},$$

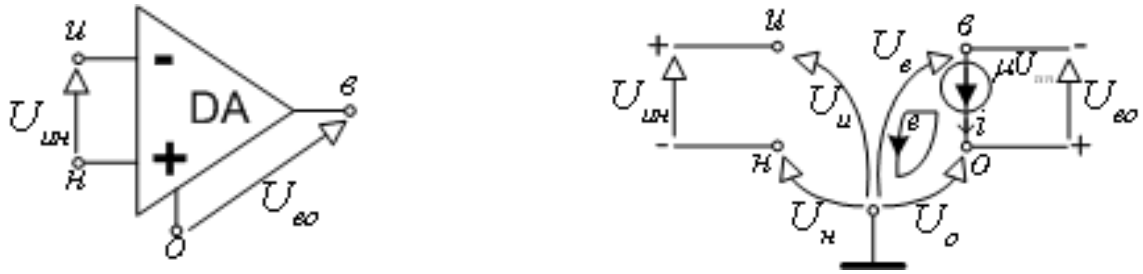
де: U_{1max} - максимальна амплітуда вхідної напруги при допустимих спотвореннях вихідної напруги;

U_{1min} - мінімальна амплітуда вхідної напруги, що перевищує напруги шумів і перешкод в заданий число раз (на практиці часто беруть ставлення $\frac{сигнал}{шум}$ близько 3).

Додаток 6. До аналізу схем на операційних підсилювачах

На практиці часто можна істотно спростити аналіз схем на операційних підсилювачах (ОП), прийнявши останній за ідеальний операційний підсилювач ($Z_{вх}=\infty$, $Z_{вых}$, $\mu=\dfrac{U_2}{U_1}=\infty$).

На рис. Д.6.1. показані схема ОП та його ідеальна модель.



а *б*

Рис. Д.6.1. Схема електрична (*а*) та модель (*б*) ідеального ОП.

ОП має чотири інформаційних затискачі:

- інвертуючий вхід - $и$,
- неінвертуючий вхід - $н$,
- вихід - $в$,
- спільний вузол - $о$.

Запишемо рівняння першого закону Кірхгофа для вузлів $и$, $н$, $в$, $о$ та другого закону Кірхгофа для контуру $е$:

$$\begin{cases} и: & I_и = 0 \\ н: & I_н = 0 \\ в: & I_в = +i \\ о: & I_о = -i \\ е: & U_в + \mu U_{ин} - U_о = 0 \end{cases} \qquad (1)$$

З урахуванням $U_{ин} = U_и - U_н$ перепишемо рівняння (1) підсумувавши третій і четвертий рядки (для усунення невідомого струму i джерела $\mu U_{ин}$):

$$\begin{cases} u: & I_u = 0 \\ н: & I_н = 0 \\ в, о: & I_в + I_о = 0 \\ е: & \mu U_u - \mu U_н + U_в - U_о = 0 \end{cases} \qquad (2)$$

В останньому рівнянні поділимо кожний член на μ та врахуємо, що $\mu = \infty$. Тоді система (2) набуде вигляду:

$$\begin{cases} u: & I_u = 0 \\ н: & I_н = 0 \\ в, о: & I_в + I_о = 0 \\ е: & U_u - U_н = 0 \end{cases} \qquad (3)$$

Із системи (3) видно, що в ідеальному ОП $U_u = U_н$. Отже, дві вузлових напруги U_u та $U_н$ можна замінити одною з них.

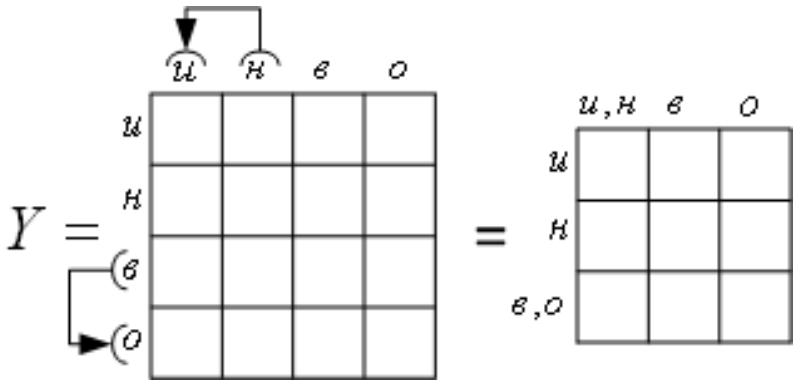
Наведені міркування дозволяють сформулювати алгоритм складання матриці провідності ОП.

Ідеальний ОП деформує і знижує на одиницю матрицю провідності.

Алгоритм врахування ідеального ОП:

1. Додаються рядки з номерами вихідного *в* та загального *о* затискачів (це дозволило позбутися від невідомого струму *і* джерела напруги $\mu U_{ин}$).

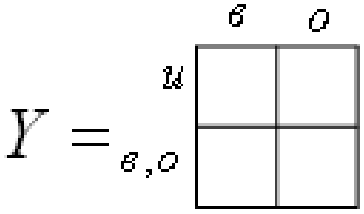
2. Підсумовуються стовпці з номерами інвертуючого *и* та неінвертуючий *н* затискачів (ми врахували, що при $\mu = \infty$, $U_u = U_н$), тобто:



3. Якщо один з подаваних індексів дорівнює нулю (наприклад $н = 0$), то відповідний сумарний рядок ($н$) або сумарний

стовпець $(и, н)$ викреслюються.

Так, при $н = 0$, матриця ОП набуде вигляду:



ЛІТЕРАТУРА

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.- М.: Энергия, 1977.-672 с.
2. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства.- М.: Связь, 1977.-450 с.
3. Ушаков В.Н. Основы радиоэлектроники и радиотехнические устройства.- М: Высшая школа, 1976.-426 с.
4. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники.- М.: Советское радио, 1976.-480 с.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы.- М..: Советское радио, 1977.-608 с.
6. Справочник по полупроводниковым приборам, транзисторам, интегральным схемам/ Под ред. Н.И. Горюнова.- М.: Энергия, 1972.-568 с.
7. Справочник по интегральным микросхемам/ Под ред. Б.В. Тарабрина.- М.: Энергия, 1980.-816 с.
8. Активные RC-фильтры на операционных усилителях/ Под ред. Г.М. Александрова.- М.: Энергия, 1974.- 192 с.
9. Хьюлсман Г.Н. Теория и расчет активных RC-цепей.- М.: Связь, 1973.-256 с.
10. Варшавер Б.А. Расчет и проектирование импульсных усилителей.- М.: Высшая школа, 1975.- 192 с.
11. Сигорский В.П., Петренко А.И. Основы теории электронных схем.- М.: Техника, 1974.
12. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника.- М.: Высшая школа, 2005.
13. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС. Руководство по анализу и расчету. М.: Мир, 1992.
14. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая электроника. М.: Мир, 1982.

15. Кудряшов Б.П. и др. Аналоговые интегральные схемы. Справочник.- М.: Радио и связь, 1981.
16. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1, 2. М.: Мир, 1983.
17. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Справочник. Под ред. Б.Д. Перельмана. М.: Радио и связь, 1982.
18. Гальперин М.В, Практическая схемотехника в промышленной автоматике. М.: Энергоатомиздат, 1987.

ЗМІСТ

ВСТУП 1
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ 5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ЗВОРОТНІЙ ЗВ'ЯЗОК У ПІДСИЛЮВАЧАХ. 19
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. ОПЕРАЦІЙНІ ЛАНКИ НУЛЬОВОГО ПОРЯДКУ 35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. АКТИВНІ RC-ФІЛЬТРИ 48
ДОДАТКИ 61
Додаток 1. Характеристики біполярного транзистора МП37Б 61
Додаток 2. До виміру вхідного та вихідного опорів підсилювачів 62
Додаток 3. До виміру амплітудно-частотних характеристик і частотних параметрів підсилювача 64
Додаток 4. До виміру фазочастотной характеристики підсилювача 67
Додаток 5. До виміру амплітудної характеристики і динамічного діапазону вхідної напруги підсилювача 69
Додаток 6. До аналізу схем на операційних підсилювачах 71
ЛІТЕРАТУРА 74