

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ
ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

Національний авіаційний університет

**СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЇВ ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ
ІНФОРМАЦІЇ**

Аналогова схемотехніка

**Методичні вказівки до лабораторних робіт
для студентів напрямку**

6.170102 «Системи технічного захисту інформації»

Київ 2012

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ
ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

Національний авіаційний університет

**СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЇВ ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ
ІНФОРМАЦІЇ**

Аналогова схемотехніка

**Методичні вказівки до лабораторних робіт
для студентів напрямку**

6.170102 «Системи технічного захисту інформації»

Київ 2012

УДК 621.3.049.77(076.5)

ББК з844я7

О 751

Укладачі: Є.В. Мельніков, Німченко Т.В., Ю.В. Пепа,
В.А. Швець

Рецензенти – В.О. Іванов, Девін Л.Н., Павлов А.В.

Затверджено науково-методичною радою Національного авіаційного університету, (протокол № 6 від 21.10.11р.).

О 751 Основи схемотехніки: Лабораторні роботи 1 – 14 /
Уклад.: Є.В. Мельніков, Німченко Т.В., Ю.В. Пепа, В.А.
Швець. – К.: НАУ, 2012.– 80 с.

Наведені короткі теоретичні відомості, порядок виконання, запитання для самоперевірки під час виконання лабораторних робіт з курсу “Схемотехніка пристроїв технічного захисту інформації”. Лабораторні роботи виконуються з використанням можливостей програмного пакета Electronics Workbench.

Призначений для студентів напряму 6.170102 «Системи технічного захисту інформації».

Загальні методичні вказівки

Лабораторні заняття є важливою складовою частиною навчального процесу, сприяють закріпленню і глибокому засвоєнню отриманих на лекціях і під час самостійного опрацювання курсу теоретичних знань.

Успішне проведення лабораторної роботи можливе лише за умови попередньої до неї підготовки. При підготовці до лабораторної роботи необхідно вивчити відповідні теоретичні розділи курсу, чітко уявляти мету, задачу і порядок виконання роботи.

Експериментальна частина лабораторної роботи складається з математичного моделювання **заданої електричної** схеми з використанням можливостей програмного пакета Electronics Workbench. Під час експерименту результати вимірювань заносяться у таблиці протоколу. Експериментальна частина роботи може вважатись виконаною, коли зведені у таблицю результати перевірить викладач.

У звіті лабораторної роботи повинні міститися принципові схеми, що наведені в теоретичних відомостях до кожної роботи. Схеми повинні бути нарисовані відповідно до діючих стандартів.

Графічні залежності потрібно будувати у звіті лабораторної роботи або на міліметровому папері. При побудові графіків бажано вибирати такі масштаби по вертикальних і горизонтальних осях, щоб вони були зручними для розміщення графічних залежностей. Під час побудови амплітудно-частотних характеристик по вісям абсцис потрібно відкладати величини у логарифмічному масштабі.

При відкладанні на одній вісі значень декількох різних фізичних величин необхідно будувати додаткові шкали паралельно основним. На ці шкали наносяться масштабні поділки, відлік яких потрібно починати від нуля. Усі точки, що відповідають дослідним даним, на графіках треба обвести кружками або відмітити іншими позначками.

Розрахунки та графіки повинні мати короткі пояснення.

Лабораторна робота 1
**ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ УВІМКНЕННЯ БІПОЛЯРНИХ
 ТРАНЗИСТОРІВ У ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДАХ**

Мета роботи: дослідження підсилювальних каскадів на БТ.

Короткі теоретичні відомості

Підсилювач електричних сигналів – це пристрій, призначений для підсилення потужності вхідного сигналу за рахунок споживання енергії джерела живлення.

Основні технічні показники підсилювача: коефіцієнт підсилення, вхідний і вихідний опори, вихідна потужність, коефіцієнт корисної дії, амплітудна, амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики, рівень шумів і коефіцієнт гармонік.

Коефіцієнти підсилення. Розрізняють коефіцієнти підсилення напруги, струму та потужності. Коефіцієнт підсилення напруги в загальному випадку є комплексним через наявність у схемі підсилювача реактивних елементів:

$$K = \frac{U_{\text{вих}} e^{j\varphi_{\text{вих}}}}{U_{\text{вх}} e^{j\varphi_{\text{вх}}}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} e^{j(\varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}})} = K_U e^{j\varphi},$$

де $K_U = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}$ – модуль коефіцієнта підсилення; $\varphi = \varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}}$ – кут зсуву фаз між вихідною і вхідною напругою.

При описанні підсилювального пристрою використовують лише модуль коефіцієнта підсилення K_U .

Коефіцієнт підсилення струму

$$K_I = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}}.$$

Коефіцієнт підсилення потужності

$$K_p = P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}},$$

де $P_{\text{вих}}$ – вихідна потужність, тобто потужність, що віддається підсилювачем у навантаження; $P_{\text{вх}}$ – вхідна потужність, тобто потужність, що віддається джерелом вхідного сигналу.

Вхідний опір – опір між вхідними клемми підсилювача для змінного струму $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$.

Вихідний опір підсилювача визначається співвідношенням:

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{кз}}} = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{кз}}},$$

де $I_{\text{кз}}$ – струм короткого замикання ($R_{\text{н}} = 0$); $U_{\text{хх}}$ – напруга холостого ходу ($R_{\text{н}} = \infty$).

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_0} 100\%,$$

де $P_{\text{вих}}$ – вихідна потужність підсилювача; P_0 – потужність, що споживається підсилювачем від усіх джерел.

Амплітудна характеристика (АХ) підсилювача – це залежність амплітуди вихідної напруги від амплітуди вхідної напруги на деякій постійній частоті.

На рис. 1.1 зображені ідеальна та реальна АХ. Ідеальна АХ проходить через початок координат. Реальна АХ починається з деякого значення U_0 , обумовленого рівнем власних шумів підсилювача. При великих значеннях $U_{\text{вх}}$ відхилення реальної АХ від ідеальної виникає через нелінійність ВАХ підсилювального елемента.

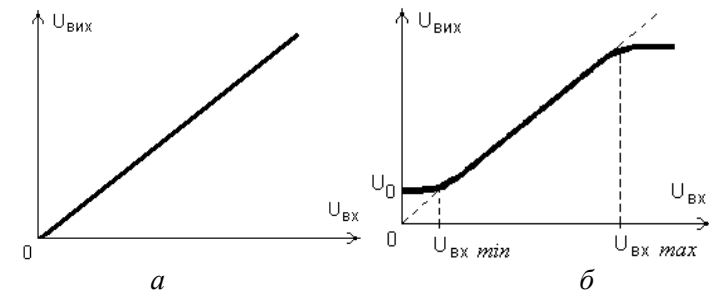


Рис. 1.1. Ідеальна АХ підсилювача (а); реальна АХ підсилювача (б)

Діапазон від $U_{\text{вх min}}$ до $U_{\text{вх max}}$ є робочим діапазоном амплітуди підсилювального сигналу. Значення $U_{\text{вх min}}$ визначається необхідним мінімальним відношенням сигнал/шум. Максимальне значення вхідного сигналу $U_{\text{вх max}}$ визначають виходячи з припустимих спотворень вихідного сигналу.

Наявність у підсилювальних пристроях реактивних елементів є основною причиною залежності коефіцієнта підсилення та фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами від частоти. Частотозалежними є характеристики активних елементів.

Залежність модуля коефіцієнта підсилення від частоти $K = \psi(f)$ називають *амплітудно-частотною характеристикою* (АЧХ). На рис. 1.2 зображено типову АЧХ підсилювача звукових частот (значення частот по осі абсцис відкладені в логарифмічному масштабі).

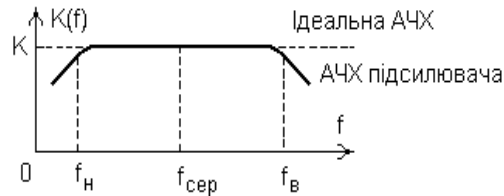


Рис. 1.2. АЧХ підсилювача

Залежність фазового зсуву від частоти називають *фазочастотною характеристикою* (ФЧХ) підсилювача (рис. 1.3).

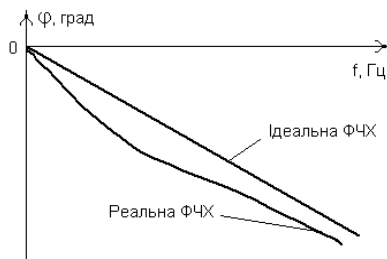


Рис. 1.3. ФЧХ підсилювача

Однією з причин зміни форми підсиленого сигналу є наявність у схемі підсилювача нелінійних елементів (активні елементи, дроселі).

Нелінійні спотворення особливо сильно виявляються при великих рівнях вхідного сигналу.

У вихідному сигналі при нелінійних спотвореннях, крім коливань основної частоти (частоти вхідного сигналу), містяться

складові вищих гармонік. Чим вище рівень нелінійних спотворень, тим більша відносна потужність вищих гармонік у вихідному сигналі.

Рівень нелінійних спотворень у підсилювачі при підсиленні гармонійних сигналів прийнято оцінювати коефіцієнтом гармонік (коефіцієнтом нелінійних спотворень)

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}},$$

де P_2, P_3, \dots, P_n – потужності гармонік, що з'явилися в результаті нелінійного підсилення; P_1 – потужність першої гармоніки.

Якщо опір навантаження однаковий для всіх гармонійних складових вихідного сигналу, то можна записати:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}} \text{ або } K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}},$$

де U_i (I_i) – діючі амплітудні значення i -ї гармоніки вихідної напруги (струму).

Залежно від того, який з електродів БТ є спільним для вхідного та вихідного ланцюгів, розрізняють схеми ввімкнення зі спільним емітером (СЕ), спільним колектором (СК) і спільною базою (СБ).

Принципова схема підсилювального каскаду з СЕ наведена на рис. 1.4.

Джерело вхідного сигналу (змінної ЕРС) E_i з внутрішнім опором R_i підключається до вхідних затискачів підсилювача 1 та 7. Джерелом підсиленого сигналу є опір у ланцюзі колектора R_4 . Підсилена вихідна напруга знімається з опору навантаження R_5 .

Положення робочої точки на характеристиках БТ визначається ділянкою напруги живлення R_2 та R_3 , тобто початкові значення $I_{\text{б0}}, I_{\text{к0}}, U_{\text{бе0}}, U_{\text{ке0}}$ (у режимі спокою, якщо $E_i = 0$) залежать від величин E_c, R_2 та R_3 .

Принципові схеми підсилювальних каскадів із СК та СБ наведені на рис. 1.5 та рис. 1.6 відповідно.

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження підсилювача за схемою із СЕ.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 1.4.

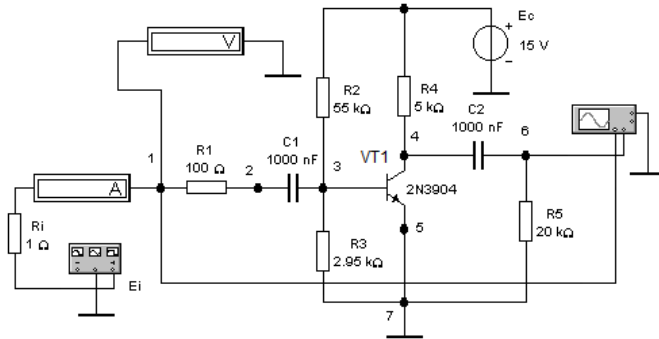


Рис. 1.4. Підсилювач за схемою із СЕ

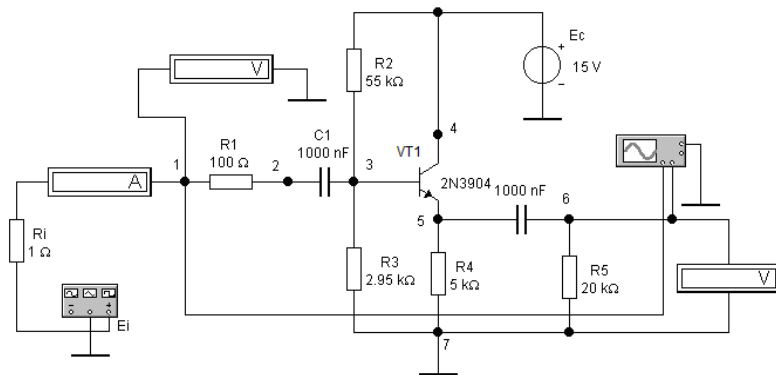


Рис. 1.5. Підсилювач за схемою із СК

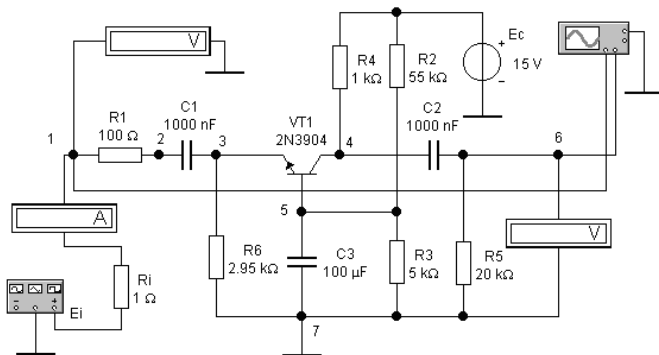


Рис. 1.6. Підсилювач за схемою із СБ

2. Підключити вихід генератора (синусоїдальна напруга) до вузла 1, попередньо встановивши частоту 1000 Гц і напругу 10 мВ.

3. Підключити осцилограф однією клемою до вузла 1, іншою до виходу схеми – вузла 6.

4. Увімкнути джерело живлення схеми та проконтролювати за допомогою осцилографа наявність напруг на вході та на виході схеми (якщо сигнал спотворений, варто зменшити напругу вхідного сигналу).

5. Виміряти напругу сигналу у вузлах 1-6 схеми (1 – напруга джерела сигналу U_1 ; 2 – напруга на вході підсилювального каскаду U_2 ; 6 – напруга на виході каскаду U_6).

6. Розрахувати: $R_{вх} = U_1 / I_1$ (де $I_1 = (U_1 - U_2) / R1$; $R1 = 100 \text{ Ом}$) та $K_U = U_6 / U_1$. Результати занести в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_6 , мВ	$R_{вх}$, Ом	K_U	K_U , дБ	U_{xx} , мВ	$I_{кз}$, мА	$R_{вих}$, Ом
10								

7. Використовуючи формулу для визначення $R_{вих}$ провести необхідні вимірювання в схемі, а потім розрахувати значення $R_{вих}$. Результати занести в табл. 1.1.

8. Зарисувати осцилограми напруг у вузлах 1-6.

9. Зняти та побудувати АХ підсилювача при частоті вхідного сигналу 1000 Гц. Результати занести в табл. 1.2.

10. Побудувати АЧХ підсилювача $K_U = \psi(f)$.

Експеримент 2. Дослідження підсилювача за схемою із СК.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 1.5. Підключити вихід генератора до вузла 1 схеми, попередньо встановивши частоту 1000 Гц і напругу 10 мВ.

2. Виконати пп. 1 - 8 як в експерименті 1.

Таблиця 1.2

E_i , мВ	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_6 , мВ	$R_{вх}$, Ом	K_U
10					
20					

50					
200					
500					
1000					
2000					

10. Підключити прилади для виміру АЧХ підсилювача. Встановити на вході схеми напругу $U_1 = 500$ мВ. Змінюючи частоту вхідного сигналу, вимірювати напруги в точці *б* схеми. Результати занести в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

f , Гц	U_1 , мВ	U_6 , мВ	K_U
1	500		
10	500		
10^2	500		
10^3	500		
10^4	500		
10^5	500		

Експеримент 3. Дослідження підсилювача за схемою із СБ.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 1.6. Підключити вихід генератора до вузла *1* схеми, попередньо встановивши частоту 1000 Гц і напругу 10 мВ.

2. Виконати пп. 1 - 8 як в експерименті 1.

3. За результатами проведених експериментів розрахувати K_v та K_p для кожної схеми та заповнити табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Параметр	Одиниця виміру	Підсилювальний каскад на БТ		
		СЕ	СК	СБ
$R_{вх}$	Ом			
$R_{вих}$	Ом			
Коефіцієнт підсилення	K_U	—		
	K_I	—		
	K_p	—		

Контрольні питання

1. Доведіть, що фаза вихідного сигналу в схемі зі СК збігається з фазою вхідного сигналу.

2. Доведіть, що фаза вихідного сигналу в схемі із СБ збігається з фазою вхідного сигналу.

3. Чому фази вхідного і вихідного сигналів у схемі зі СЕ відрізняються і наскільки?

4. Чому коефіцієнт підсилення за напругою в схемі із СК менший одиниці?

5. Чому коефіцієнт підсилення за струмом в схемі із СБ менший одиниці?

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОЇ ТОЧКИ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМІ ЗІ СПІЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ

Мета роботи: дослідження параметрів робочої точки біполярного транзистора (БТ)

Короткі теоретичні відомості

Схеми завдання робочої точки транзисторних каскадів із СЕ зображені на рис. 2.1, *а, б, в*.

На рис. 2.1, *а* наведена схема завдання струму бази за допомогою опору.

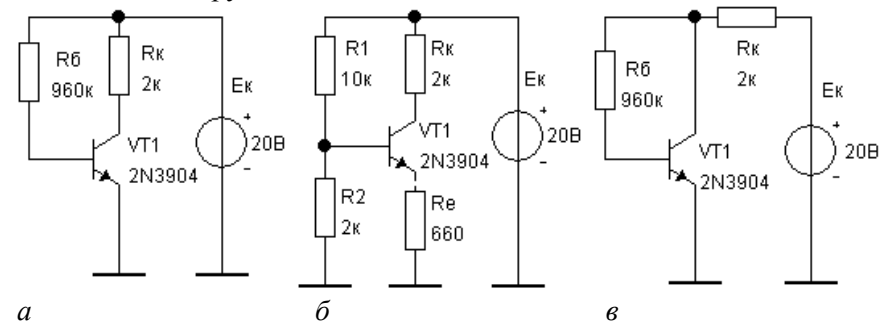


Рис. 2.1. Схеми завдання робочої точки

Режим, у якому працює каскад, можна визначити, побудувавши його навантажувальну лінію на вихідній

характеристиці БТ. Даний спосіб дозволяє описати поведінку транзистора в режимі насичення, підсилення та відсіку.

Режим насичення. У цьому режимі струм колектора максимальний і не керується струмом бази:

$$\beta_{DC} I_{\bar{6}} > I_{\kappa} \approx I_{\kappa,н},$$

де $I_{\kappa,н}$ – струм колектора у режимі насичення, визначається опором R_{κ} у ланцюзі колектора та напругою джерела живлення E_{κ} :

$$I_{\kappa,н} \approx E_{\kappa} / R_{\kappa}.$$

Цей режим характеризується низьким спаданням напруги колектор - емітер (порядку 0,1 В). Для переведення БТ в цей режим необхідно в базу БТ подати струм, більший за струм насичення бази $I_{\bar{6},н}$:

$$I_{\bar{6},н} = I_{\kappa,н} / \beta_{DC}.$$

Струм насичення бази задається за допомогою опору $R_{\bar{6},н}$:

$$R_{\bar{6},н} = \frac{E_{\kappa} - U_{\bar{6}e0}}{I_{\bar{6},н}},$$

де $U_{\bar{6}e0}$ – гранична напруга переходу база - емітер.

Для кремнієвих транзисторів $U_{\bar{6}e0} \approx 0,7$ В.

У **режимі підсилення** струм колектора менший за струм $I_{\kappaн}$ і описується рівнянням навантажувальної прямої:

$$U_{\kappa e} = E_{\kappa} - I_{\kappa} R_{\kappa} \quad \text{звідси} \quad (I_{\kappa} = \frac{E_{\kappa} - U_{\kappa e}}{R_{\kappa}}). \quad (2.1)$$

Робоча точка в статичному режимі задається струмом бази та напругою на колекторі. Вона визначається точкою перетину навантажувальної прямої та вихідної характеристики БТ. Струм бази транзистора:

$$I_{\bar{6}} = \frac{E_{\kappa} - U_{\bar{6}e0}}{R_{\bar{6}}}.$$

Струм колектора $I_{\kappa} = \beta_{DC} I_{\bar{6}}$.

Напруга колектор - емітер визначається з виразу (2.1):

$$U_{\kappa e} = E_{\kappa} - I_{\kappa} R_{\kappa}.$$

У **режимі відсіку** струм колектора дорівнює нулю і не створює на опорі R_{κ} падіння напруги. Отже, напруга $U_{\kappa e} = E_{\kappa}$. Струм колектора (з урахуванням теплових струмів):

$$I_{\kappa} = I_{\kappa e0} + \beta_{DC} I_{\bar{6}} = (\beta_{DC} + 1) I_{\kappa\bar{6}0} + \beta_{DC} I_{\bar{6}} \approx \beta_{DC} (I_{\kappa\bar{6}0} + I_{\bar{6}}),$$

де $I_{\kappa e0}$, $I_{\kappa\bar{6}0}$ – зворотні струми переходів колектор - емітер і колектор - база відповідно.

Коефіцієнт нестабільності струму колектора S через вплив теплових струмів у схемі:

$$S = \frac{dI_{\kappa}}{dI_{\kappa\bar{6}0}} = 1 + \beta_{DC} \approx \beta_{DC}.$$

Як видно з цього виразу, коефіцієнт нестабільності залежить від статичного коефіцієнта передачі, що для БТ того ж самого типу може сильно відрізнятися.

На рис. 2.1, б наведена схема завдання струму бази за допомогою подільника напруги.

Аналогічно розглянемо режими насичення, підсилення та відсічення.

Режим насичення. Струм колектора в режимі насичення:

$$I_{\kappaн} \approx E_{\kappa} / (R_{\kappa} + R_{\bar{e}}).$$

Незалежно від опорів $R1$ і $R2$:

$$I_{\bar{6}н} = I_{\kappaн} / \beta_{DC},$$

а напруга на базі:

$$U_{\bar{6}} = E_{\kappa} \frac{R_{\bar{e}}}{R_{\bar{e}} + R_{\kappa}} + U_{\bar{6}e0}.$$

Ця ж напруга задається подільником напруги. Знаючи E_{κ} і $U_{\bar{6}}$, можна визначити відношення:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{E_{\kappa} - U_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}}.$$

Сумарний опір подільника вибирається так, щоб струм, що протікає через нього, був приблизно в 4 - 5 разів більший за струм бази.

Режим підсилення. Струм колектора в підсилювальному режимі описується рівнянням навантажувальної прямої:

$$I_k = \frac{E_k - U_{ке} - U_e}{R_k},$$

де $U_e = I_e R_e$, I_e – струм емітера.

Струм бази $I_б = I_k / \beta_{DC}$.

Струм колектора $I_k = I_e - I_б$.

Напруга на базі транзистора $U_б = I_e R_e + U_{бe0}$.

Далі розраховуються опори $R1$ і $R2$ подільника напруги. Сумарний опір подільника повинен забезпечувати більший порівняно зі струмом бази струм подільника (струм подільника беруть в 10 разів **меншим** за струм колектора).

Робоча точка визначається перетином навантажувальної прямої і вихідної характеристики транзистора. За відомими значеннями опорів $R1$ і $R2$ визначаємо струм бази транзистора:

$$I_б = \frac{U_б - U_{бe0}}{R_{екв}},$$

де $U_б$ – напруга на базі транзистора.

Якщо $\beta_{DC} R_{екв} \gg R2$, то:

$$U_б = E_k \frac{R2}{R1 + R2},$$

$$R_{екв} = \frac{R1R2}{R1 + R2}.$$

Струм емітера визначається за спаданням напруги на опори $R_{екв}$ в ланцюзі емітера:

$$I_e = \frac{U_б - U_{бe0}}{R_{екв}}.$$

Значення напруги $U_{ке}$ обчислюється за законом Кірхгофа:

$$U_{ке} = E_k - I_k R_k - I_e R_e.$$

Коефіцієнт нестабільності струму колектора S через вплив теплових струмів у схемі за умови, що $U_e > U_{бe0}$:

$$S = \frac{dI_k}{dI_{кб0}} = \frac{1 + \beta_{DC}}{1 + \beta_{DC} R_{екв} / (R_{екв} + R_e)} \approx 1 + \frac{R_{екв}}{R_e}.$$

При цьому способі завдання струму бази коефіцієнт нестабільності визначається елементами схеми і практично не залежить від характеристик транзистора, що поліпшує стабільність робочої точки.

На схемі рис. 2.1, *в* наведена схема завдання струму бази за допомогою опору в ланцюзі база - колектор.

Струм колектора в підсилювальному режимі:

$$I_k = \frac{E_k - U_{ке}}{R_k}.$$

Робоча точка визначається точкою перетину навантажувальної прямої і вихідної характеристики транзистора. Тоді струм бази:

$$I_б = \frac{U_{ке} - U_{бe0}}{R_б}.$$

Як видно з виразу, струм бази залежить від напруги колектор - емітер, що робить схему менш чутливою до розкиду значень статичного коефіцієнта передачі встановлених у неї транзисторів.

Струм колектора в схемі:

$$I_k = \frac{E_k - U_{бe}}{R_k + R_б / \beta_{DC}}.$$

Значення напруги колектор - емітер:

$$U_{ке} = E_k - I_k R_k.$$

Статичний коефіцієнт передачі струму:

$$\beta_{DC} = I_k / I_б.$$

Коефіцієнт нестабільності струму колектора S через вплив теплових струмів у схемі з опором у ланцюзі база - колектор:

$$S = \frac{dI_k}{dI_{кб0}} = \frac{1 + \beta_{DC}}{1 + \beta_{DC} R_k / R_б} \approx 1 + \frac{R_б}{R_k}.$$

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження параметрів робочої точки при завданні струму бази за допомогою одного опору.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 2.1, *а*. Підключити необхідні прилади. Увімкнути джерело живлення схеми. Виміряти та записати результати вимірювань для струму бази, струму колектора, напруги колектор - емітер і напруги база - емітер.

2. Для схеми обчислити базовий струм, напругу колектор - емітер. Струм колектора обчислити, використовуючи значення струму бази, отримане в п. 1 ($\beta_{DC} = 190$).

3. Побудувати навантажувальну пряму для постійного струму на вихідній характеристиці транзистора 2N3904 (рис. 2.2). Використовуючи значення струмів і напруг, отримані в п. 1, визначити робочу точку (А) на навантажувальній лінії і відзначити її положення на графіку.

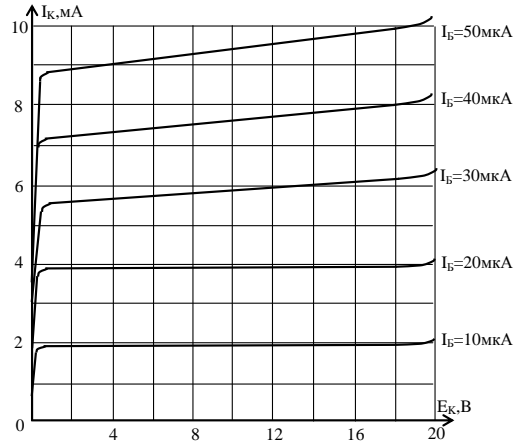


Рис. 2.2. Вихідні характеристики 2N3904

Експеримент 2. Дослідження параметрів робочої точки при завданні струму бази за допомогою дільника напруги.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 2.1, б. Підключити необхідні прилади. Увімкнути джерело живлення схеми. Виміряти струми бази, колектора та емітера, напругу колектор - емітер і напругу на базі. Обчислити коефіцієнт передачі β_{DC} .

2. Для схеми за формулами обчислити значення напруги в точці U_{σ} . Обчислити I_e та розрахувати I_k за отриманим значенням струму емітера ($U_{\sigma e0} \approx 0,7$ В), обчислити значення напруги $U_{ке}$ за отриманими раніше струмами колектора та емітера.

3. Виконати п. 3 експерименту 1.

Експеримент 3. Дослідження параметрів робочої точки при завданні струму бази за допомогою опору в ланцюзі база - колектор.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 2.1, в. Підключити необхідні прилади. Увімкнути джерело живлення схеми. Записати результати вимірів для струму бази, струму колектора, струму емітера та напруги колектор - емітер. Обчислити статичний коефіцієнт передачі β_{DC} .

2. За формулами обчислити струм колектора і напругу колектор - емітер.

3. Виконати п. 3 експерименту 1.

Контрольні питання

1. Чи змінюється положення робочої точки при зміні статичного коефіцієнта передачі струму?

2. Яку умову необхідно виконати, щоб перевести транзистор у режим відсіку?

3. Чому дорівнює напруга колектор - емітер у режимі насичення?

4. У чому перевага схеми з подільником напруги над схемою зі зсувом одним опором у ланцюзі бази?

5. Яку роль відіграє опір $R_{екв}$ в ланцюзі емітера для стабільності роботи схеми? У чому вона полягає?

6. Яка із усіх описаних схем має більшу стабільність?

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ

Мета роботи: дослідити вплив негативного зворотного зв'язку (ЗЗ) на характеристики і параметри підсилювачів.

Короткі теоретичні відомості

Під ЗЗ розуміють такий електричний зв'язок між каскадами, при якому частина енергії підсиленого сигналу з виходу підсилювача подається назад на його вхід, де він додається до вхідного сигналу або віднімається від нього. Сумарний сигнал на вході підсилювача, охопленого ЗЗ, визначається з виразу:

$$U_{\Sigma} = U_{вх} \pm U_{ЗЗ}; \quad I_{\Sigma} = I_{вх} \pm I_{ЗЗ},$$

де $U_{\text{вх}}$ і $I_{\text{вх}}$ – відповідно вхідна напруга і струм; $U_{\text{зз}}$ і $I_{\text{зз}}$ – напруга і струм ЗЗ.

Знак плюс береться при позитивному ЗЗ (ПЗЗ), а мінус – при негативному ЗЗ (НЗЗ). Закорочений контур, що включає в себе ланцюг ЗЗ і частину підсилювача між точками підключення ЗЗ, називається петлею ЗЗ. Розрізняють місцевий та загальний ЗЗ. Залежно від способу одержання сигналу ЗЗ розрізняють ЗЗ за напругою, струмом та комбінований. У схемі ЗЗ за напругою (рис. 3.1, а) сигнал ЗЗ пропорційний вихідній напрузі. У схемі ЗЗ за струмом (рис. 6.1, б) сигнал ЗЗ пропорційний вихідному струму. Залежно від способу введення сигналу у вхідний ланцюг розрізняють: послідовний (рис.3.1, в) і паралельний ЗЗ (рис. 3.1, г).

Для кількісної оцінки ступеня впливу ЗЗ на характеристики підсилювача використовують коефіцієнт ЗЗ $\beta_{\text{зз}}$, що показує, яка частина вихідного сигналу надходить на вхід підсилювача:

$$\beta_{\text{зз}} = U_{\text{зз}} / U_{\text{вх}}$$

Зворотний зв'язок дуже впливає практично на всі основні характеристики підсилювача. Введення НЗЗ зменшує коефіцієнт підсилення підсилювача за напругою:

$$K_{U_{\text{зз}}} = K_U / (1 + \beta_{\text{зз}} K_U),$$

де K_U – коефіцієнт підсилення за напругою без кола ЗЗ.

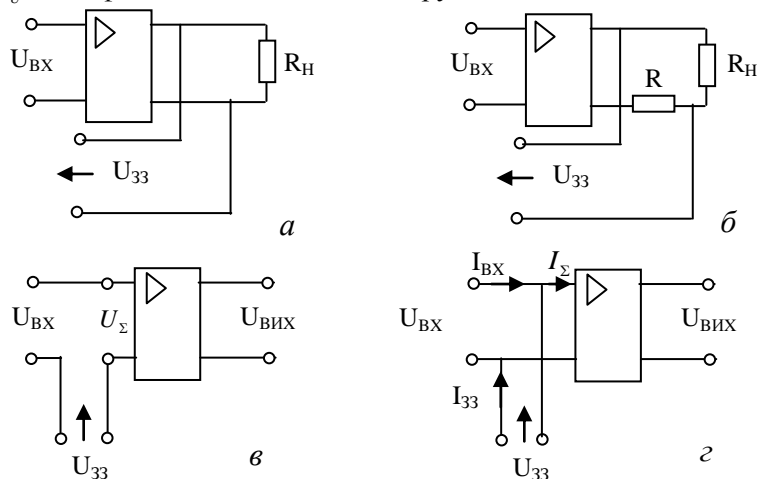


Рис. 3.1. Види ЗЗ

Ступінь зміни коефіцієнта підсилення підсилювача, охопленого НЗЗ ($K_{U_{\text{зз}}}$), визначається добутком $\beta_{\text{зз}} K_U$, що називається глибиною ЗЗ. Якщо $\beta_{\text{зз}} K_U \gg 1$, то $K_{U_{\text{зз}}} = 1 / \beta_{\text{зз}}$, тобто $K_{U_{\text{зз}}}$ практично не залежить від коефіцієнта підсилення самого підсилювача (K_U) і визначається тільки параметрами ланцюга ЗЗ.

У результаті впливу НЗЗ нестабільність коефіцієнта підсилення зменшується в $(1 + \beta_{\text{зз}} K_U)$ разів.

Негативний ЗЗ впливає на вхідний і вихідний опори підсилювача. Послідовний НЗЗ збільшує вхідний опір підсилювача в $(1 + \beta_{\text{зз}} K_U)$ разів, паралельний НЗЗ зменшує вхідний опір підсилювача в $(1 + \beta_{\text{зз}} K_U)$ разів. Введення НЗЗ за напругою зменшує вихідний опір підсилювача в $(1 + \beta_{\text{зз}} K_U)$ разів, а НЗЗ за струмом збільшує $R_{\text{вих}}$ на тесаме значення. Крім того, введення НЗЗ дозволяє також зменшити нелінійні та частотні спотворення, розширити смугу прозорості підсилювача.

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження схеми ввімкнення підсилювача без ЗЗ.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 3.2.
2. Встановити перемикачі SA2 і SA3 у довільне положення. ЗЗ при цьому відключити перемикачем SA1.
3. Встановити частоту генератора 1 кГц і напругу 25 мВ. Увімкнути джерело живлення схеми. Проконтролювати за допомогою осцилографа наявність на виході схеми неспотвореного підсиленого сигналу. Якщо він має спотворення, варто зменшити напругу вхідного сигналу.
4. Виміряти (на змінному струмі) вхідну напругу $U_{\text{вх}}$ і вхідний струм $I_{\text{вх}}$ за допомогою вольтметра та амперметра. Обчислити вхідний опір підсилювача.
5. Зняти та побудувати АЧХ підсилювача, встановивши $U_{\text{вх}} = 20$ мВ. Частоту вхідного сигналу змінювати відповідно до табл. 3.1. За допомогою вольтметра вимірювати вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ підсилювача. Дані занести в табл. 3.1.

6. Обчислити значення $K_U(F)$ і Y для кожної частоти. Отримані дані та результати розрахунків занести в табл. 3.1.

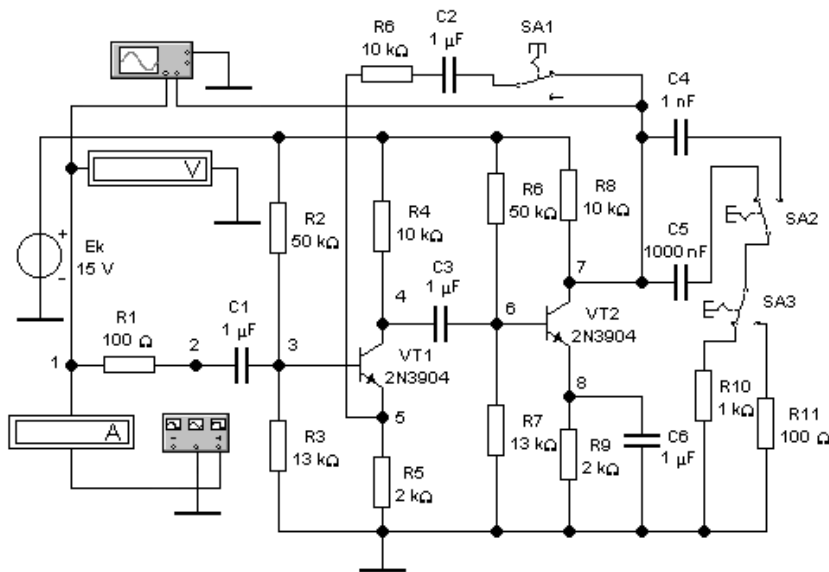


Рис. 3.2. Схема підсилювача

Експеримент 2. Дослідження схеми ввімкнення підсилювача зі 33.

1. У схемі (рис. 3.2) ввімкнути 33 перемикачем SA1.
2. Виконати пп. 1-4 експерименту 1.
3. Побудувати АЧХ підсилювача $Y = f(F)$ зі 33 разом з АЧХ підсилювача без 33. Значення $Y = K_U(F) / K_U(F_{\text{сеп}})$, де $K_U(F_{\text{сеп}})$ – коефіцієнт підсилення підсилювача на середній частоті діапазону частот $F_{\text{сеп}} = \sqrt{F_H F_B}$; $K_U(F)$ – коефіцієнт підсилення підсилювача на обраній частоті.
4. Проаналізувати отримані дані.

Таблиця 3.1

Частота, Гц	Без 33	зі 33
	$U_{\text{вх}} = \text{ мВ}, I_{\text{вх}} = \text{ мА}$ $R_{\text{вх}} = \text{ кОм}$	$U_{\text{вх}} = \text{ мВ}, I_{\text{вх}} = \text{ мА}$ $R_{\text{вх}} = \text{ кОм}$

	$U_{\text{вх}}$	$K_U(F)$	Y	$U_{\text{вх}}$	$K_U(F)$	Y
20						
50						
250						
500						
1000						
5000						
10000						
50000						
100000						
200000						
500000						
1000000						
5000000						
10000000						
50000000						

Експеримент 3. Дослідження впливу на вид АЧХ величин конденсаторов C4, C5 і опорів навантаженн R10, R11.

1. Перемикнути перемикач SA2.
2. Виконати пп. 3-6 як в експерименті 1.
3. Перемикнути перемикач SA3.
4. Виконати пп. 3-6 як в експерименті 1.
5. Проаналізувати отримані дані.

Контрольні питання

1. За якими ознаками класифікуються типи 33?
2. Пояснити вплив 33 на коефіцієнт підсилення підсилювача.
3. Пояснити вплив різних видів 33 на вхідний і вихідний опори підсилювача.
4. Як пов'язаний рівень нелінійних спотворень сигналу з видом і глибиною 33?
5. Пояснити вплив 33 на АЧХ підсилювача.
6. Як залежить коефіцієнт нестабільності підсилення від виду та глибини 33?
7. Як впливає 33 на смугу прозорості підсилювача?

Лабораторна робота 4
**ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМИ ДВОТАКТНОГО
 ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО КАСКАДУ**

Мета роботи: дослідити режими роботи двотактних підсилювальних каскадів та виміряти основні параметри.

Короткі теоретичні відомості

Режими роботи визначаються поданим зсувом на базу БТ. Розрізняють режими *A, B, C, D, AB*.

Режим А. Робочу точку вибирають у середині прохідної динамічної характеристики каскаду (рис. 4.1); при цьому струм у вихідному ланцюзі протікає протягом усього періоду вихідного сигналу. Режим характеризується мінімальними нелінійними спотвореннями.

У цьому режимі великий струм спокою $I_{к0}$, а отже, низький ККД, що становить 20-30 %. Режим використовують у попередніх каскадах підсилення.

Режим В. Робочу точку задаємо на початку прохідної характеристики (рис. 4.2), при цьому струм у вихідному ланцюзі протікає протягом половини періоду вихідного сигналу.

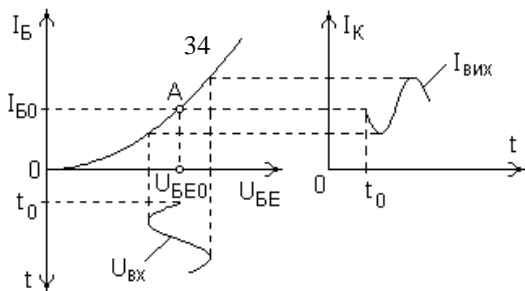


Рис. 4.1. Характеристики та сигнали в підсилювачі, що працює в режимі *A*

Струм тече у вихідному ланцюзі тільки півперіоду. ККД досить високий і становить 60-70 %. Так як використовуємо початок характеристики (а він нелінійний), то виникають більші нелінійні спотворення. Режим використовують тільки у двотактних схемах підсилення.

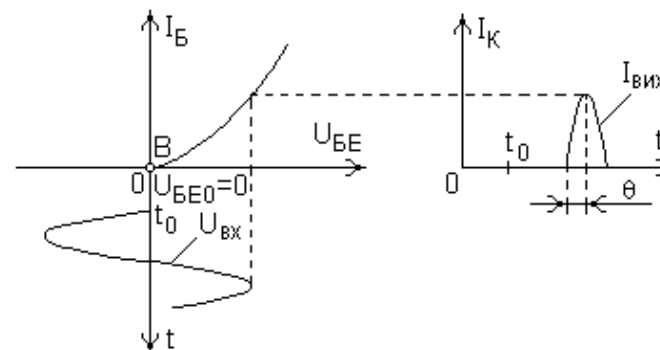


Рис. 4.2. Характеристики та сигнали в підсилювачі, що працює в режимі *B*

Режим С. Робочу точку (рис. 4.3) обирають лівіше початку координат прохідної динамічної характеристики. Кут відсічення $\theta < 90^\circ$. ККД високий (90 %), тому що струм спокою $I_{к0} \approx 0$.

Так як використовуємо початок характеристики, то збільшуються нелінійні спотворення. Цей режим застосовують у високочастотних підсилювачах потужності разом з резонансними пристроями, що дозволяють виділяти в результуючому сигналі 1-у гармоніку вхідного сигналу.

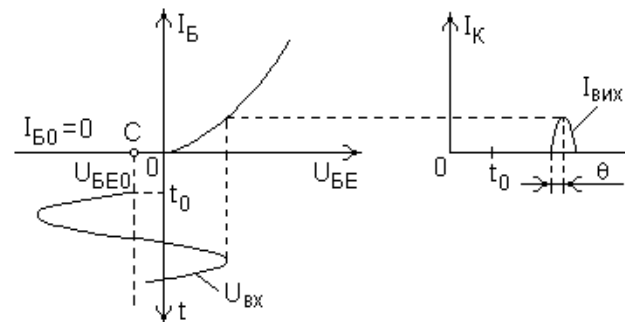


Рис. 4.3. Характеристики та сигнали в підсилювачі, що працює в режимі *C*

Режим D. Імпульсний режим. Транзистор працює як електронний ключ, тобто БТ або відкритий, або закритий.

Гармонійні сигнали підсилувати не може. Використовують в імпульсних підсилювачах потужності, при цьому ККД (95 %).

Режим АВ. Кут відсічення $\pi/2 < \theta < \pi$. Це проміжний режим між режимами *A* та *B*. Робоча точка розташована на переході від нелінійної ділянки характеристики до лінійної. Режим використовують для зменшення нелінійних спотворень підсиленого сигналу, які виникають на початковій ділянці ВАХ БТ.

Схеми двотактних безтрансформаторних підсилювальних каскадів.

Схема такого каскаду підсилювача потужності із двома джерелами живлення наведена на рис. 4.4.

Схема побудована на комплементарних транзисторах. У цих схемах проявляється ефект „сходів” (рис. 4.5). Щоб усунути ефект „сходів”, потрібно встановити режим роботи *AB*, тобто на базі БТ подати невеликий зсув ($\approx 0,5$ В). Це можна зробити шляхом введення в схему подільника напруги. Схема з подільником зображена на рис. 4.6, *a*. При використанні діодів (замість опорів *R2* і *R3* встановити діоди) варто встановити такий струм у подільнику, щоб падіння напруги на кожному діоді дорівнювало необхідному зсуву.

Схема двотактного підсилювального каскаду з одним джерелом живлення показана на рис. 4.6, *б*.

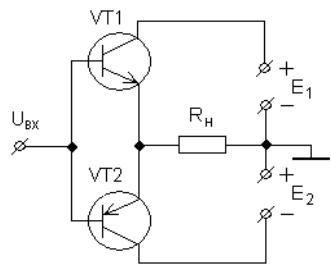


Рис. 4.4. Схема двотактного підсилювача потужності

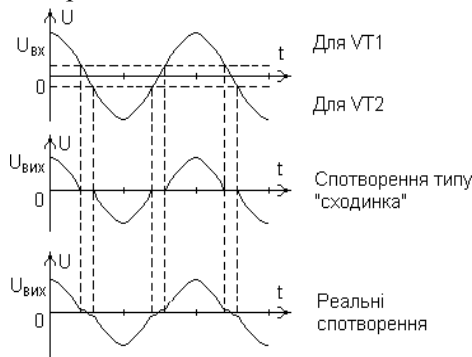


Рис. 4.5. Спотворення форми сигналів у двотактному підсилювачі

Принцип роботи каскаду. При подачі позитивної напівхвилі вхідного сигналу транзистор *VT1* відкривається, а транзистор *VT2*

залишається закритим, в результаті через навантаження R_n буде протікати струм. При цьому заряджається конденсатор $C2$. При подачі негативної напівхвилі вхідного сигналу транзистор *VT1* закривається, а *VT2* відкривається і через R_n протікає струм в іншому напрямку.

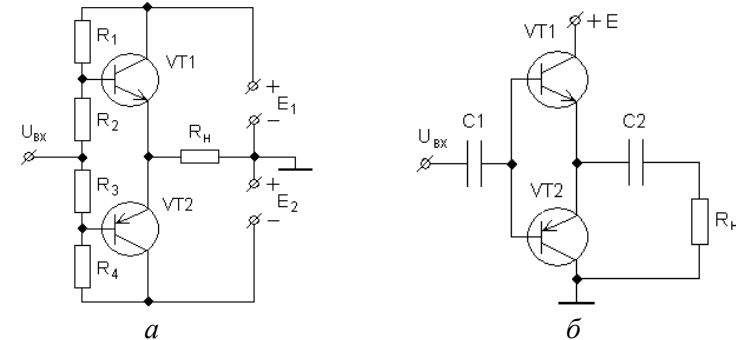


Рис. 4.6. Схема двотактного каскаду підсилення потужності: *a* – з подільником напруги; *б* – з одним джерелом живлення

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження підсилювача потужності при роботі його в режимі *B*.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 4.7.

2. Встановити перемикачі *SA2* і *SA3* у довільне положення.

Перемикачем *SA1* вимкнути опори *R2* і *R3*.

3. Увімкнути джерело живлення схеми. Виміряти (на постійному струмі) напруги в точках 1, 2, 3, 4 і 5 схеми.

4. Встановити частоту генератора 10 кГц і напругу 1 В. Увімкнути джерело живлення схеми. Проконтролювати за допомогою осцилографа наявність на виході схеми підсиленого сигналу зі спотвореннями типу “сходінка”. Зарисувати осцилограми напруг у точках 1, 2, 3, 4 і 5 схеми.

5. Визначити кут відсічення для кожної осцилограми і режиму роботи кожного з транзисторів схеми.

Експеримент 2. Дослідження роботи підсилювача потужності в режимі *AB*.

1. Залишити перемикачі $SA2$ і $SA3$ у встановленому в експерименті 1 положенні. Перемикачем $SA1$ ввімкнути опори $R2$ і $R3$.

2. Виконати пп. 3-5 експерименту 1.

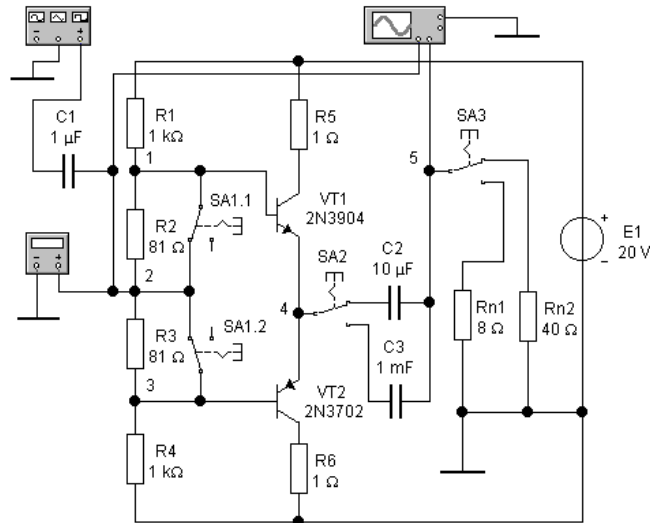


Рис. 4.7. Схема підсилювача

Експеримент 3. Дослідження впливу ємностей $C2$ і $C3$ на АЧХ підсилювача потужності в режимі B (AB).

1. Встановити перемикачі $SA2$ і $SA3$ у нижнє положення. Перемикачем $SA1$ встановити заданий режим (B або AB).

2. Зняти АЧХ підсилювача, встановивши $U_{вх} = 1$ В. Частоту вхідного сигналу змінювати відповідно з табл. 4.1. За допомогою вольтметра вимірювати вихідну напругу $U_{вих}$ підсилювача. Дані занести в табл. 4.1.

3. Обчислити значення $K_U(F)$ і Y для кожної частоти. Отримані дані та результати розрахунків занести в табл. 4.1. Методика розрахунків $K_U(F)$ і Y наведена в лабораторній роботі 3.

4. Побудувати АЧХ підсилювача $Y = f(F)$ з ємністю $C2$ (разом з АЧХ підсилювача з ємністю $C3$) на одному графіку.

5. Провести порівняння отриманих даних.

Таблиця 4.1

Частота	Конденсатор $C2 = 10$ мкФ			Конденсатор $C3 = 1$ мкФ		
	Режим B			Режим AB		
	$U_{вих}$	$K_U(F)$	Y	$U_{вих}$	$K_U(F)$	Y
20 Гц						
50 Гц						
250 Гц						
500 Гц						
1 кГц						
5 кГц						
10 кГц						
50 кГц						
100 кГц						
200 кГц						
500 кГц						
1 МГц						
50 МГц						
100 МГц						
200 МГц						
500 МГц						

Контрольні питання

1. Порівняйте режими класів A , C та AB за величиною вихідної потужності, ККД, нелінійними спотвореннями і углом отсечки.
2. У якому режимі (A або B) працюють транзистори підсилювачів потужності, наведених на рис. 4.6?
3. Чи можна на виході підсилювача потужності (рис. 4.7) одержати сигнал більший за абсолютним значенням, ніж вхідний?
4. Чи зміниться фаза вихідного сигналу при проходженні через підсилювач на рис. 4.6?
5. Яка природа спотворень типу „сходінка”?
6. Які переваги двотактного каскаду перед однокласним?

Лабораторна робота 5
**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІНВЕРТУВАЛЬНИХ
 ТА ІНВЕРТУВАЛЬНИХ СХЕМ УВІМКНЕННЯ
 ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ**

Мета роботи: дослідити схеми неінвертувальних та інвертувальних схем на операційних підсилювачах (ОП).

Короткі теоретичні відомості

Коефіцієнт підсилення неінвертувального ОП (рис. 5.1) обчислюється за формулою:

$$K_{\Pi} = 1 + \frac{R1}{R2}$$

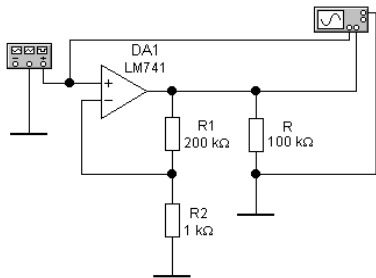


Рис. 5.1. Неінвертувальний підсилювач на ОП

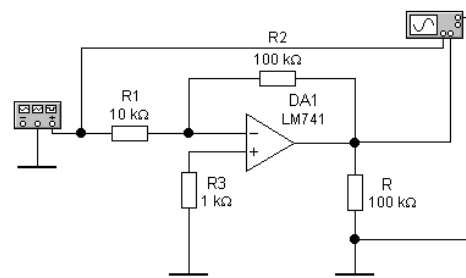


Рис. 5.2. Інвертувальний підсилювач на ОП

Постійна складова вихідної напруги підсилювача $U_{0\text{вих}}$ визначається добутком напруги зсуву $U_{\text{зм}}$ на коефіцієнт підсилення схеми K_{Π} :

$$U_{0\text{вих}} = U_{\text{зм}} K_{\Pi} \quad (5.1)$$

Коефіцієнт підсилення неінвертувального підсилювача на ОП зі зворотним зв'язком (рис. 5.2) обчислюється за формулою:

$$K_{\Pi} = -\frac{R2}{R1}$$

Знак „мінус” у формулі означає, що вихідна напруга інвертувального підсилювача знаходиться в протифазі з вхідною напругою.

Постійна складова вихідної напруги $U_{0\text{вих}}$ підсилювача обчислюється за формулою (5.1).

Порядок проведення експериментів

При проведенні експериментів на вхід підсилювача подавайте синусоїдальну напругу амплітудой 1В і частотой 1кГц.

Експеримент 1. Робота неінвертувального підсилювача у режимі підсилення синусоїдальної напруги.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 5.1.

2. Розрахувати коефіцієнт підсилення напруги K_{Π} підсилювача за заданим значенням параметрів компонентів схеми. Увімкнути джерело живлення схеми.

3. Виміряти амплітуди вхідної і вихідної напруг, постійну складову вихідної напруги $U_{0\text{вих}}$ і різницю фаз між вхідною і вихідною напругами.

4. За результатами вимірів розрахувати коефіцієнт підсилення за напругою K_{Π} підсилювача.

Експеримент 2. Дослідження впливу параметрів схеми на режим її роботи.

У схемі на рис. 5.1 зменшити значення опору $R1$ до 10 кОм. Увімкнути живлення схеми. Повторити всі операції експерименту 1 при нових параметрах компонентів. Отримані результати занести у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Параметри	Розрахунки	Виміри
Коефіцієнт підсилення, K_{Π}		
Амплітуда вхідної напруги, $U_{\text{вх}}$		
Амплітуда вихідної напруги, $U_{\text{вих}}$		
Постійна складова напруги, $U_{0\text{вих}}$		
Різниця фаз між вхідною і вихідною напругами, град		

Експеримент 3. Робота інвертувального підсилювача у режимі підсилення синусоїдальної напруги.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 5.2.

2. Повторити пп. 2-4 експерименту 1 для цієї схеми.

Експеримент 4. Дослідження впливу параметрів схеми на режим її роботи.

1. Встановити (схема на рис. 5.2) значення опору $R1=1$ кОм. Увімкнути джерело живлення схеми.

2. Провести експеримент 2 для цієї схеми.

Контрольні питання

1. Скільки відсотків від амплітуди вихідної напруги, виміряної в експериментах 1 та 3, становить постійна складова у вихідній напрузі?

2. Які параметри схеми на рис. 5.1 і 5.2 впливають на її коефіцієнт підсилення?

3. Як впливає коефіцієнт підсилення схеми (рис. 5.1) на постійну складову вихідної напруги?

4. Як зміняться основні співвідношення для схеми рис. 5.1, якщо на вхід неінвертувального ОП подати постійну напругу?

5. Накреслити такі схеми з ОП:

- повторювач, що не інвертує напругу;
- повторювач, що інвертує напругу;
- неінвертувальний підсилювач;
- інвертувальний підсилювач.

Лабораторна робота 6 ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Мета роботи: дослідити схеми: суматора, інтегратора і диференціатора на операційних підсилювачах (ОП).

Короткі теоретичні відомості

Суматор. В ідеальному підсумовувальному підсилювачі, показаному на рис. 6.1, виконуються такі співвідношення:

$$I1 = U1/R1; \quad I2 = U2/R2; \quad I_{33} = I1 + I2; \quad I_{33} = -U_{\text{вих}}/R_{33}.$$

З отриманих співвідношень:

$$U_{\text{вих}} = -(I1 + I2)R_{33} = -\left(\frac{U1}{R1} + \frac{U2}{R2}\right)R_{33} = -\frac{R_{33}}{R}(U1 + U2),$$

де $R = R1 = R2$.

Інтегратор. На рис. 6.2 показана схема інтегратора на ОП. Для цієї схеми

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R} = -C \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \quad \text{і тоді} \quad U_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt + \text{const.}$$

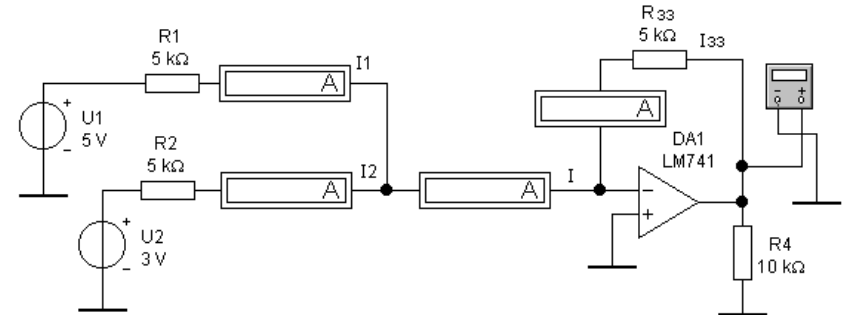


Рис. 6.1. Суматор на ОП

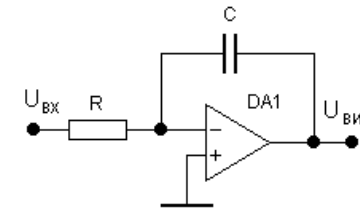


Рис. 6.2. Інтегратор на ОП

Недоліком цієї схеми є дрейф вихідної напруги, обумовлений напругою зсуву і вхідними струмами ОП.

Це небажане явище можна послабити, якщо до конденсатора C під'єднати опір $R2$ з великим значенням (рис. 6.3), що забезпечує стабілізацію робочої точки за рахунок ЗЗ на постійному струмі.

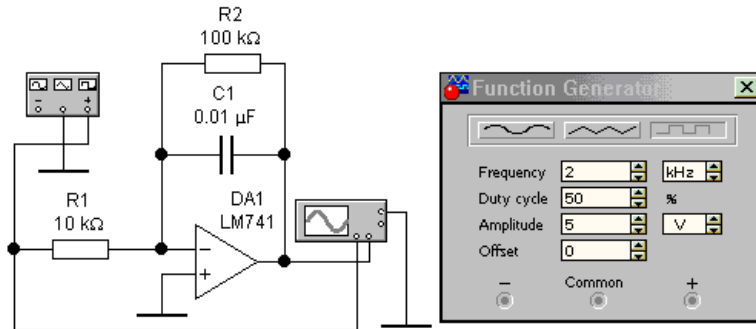


Рис. 6.3. Інтегратор з додатковим опором R_2

Опір R_2 запобігає, також, насиченню ОП після заряду конденсатора, коли струм через конденсатор дорівнюватиме нулю. Вихідна напруга цієї схеми при подачі на неї стрибка вхідної напруги амплітудою $U_{вх}$ змінюється відповідно до виразу:

$$U_{вх} = -U_{вх} \frac{R_2}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C}} \right).$$

На початковому інтервалі перехідного процесу при $t \ll R_2 C$, зміна вихідної напруги $U_{вх}$ буде досить близькою до лінійної і швидкість її зміни може бути обчислена за виразом:

$$\frac{\Delta U_{вх}}{\Delta t} = -\frac{U_{вх}}{R_1 \cdot C}.$$

Диференціатор. Схема диференціатора наведена на рис. 6.4. Вихідна напруга схеми пропорційна швидкості зміни вхідного сигналу:

$$U_{вх} = -R_2 C \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta t}.$$

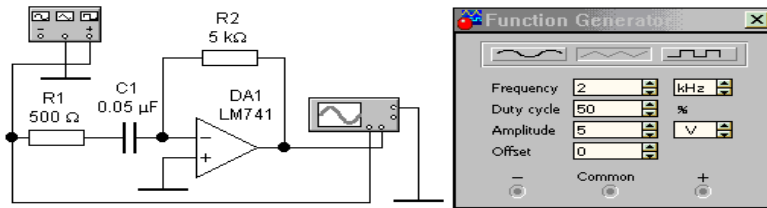


Рис. 6.4. Диференціатор на ОП

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Підсумовування постійних напруг.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 6.1.
2. Подати напруги на схему $U_1 = 5$ В та $U_2 = 3$ В.
3. Увімкнути джерело живлення схеми.
4. **Виміряйте значення $I_1, I_2, I, I_{33}, U_{вх}$.**
5. За заданими номіналами елементів схеми розрахуйте значення струмів I_1, I_2, I_{33} і, використовуючи значення напруг U_1 і U_2 , розрахувати вихідну напругу $U_{вх}$.
6. Отримані результати занести у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Параметри	I_1 , мА	I_2 , мА	$I = I_1 + I_2$, мА	I_{33} , мА	$U_{вх}$, В
Розрахунок					
Виміри					

Експеримент 2. Підсумовування постійної та змінної напруг.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 6.5.
2. Увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг.
4. Виміряти постійну складову і амплітуду вихідної напруги $U_{вх}$, використовуючи значення напруг U_1 та U_2 .
5. Встановити значення опору $R_2 = 2,5$ кОм.
6. Повторити п.п. 2-4 експерименту 2.

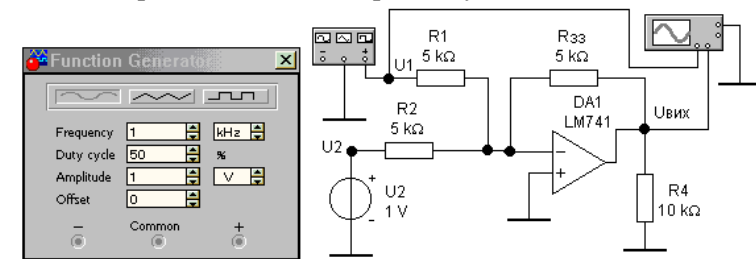


Рис. 6.5. Суматор змінної та постійної напруг

Експеримент 3. Підсумовування змінних напруг.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 6.6.

2. Увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг.
4. Вимірити амплітуди вхідних і вихідних напруг.
5. Обчислити амплітуду вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ за відомим значенням U_1 і U_2 .

Експеримент 4. Перехідний процес у схемі інтегратора.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 6.3.
2. Увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг схеми при подачі на вхід напруги у вигляді послідовності прямокутних імпульсів.
4. Виміряти амплітуду вхідної напруги та визначити за осцилограмами швидкість зміни вихідної напруги.
5. Для сталого процесу виміряти амплітуду вихідної напруги.

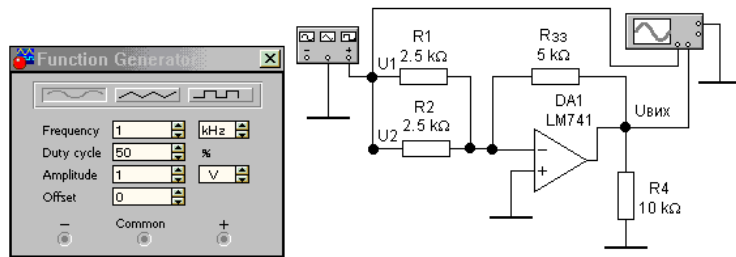


Рис. 6.6. Суматор змінних напруг

Експеримент 5. Вплив амплітуди вхідної напруги на перехідний процес у схемі інтегратора.

1. У схемі, зображеній на рис. 6.3 встановити амплітуду генератора рівною 2 В та встановити масштаб напруги на входах A та B осцилографа 2 V/div.
2. Увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг.
4. Вимірити амплітуду вхідної напруги та визначити за осцилограмами швидкість зміни вхідної напруги.
5. Порівняти осцилограми вихідної напруги, отриманої в цьому і попередньому експериментах.
6. Для сталого процесу виміряти амплітуду вихідної напруги.

Експеримент 6. Вплив опору в ланцюзі ЗЗ на вихідну напругу диференціатора.

1. У схемі рис. 6.4 відновити початкову частоту генератора, а величину опору в ланцюзі ЗЗ встановити рівною 10 кОм.
2. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг.
3. За отриманими осцилограмами визначити швидкість зміни вхідної напруги та амплітуду вихідної напруги.
4. За заданими параметрами схеми та знайденому значенню швидкості зміни вхідної напруги розрахувати амплітуду вихідної напруги.

Експеримент 7. Вплив ємності конденсатора на вихідну напругу диференціатора.

1. У схемі рис. 6.4 відновити початкові значення параметрів схеми, а величину ємності конденсатора встановити рівною 0,1 мкФ.
2. Увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг.
4. За отриманими осцилограмами визначити швидкість зміни вхідної напруги та амплітуду вихідної напруги.
5. Порівняти осцилограму вихідної напруги, отриману в даному експерименті, з осцилограмою, отриманою в експерименті 6.
6. За заданими параметрами схеми та знайденому значенню швидкості зміни вхідної напруги розрахувати амплітуду вихідної напруги.

Контрольні питання

1. Поясніть принцип роботи інтегратора.
2. Поясніть принцип роботи диференціатора.
3. За рахунок чого в суматорі відбувається додавання вхідних напруг?
4. Як впливає фаза сигналів змінних напруг на вихідний сигнал при додаванні їх на суматорі?

Лабораторна робота 7

ДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛОГОВИХ КОМПАРАТОРІВ

Мета роботи: дослідити роботу схем компараторів на основі ОП.

Короткі теоретичні відомості

Функціональне призначення компаратора полягає в зміні стану виходу при перевищенні вхідною напругою деякого граничного значення. Як компаратор може застосовуватися ОП. При цьому ОП працює переважно в області позитивного або негативного обмеження вихідної напруги, проходячи область підсилювального режиму тільки поблизу порогу.

На рис. 7.1 та 7.2 наведені схеми детекторів нульового рівня, що мають близьку до нуля граничну напругу.

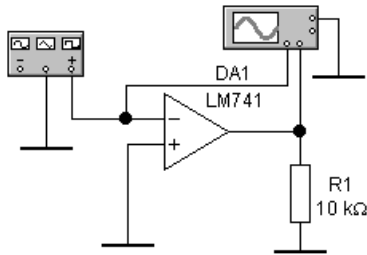


Рис. 7.1. Детектор нульового рівня (схема 1)

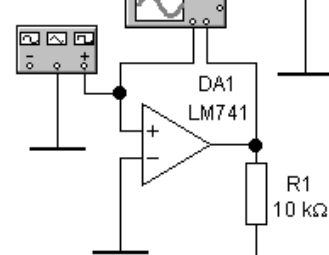


Рис. 7.2. Детектор нульового рівня (схема 2)

Схеми різняться способом подачі вхідного сигналу на вхід ОП. Використання різних входів ОП для подачі вхідного сигналу дозволяє реалізувати фіксацію рівня вхідної напруги позитивним або негативним перепадом напруги на виході компаратора. На рис. 7.3 та 7.4 наведені схеми детекторів позитивного і негативного рівнів вхідної напруги. Граничний рівень вхідної напруги в цих схемах задається величиною напруги зсуву, що подається на інвертувальний вхід ОП.

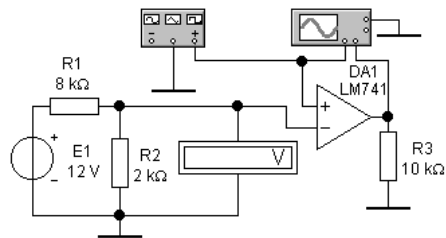


Рис. 7.3. Детектор позитивного рівня вхідної напруги

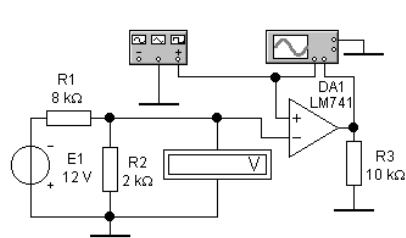


Рис. 7.4. Детектор негативного рівня вхідної напруги

Компаратор на рис. 7.5 фіксує наявність вхідної напруги в певному діапазоні значень.

Якщо вхідна напруга змінюється в межах граничних значень, що встановлюються зовнішніми елементами, то вихідна напруга має низький рівень. При виході за встановлені межі вихідна напруга змінюється на високий рівень.

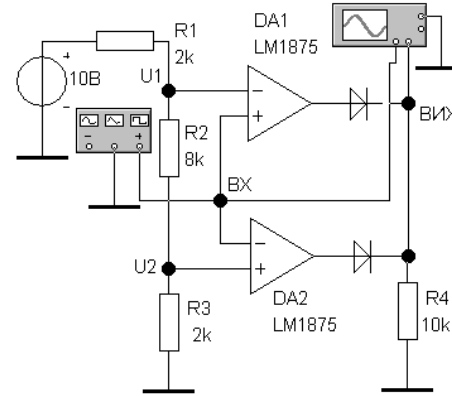


Рис. 7.5. Компаратор

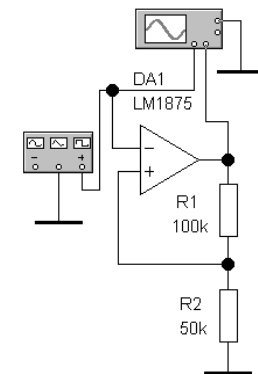


Рис. 7.6. Тригер Шмітта

Якщо при вхідному сигналі є значні шуми, то в вихідному сигналі можуть бути коливання між пороговими значеннями вихідної напруги. Таких коливань можна уникнути, якщо використовувати схему, характеристика якої має гістерезис. Однією з таких схем є тригер Шмітта (рис. 7.6).

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження характеристик детектора нульового рівня з подачею сигналу на інвертувальний вхід ОП.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.1.
2. Подати з генератора на вхід схеми синусоїдальну напругу (амплітуда 3В, частота 1Гц) і увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми вхідного та вихідного сигналів і перехідну характеристику (вихідну напругу подаємо на канал В, а вхідний - на канал А; на осцилографі натиснути кнопку В / А).
4. Визначити граничне значення вхідної напруги $U_{вх}$.

Експеримент 2. Дослідження характеристик детектора нульового рівня з подачею сигналу на неінвертувальний вхід ОП.

Лабораторна робота 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІОДНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ І ДІОДНИХ ФОРМУВАЧІВ

Мета роботи: Дослідження схем діодних обмежувачів і формувачів.

Короткі теоретичні відомості

Основна функція позитивних діодних обмежувачів полягає в тому, щоб повторювати амплітуду вхідної напруги, якщо вона не перевищує заданий поріг, а при перевищенні - підтримувати амплітуду вихідної напруги на пороговому рівні. Негативні діодні обмежувачі працюють аналогічно: амплітуда напруги на виході повторює вхідну, якщо вона вище порогового рівня. На рис.8.1-8.6 наведені схеми різних обмежувачів.

У схемах діодних формувачів амплітуда вихідної напруги дорівнює сумі амплітуди вхідної напруги і деякої постійної напруги. Позитивні діодні формувачі додають позитивну складову напруги, негативні - складову протилежного знаку. Схеми з позитивним і негативним формувачами наведені на рис.8.7 і 8.8.

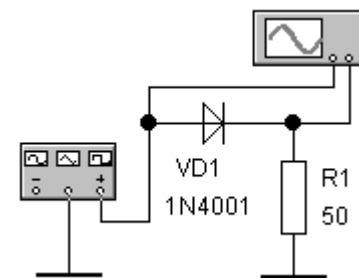


Рис.8.1 Послідовний обмежувач

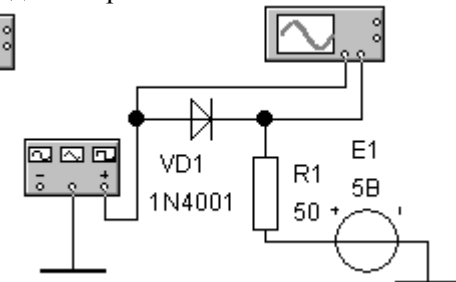


Рис. 8.2 Послідовний обмежувач зі зміщенням

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.2.

2. Повторити пп. 2...4 експеримента 1.

Експеримент 3. Дослідження характеристик компаратора з позитивною опорною напругою.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.3.

2. Повторити пп. 2...4 експеримента 1.

Експеримент 4. Дослідження характеристик компаратора з негативною опорною напругою.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.4.

2. Повторити пп. 2...4 експеримента 1.

Експеримент 5. Дослідження характеристик компаратора з фіксованою зоною вхідної напруги.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.5.

2. Увімкнути джерело живлення схеми.

3. На вхід схеми подається гармонійна напруга амплитудой 10В, частотой 1Гц.

4. Зарисувати осцилограми вхідної та вихідної напруг.

5. Визначити граничні напруги $U_{НИЖН}$ та $U_{ВЕРХ}$.

Експеримент 6. Дослідження характеристик триггера Шмитта

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.6.

2. Повторити пп. 2...4 експеримента 1.

3. Визначити значення порогових напруг.

Контрольні питання

1. Які особливості застосування ОП в схемах компараторів?

2. Перелічити способи побудови схем детекторів позитивного рівня вхідної напруги.

3. Чим визначається точність завдання порогів вхідної напруги в схемах детекторів рівня на основі ОП?

4. На чому заснована робота компаратора з фіксованою зоною вхідної напруги?

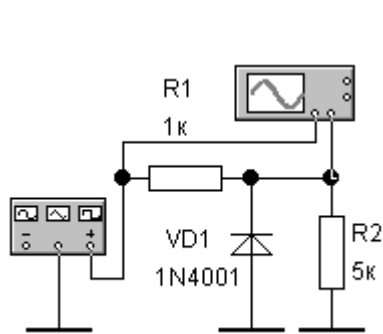


Рис. 8.3 Шунтувальний обмежувач

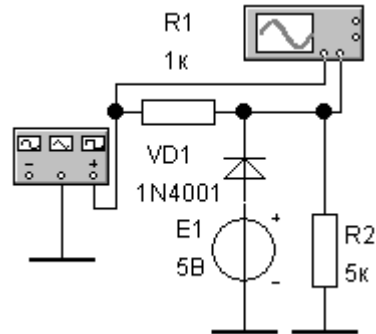


Рис. 8.4 Шунтувальний обмежувач зі зміщенням

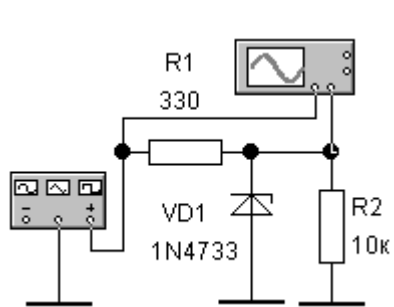


Рис.8.5 Шунтувальний обмежувач на стабілітроні

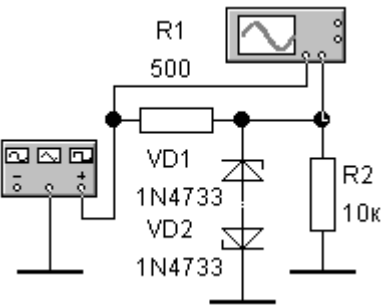


Рис.8.6 Симетричний шунтувальний обмежувач

У схемі формувача (рис.8.7) на першій негативній півхвилі вхідної напруги через діод проходить струм. Конденсатор зарядиться при цьому до значення напруги $U_{вх\ max} - 0.7\ В$, які менше амплітуди вхідної напруги на величину прямого падіння напруги на діоді. На позитивній півхвилі вхідної напруги діод **замкнений**. За час, що дорівнює періоду, конденсатор незначно розрядиться і знову підзарядиться на негативній півхвилі. У результаті на конденсаторі з'являється постійна складова напруги. Для такої роботи формувача необхідно, щоб постійна часу RC-ланцюга значно перевищувала період вхідного сигналу.

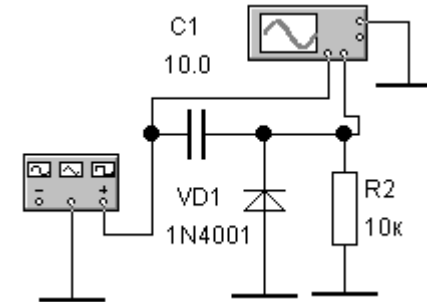


Рис. 8.7. Позитивний формувач

Порядок проведення експериментів

Результати всіх вимірювань і осцилограми занести у відповідний розділ «Результати експериментів». При проведенні всіх експериментів на схемі подавайте синусоїдальне напруження амплитудой 10В і частотой 1 Гц .

Експеримент 1. Вимірювання рівня обмеження напруги послідовного діодного обмежувача

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.1 і включіть її.
2. **За допомогою осцилографа виміряйте значення** амплітуд вхідної і вихідної напруги та рівень обмеження напруги і зарисуйте **осциллограми цих напруг**.

Експеримент 2. Вимірювання рівня обмеження напруги послідовного діодного обмежувача зі зміщенням

а) вимірювання рівня напруги при позитивному зміщенні.

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.2 і включіть її.
2. **Виконати** п.2 експеримента 1.

б) вимірювання рівня напруги при негативному зміщенні.

1. Змініть полярність вмикання джерела живлення 5В і включіть **схему**.

2. **Виконати** п.2 експеримента 1.

Експеримент 3. Вимірювання рівня обмеження напруги в схемі шунтувального діодного обмежувача.

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.3 і включіть її.
2. **Виконати** п.2 експеримента 1.

Експеримент 4. Вимірювання рівня обмеження напруги в схемі шунтувального діодного обмежувача зі зміщенням

а) Вимірювання рівня напруги при позитивному зміщенні.

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.4 і включіть її.
 2. Виконати п.2 експеримента 1.
- б) Вимірювання рівня напруги при негативному зміщенні.
1. Змініть полярність вмикання джерела живлення 5В і увімкніть

схему.

2. Виконати п.2 експеримента 1.

Експеримент 5. Вимірювання рівня обмеження напруги в схемі шунтувального обмежувача на стабілітроні

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.5 і включіть її.
2. Виконати п.2 експеримента 1.

Експеримент 6. Вимірювання рівня обмеження напруги в схемі симетричного шунтувального обмежувача на стабілітроні

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.6 і включіть її.
2. Виконати п.2 експеримента 1.

Експеримент 7. Вимірювання постійної складової амплітуди вихідної напруги в схемі позитивного діодного формувача

1. Зберіть схему, зображену на рис.8.7, і включіть її.
2. Виконати п.2 експеримента 1.
3. За свідченнями осцилографа знайдіть середнє значення (постійну складову) амплітуди вихідної напруги.

Експеримент 8. Вимірювання постійної складової амплітуди вихідної напруги в схемі позитивного діодного формувача при збільшенні амплітуди вхідної напруги

1. Встановіть амплітуду генератора в схемі (рис.8.7) рівною 12В і увімкніть схему.

2. Виконати п.3 експеримента 7.

Експеримент 9. Вимірювання постійної складової вихідної напруги в схемі позитивного формувача при зменшенні амплітуди вхідної напруги

1. Встановіть амплітуду генератора в схемі (рис.8.7) рівною 8В і увімкніть схему.

2. Виконати п.3 експеримента 7.

Контрольні питання

1. У чому відмінність між рівнями обмеження амплітуди напруги в схемах послідовного діодного обмежувача без зміщення і зі зміщенням?

2. Чому в схемі на рис. 8.1 розрізняються мінімальні амплітуди вхідної і вихідної напруги?

3. Чим визначається рівень обмеження амплітуди напруги в схемі шунтувального діодного обмежувача?

4. Чим визначаються позитивний і негативний рівні обмеження амплітуди напруги в схемі на рис.8.5?

5. Чим відрізняються осцилограми вхідної та вихідної напруги схеми позитивного діодного формувача?

Лабораторна робота 9

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ (ОП)

Мета роботи: вивчити принципи побудови активних фільтрів на ОП.

Короткі теоретичні відомості

Активний фільтр представляє собою чотириполюсник, що містить пасивні RC-ланцюга та активні елементи: транзистори, операційні підсилювачі (ОП) та ін.

Фільтри можуть мати одну чи кілька ланцюгів зворотного зв'язку (ЗЗ). У зв'язку з цим розрізняють фільтри з одноконтурним і з багатоконтурним ЗЗ. Крім цього, розрізняють фільтри за кількістю полюсів на частотній характеристиці - фільтри першого порядку, другого і більш високих порядків. Фільтри високих порядків мають більш круті межі смуг пропускання і загасання і більш плоску характеристику в області смуги пропускання. До таких фільтрів відносяться фільтри Чебишева, Баттерворта, Бесселя та ін.

Схема активного фільтра на ОП з одноконтурним ЗЗ приведена на рис. 9.1. Вона складається з двох пасивних чотириполюсників А і В і інвертувального ОП.

Передаточну функцію для схеми, наведеної на рис. 9.1, можна отримати, використовуючи рівняння чотириполюсників в Y-параметрах:

$$I_{1a} = Y_{11a}U_{1a} + Y_{12a}U_{2a} \quad (9.1)$$

$$I_{2a} = Y_{21a}U_{1a} + Y_{22a}U_{2a}, \quad \partial eY_{12a} = Y_{21a}$$

$$I_{1b} = Y_{11b}U_{1b} + Y_{12b}U_{2b} \quad (9.2)$$

$$I_{2b} = Y_{21b}U_{1b} + Y_{22b}U_{2b}, \quad \partial eY_{12b} = Y_{21b}$$

$$\text{де } Y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{U_1=0}, Y_{21} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{U_2=0}.$$

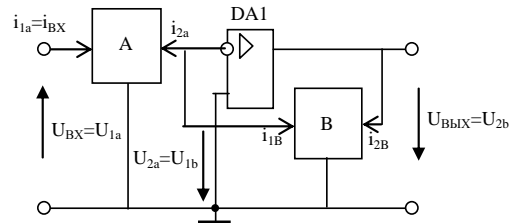


Рис. 9.1. Схема активного фільтра на ОП з одноконтурним ЗЗ

Для ідеального інвертувального ОП ($U_{ВХ}=0, i_{ВХ}=0, U_{2a}=U_{1b}=0$ та $i_{2a}=-i_{1b}$) рівняння (9.1) і (9.2) приводяться до виду:

$$\begin{aligned} I_{1a} &= Y_{11a} U_{1a} & I_{1b} &= Y_{12b} U_{2b} \\ I_{2a} &= Y_{21a} U_{1a} & I_{2b} &= Y_{22b} U_{2a} \end{aligned}$$

звідси $Y_{12a} U_{1a} = -Y_{12b} U_{2b}.$ (9.3)

Звідси коефіцієнт передачі фільтра по напрузі

$$K_U = \frac{U_{2b}}{U_{1a}} = -\frac{Y_{12a}}{Y_{12b}} = -\frac{Y_{21a}}{Y_{21b}}. \quad (9.4)$$

тобто визначається відношенням передавальних провідностей пасивних чотириполосників A і B .

Фільтр нижніх частот (ФНЧ) з одноконтурним ЗЗ. Схема ФНЧ першого порядку наведена на рис. 9.2. Передаточна провідність чотириполосника A має значення $Y_{21a} = -g_a$, а чотириполосника B – значення $Y_{21b} = -(g_b + j\omega C_b)$.

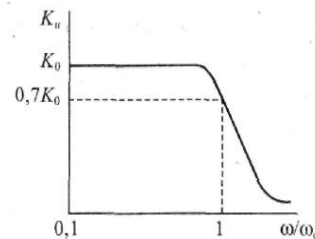
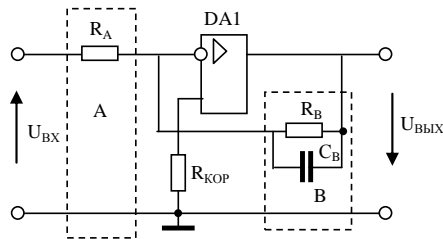


Рис. 9.2. ФНЧ з одноконтурним ЗЗ першого порядку і його АЧХ

Коефіцієнт передачі ФНЧ по напрузі

$$K_U = -\frac{K_0 \omega_c}{j\omega + \omega_c}, \quad (9.5)$$

де $K_0 = g_a/g_b$ — коефіцієнт передачі фільтра на постійній напрузі, $\omega_c = g_b/C_b$ - частота зрізу фільтра.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра (рис.9.2):

$$|K_U| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_c^2}}}. \quad (9.6)$$

Из рис. 9.2 видно, що на частоті зрізу фільтр вносить загасання, рівне $0,707 K_0$ (або 3 дБ).

Коефіцієнт передачі ФНЧ другого порядку в загальному випадку визначається виразом

$$K_U = \frac{K_0 \omega_c^2}{p^2 + \alpha \omega_c p + \omega_c^2}, \quad (9.7)$$

де K_0 — коефіцієнт передачі фільтра на постійній напрузі, ω_c — частота зрізу фільтра, $\alpha = Q^{-1}$ — згасання фільтра, Q — його добротність. Вираз (9.7) має два полюса

$$p_{1,2} = -\frac{\alpha \omega_c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha \omega_c}{2}\right)^2 - \omega_c^2}. \quad (9.8)$$

Зі (9.8) випливає, що при $\alpha < 2$ полюси коефіцієнта передачі будуть комплексно-спряженими, а при $\alpha > 2$ - реальними. Схема та АЧХ ФНЧ другого порядку наведено на рис. 9.3. При $\alpha \rightarrow 0$ добротність $Q \rightarrow \infty$ і фільтр буде збуджуватися на частоті ω_c . Частота зрізу фільтра

$$\omega_c = (R_{1a} R_{2b} C_{1b} C_{2b})^{-1/2},$$

добротність фільтра $Q = \alpha^{-1} = \left[\frac{C_{2b} (R_{1b} + R_{2b})^2}{C_{1b} R_{1b} R_{2b}} \right]^{-1/2},$

коефіцієнт передачі на постійній напрузі $K_0 = \frac{R_{1b} + R_{2b}}{R_{1a} + R_{2a}}$.

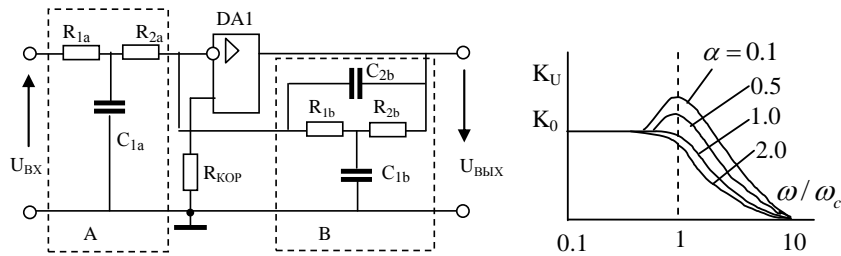


Рис. 9.3. Схема ФВЧ другого порядку і його АЧХ

Фільтр верхніх частот (ФВЧ) з одноконтурним ЗЗ. Схема ФВЧ першого порядку і його АЧХ наведені на рис. 9.4. Передаточні провідності пасивних чотириполіусників

$$Y_{21a} = -j\omega C_a; Y_{21b} = -(g_b + j\omega C_b);$$

Коефіцієнт передачі фільтра

$$K_U = -\frac{Y_{21a}}{Y_{21b}} = -\frac{j\omega C_a}{g_b + j\omega C_b} = -\frac{j\omega K_0}{\omega_c + j\omega}, |K_U| = \frac{\omega K_0}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}}, \quad (9.9)$$

де $K_0 = C_a / C_b$ - коефіцієнт передачі фільтра на безкінечно високій частоті, $\omega_c = (R_b C_b)^{-1}$ — частота зрізу фільтра.

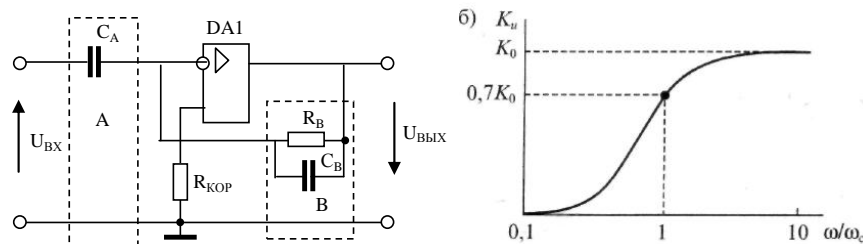


Рис. 9.4. Схема ФВЧ першого порядку з одноконтурним ЗЗ та його АЧХ

Передаточна характеристика ФВЧ другого порядку визначається в загальному випадку виразом

$$K_U = \frac{K_0}{p^2 + \alpha\omega_c p + \omega_c^2}, \quad (9.10)$$

яка має два полюса (9.8).

АЧХ такого фільтра визначається формулою:

$$|K_U| = \frac{K_0 \omega^2}{\sqrt{\omega^4 + \omega^4 \omega_c^2 (\alpha^2 - 2) + \omega_c^4}} \quad (9.11)$$

і має вигляд, зображеної на рис. 9.5. При цьому нахил характеристики становить 40 дБ на декаду.

Схема ФВЧ другого порядку наведена на рис. 9.5. Основні характеристики ФВЧ:

- частота зрізу фільтра і добротність определяються так же, как и для ФНЧ;

- коефіцієнт передачі на високій частоті:

$$K_0 = \frac{C_{1a} C_{2a}}{C_{2b} (C_{1a} + C_{2a})}.$$

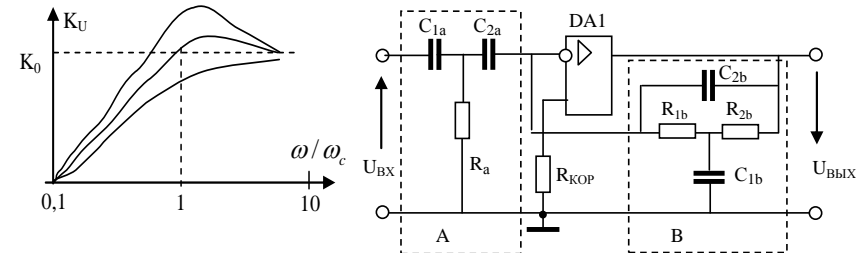


Рис. 9.5. АЧХ ФВЧ другого порядку і його схема

Полосовий фільтр (ПФ) з одноконтурним ЗЗ. ПФ бувають двополіусні (другого порядку) і багатополіусні (високого порядку).

Графік АЧХ для двох значень добротності та схема ПФ наведені на рис. 9.6. З підвищенням добротності полоса пропускання фільтра звужується, а максимальне посилення залишається незмінним.

Для цієї схеми ПФ:

- максимальне посилення в полосі пропускання

$$K_0 = \frac{C_{1b}}{C_{2b}} \frac{g_a}{g_{1b} + g_{2b}};$$

- квазірезонансна частота

$$\omega_c = (R_{1a} R_{2b} C_{1b} C_{2b})^{-1/2},$$

- добротність

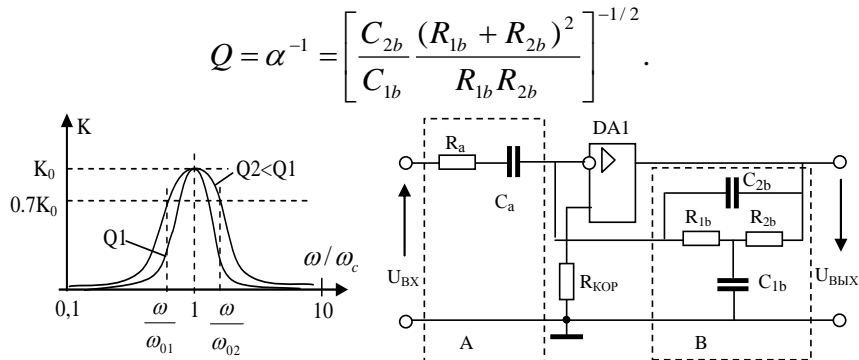


Рис. 9.6. АЧХ полосового фільтра та його схема
Загороджувальний фільтр (ЗФ) з одноконтурним ЗЗ.
 АЧХ ЗФ має вигляд:

$$K_U = |K_{3\Phi}| = \frac{K_0(\omega^2 - \omega_0^2)}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\alpha\omega\omega_0)^2}}, \quad (9.16)$$

АЧХ і схема ЗФ зображена на рис.9.8. На частоті $\omega = \omega_0$ має $K_U=0$, а на постійній напругі отримуємо $K_U=K_0$ ($\omega = 0$). С підвищенням частоти $K_{3\Phi} \rightarrow K_0$.

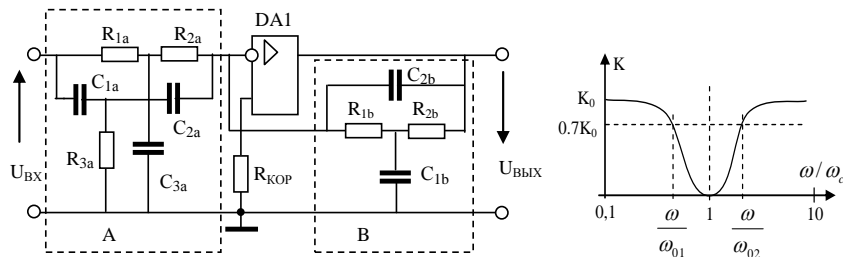


Рис. 9.8. Загороджувальний фільтр з одноконтурним ЗЗ і його АЧХ

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження фільтра нижніх частот с одно контурним ЗЗ першого порядку.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 9.9.

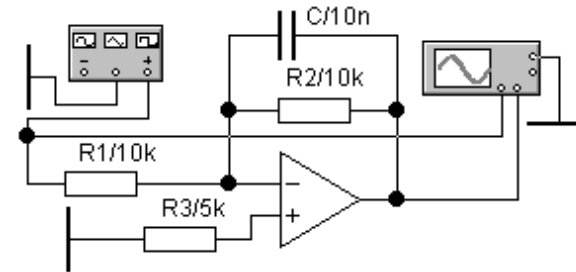


Рис. 9.9. Фільтр НЧ з одноконтурним ЗЗ

2. Зняти АЧХ фільтра, встановивши $U_{вх}=1$ В. Частоту вхідного сигналу змінювати відповідно з табл. 9.1. Вимірювати вихідну напругу $U_{вих}$ підсилювача. Дані занести в табл. 9.1.

Обчислити значення $K_U(F)$ для кожної частоти. Отримані дані та результати розрахунків занести в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Частота (F)	(Назви досліджених фільтрів)	
	$U_{ВВХ}$ (В)	$K_U(F)$
20 Гц		
50 Гц		
250 Гц		
500 Гц		
1 кГц		
5 кГц		
10 кГц		
50 кГц		
100 кГц		
200 кГц		
500 кГц		
1 МГц		
50 МГц		
500 МГц		

3. Побудувати АЧХ фільтра $K_U = f(F)$.

4.Визначити нахил АЧХ в дБ / дек.

5. Визначити полосу пропускання фільтра

Експеримент 2. Дослідження фільтра нижніх частот другого порядку.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 9.10.

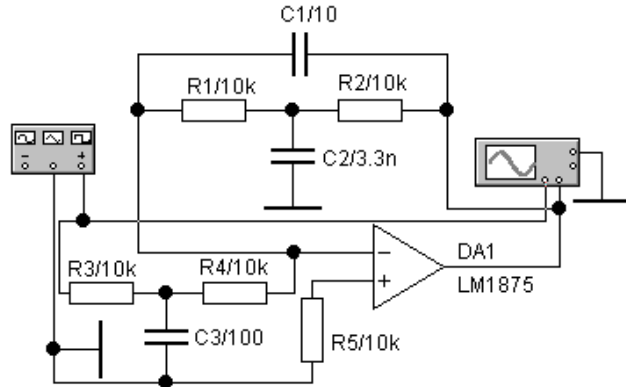


Рис. 9.10. Фільтр НЧ другого порядку

2. Повторити п.п. 2-5 експеримента 1.

Експеримент 3. Дослідження фільтра верхніх частот першого порядку.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 9.4.

2. Повторити п.п. 2-5 експеримента 1.

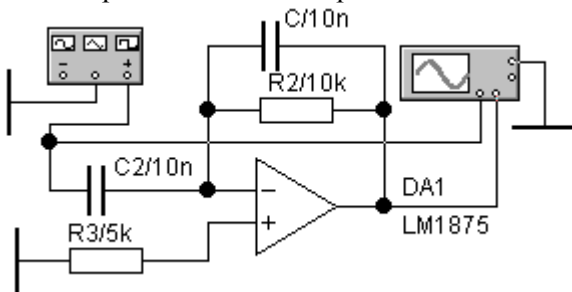


Рис. 9.11. Фільтр ВЧ з одноконтурним ЗЗ

Експеримент 4. Дослідження фільтра верхніх частот другого порядку.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 9.5.

2. Повторити п.п. 2-5 експеримента 1.

Експеримент 5. Дослідження полосового фільтра.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 9.12.

2. Повторити п.п. 2-5 експеримента 1.

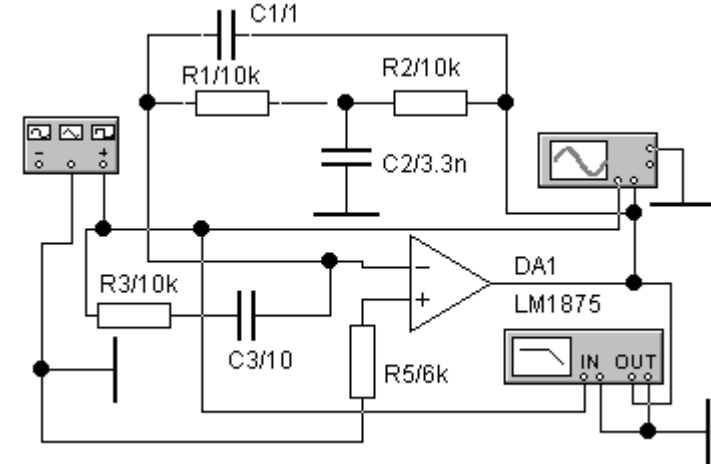


Рис. 9.12. Полосовой фільтр

Контрольні запитання

1. В чому складаються різниця АЧХ і ФЧХ фільтрів нижніх і верхніх частот?
2. Що таке порядок фільтра?
3. Що таке частота зрізу фільтра?
4. Як впливає ФНЧ та ФВЧ на передачу прямокутних імпульсів?
5. В чому перевага активних фільтрів перед пасивними?

Лабораторна робота 10

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: вивчити принципи побудови нелінійних перетворювачів на ОП.

Короткі теоретичні відомості

У ряді випадків необхідно, щоб залежність вхідної і вихідної напруги ОП була нелінійною. При монотонних залежностях вирішити цю проблему можна на основі методу кусково-лінійної апроксимації. Суть методу полягає в тому, що коефіцієнт передачі ланцюга НЗЗ ОП повинен мати кілька дискретних значень, кожне з яких відповідає певному діапазону зміни вхідного сигналу. Для цього ланцюга НЗЗ ОП виконуються у вигляді складних дільників,

що містять комбінації лінійних і нелінійних елементів. Коефіцієнт передачі цих ділянок апроксимує необхідну нелінійну залежність, причому чим більше число дискретних значень може приймати коефіцієнт передачі НЗЗ ОП, тим ближче одержувана залежність вихідної напруги від вхідної до заданої.

Розглянемо підсилювачі, у яких при зміні вхідної напруги забезпечується збільшення та зменшення коефіцієнта підсилення.

Схема підсилювача зі зростаючим коефіцієнтом передачі і його передаточна характеристика наведено на рис. 10.1. У цьому підсилювачі замість вхідного резистора використовує нелінійний ланцюг, складений з резисторів і стабілітронів. Для розгляду роботи такого підсилювача припустимо, що $U_{VD1} > U_{VD2}$ і стабілітрони ідеальні: струм у не пробитому стані стабілітрона дорівнює нулю, диференціальний опір стабілітрона в робочій області характеристики дорівнює нулю, тобто якщо $I_{CT} > 0$, то $U_{CT} = U_{CT0}$.

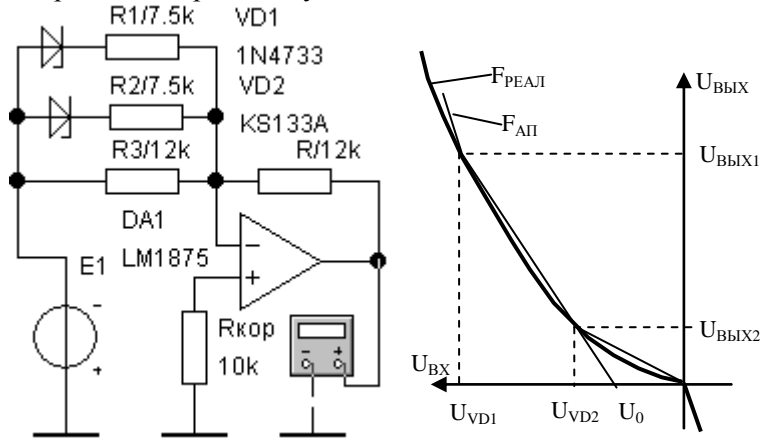


Рис. 10.1. Схема нелінійного перетворювача зі зростаючим коефіцієнтом підсилення (а), його передаточна характеристика (б)

Припустимо, що полярність вхідної напруги негативна. Тоді, якщо вхідна напруга підсилювача лежить в діапазоні $0 > U_{ВХ} > U_{VD1}$, обидва стабілітрона замкнені. Коефіцієнт передачі ланцюга НЗЗ визначається тільки опором резистора R_3 і тому коефіцієнт передачі всього підсилювача дорівнює $K_U = R_{OC} / R_3$.

Коли вхідна напруга зменшиться до напруги пробією стабілітрона VD_2 , коефіцієнт передачі ланцюга НЗЗ стрибком зменшиться і відповідно збільшиться коефіцієнт передачі всього підсилювача

$$K_U = R_{OC} / \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

Новий коефіцієнт передачі підсилювача буде залишатися постійним до тих пір, поки вхідна напруга лежить в діапазоні $U_{VD1} > U_{ВХ} > U_{VD2}$. При подальшому зменшенні вхідної напруги настане пробой стабілітрона VD_1 . У результаті коефіцієнт передачі ланцюга НЗЗ ще більше впаде і відповідно ще більше зросте коефіцієнт передачі підсилювача $K_U = R_{OC} / \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$.

Якщо вхідна напруга має позитивну полярність, то нехтуючи напругами на прямозміщених стабілітронах, коефіцієнт передачі пристрою для всього діапазону зміни вхідної напруги буде постійним і дорівнює максимально можливій величині.

Число використаних у схемі стабілітронів і напруги їх пробією залежать від необхідної точності наближення до заданої функції.

Підсилювач зі зменшувальним коефіцієнтом передачі можна отримати, якщо в раніше розглянутій схемі нелінійний двополосник і резистор зворотного зв'язку поміняти місцями. Схема такого підсилювача і її передаточна характеристика наведено на рис. 10.2. У даному випадку коефіцієнт передачі буде зменшуватися при зменшенні вхідної напруги.

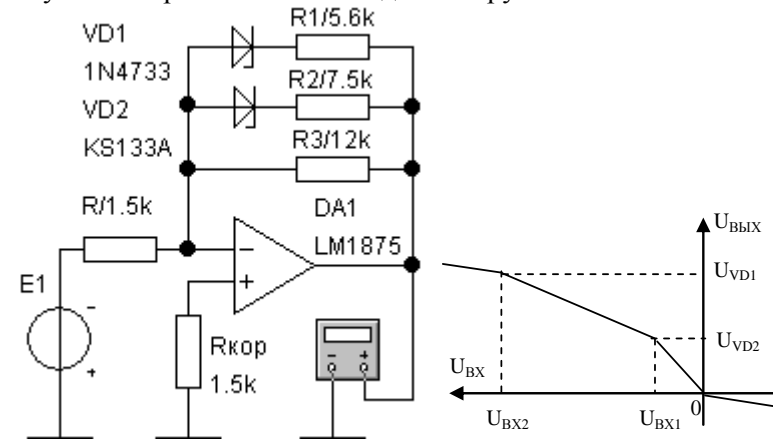


Рис 10.2. Схема нелінійного перетворювача з монотонно спадним коефіцієнтом посилення і її передаточної характеристики

Якщо на вхід пристрою подано позитивна напруга, то практично у всьому діапазоні зміни вхідного сигналу його коефіцієнт передачі буде постійний. При цьому він буде мінімальним, так як всі стабілітрони зміщені в прямому напрямі.

Вхідна напруга, у якому відбуватиметься зміна коефіцієнта передачі підсилювача, можна визначити, знаючи напругу пробую стабілітронів. Перший перелом передаточної характеристики відбувається в момент, коли вихідна напруга досягне U_{VD2} . При цьому вхідна напруга підсилювача $U_{BX1} = U_{ВИХ} / K_{UOOC1} = U_{VD2} R / R_{OC3}$. Для другого перелому передавальної характеристики вихідна напруга має збільшитися до U_{VD1} . Це відбувається в момент, коли вхідна напруга досягне $U_{BX2} = U_{BX1} + (U_{VD1} - U_{VD2}) R (R_{332} + R_{333}) / R_{332} R_{333}$.

Використовуючи описані принципи, можна побудувати різні схеми нелінійних перетворювачів. На рис. 10.3 наведена схема нелінійного перетворювача із симетричною характеристикою. Поки вихідна напруга недостатня для пробую одного з стабілітронів, його коефіцієнт передачі визначається відношенням опорів резисторів R_{331} й R . Після пробую відповідного стабілітрона коефіцієнт передачі пристрою падає.

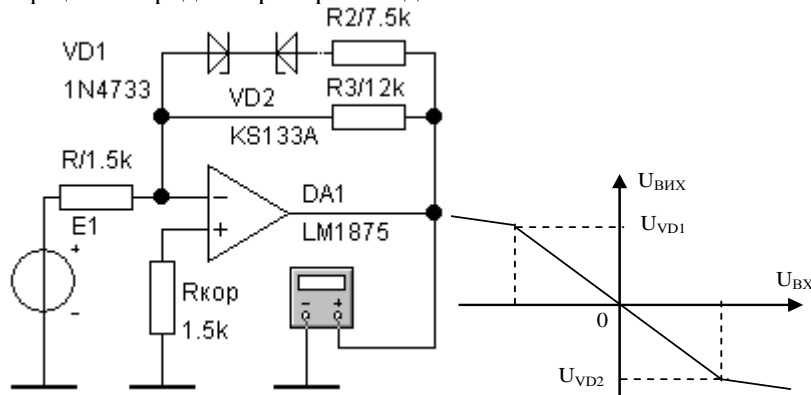


Рис10.3. Схема нелінійного перетворювача із симетричною передавальною характеристикою і його передаточної характеристики

Схеми обмежувачів рівня напруг є окремим випадком схем нелінійних перетворювачів. Від даних пристроїв потрібно, щоб

починаючи з деякого рівня вихідної напруги подальше збільшення вхідного сигналу не призводило до збільшення вихідної напруги.

За своєю суттю обмеження вихідної напруги ОП можна розуміти як значне зменшення його коефіцієнта передачі. У цьому разі вирішити проблему обмеження можна, користуючись принципами побудови нелінійних перетворювачів. Приклад такого технічного рішення наведено на рис. 10.4.

До тих пір, поки напруга на виході ОП недостатня для пробую відповідного стабілітрона, його коефіцієнт передачі дорівнює власному коефіцієнту підсилення ОП. При перевищенні вихідної напруги, напруга пробую відповідного стабілітрона коефіцієнт передачі пристрою різко падає. Дійсно, диференціальний опір стабілітрона в режимі зворотного пробую прагне до нуля. При цьому коефіцієнт передачі ланцюга НЗЗ прагне до одиниці і вихідна напруга фіксується на рівні, яка дорівнює напрузі пробую стабілітрона.

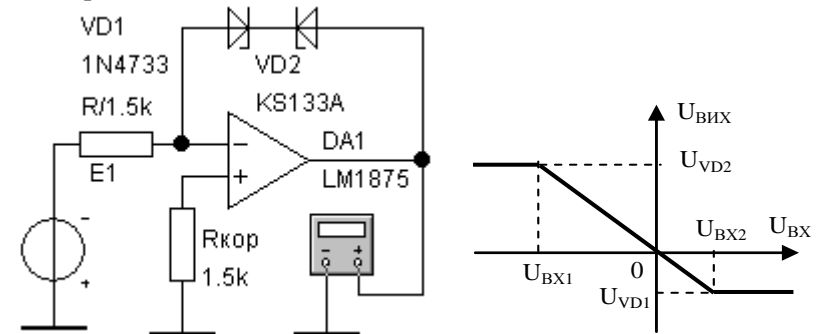


Рис. 10.4. Схема обмежувача рівня і його передавальна характеристика

При необхідності коефіцієнт передачі обмежувача рівня в діапазоні вхідних напруг, недостатніх для пробую стабілітронів, може бути встановлений на необхідному рівні. Для цього паралельно стабілітрона включають резистор зворотного зв'язку.

Вибором необхідних напруг пробую стабілітронів у наведеній схемі для різної полярності вихідної напруги можна забезпечити як симетричне, так і несиметричне обмеження вихідної напруги.

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження нелінійного перетворювача з зростаючим коефіцієнтом посилення.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 10.1. Диапазон изменения входного напряжения от 0 до -7В.

2. Зняти передаточну характеристику схеми. Результати експерименту занести в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

U _{ВХ} (В)										
U _{ВИХ} (В)										

3. Побудувати передаточну характеристику перетворювача.

Експеримент 2. Дослідження нелінійного перетворювача з убиваючим коефіцієнтом посилення.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 10.2. Диапазон изменения входного напряжения от 0 до -2В.

2. Повторити п.п. 2-3 експерименту 1.

Експеримент 3. Дослідження обмежувача рівня.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 10.3. Диапазон изменения входного напряжения от 0 до ± 2В.

2. Повторити п.п. 2-3 експерименту 1.

Експеримент 4. Дослідження обмежувача рівня.

1. Зібрати схему, наведену на рис. 10.4. Диапазон изменения входного напряжения от 0 до ± 1В.

2. Повторити п.п. 2-3 експерименту 1.

Контрольні запитання

1. Чим забезпечується в схемах обмеження вихідної напруги?
2. Чим забезпечується коефіцієнт передачі обмежувачів?
3. Призначення R_{КОР} в схемах нелінійних перетворювачів?
4. Чим визначається точність наближення до заданої функції в нелінійному перетворювачі?

Лабораторна робота 11

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ (ПРЯМОКУТНИХ ІМПУЛЬСІВ)

Мета роботи: вивчити принципи роботи автоколивальних мультівібраторів на БТ та ОП.

Короткі теоретичні відомості

Генераторами електричних сигналів називаються пристрої, що перетворюють електричну енергію джерела постійного струму в енергію незгасаючих електричних коливань з необхідними параметрами.

Розрізняють генератори синусоїдальних (гармонійних коливань) і імпульсних сигналів. За принципом роботи генератори поділяють на генератори з самозбудженням (автогенератори) і генератори з зовнішнім збудженням (очікуючі генератори).

Для одержання незгасаючих електричних коливань необхідне виконання двох умов: балансу фаз і балансу амплітуд.

Умова балансу фаз:

$$\varphi_k + \varphi_p = 0, 2\pi, \dots, 2n\pi,$$

де φ_k і φ_p – відповідно зсув фаз, внесений підсилювальним елементом і ланцюгом ЗЗ; n – ціле число.

Умова балансу амплітуд:

$$\beta_{33} K_U \geq 1,$$

де β_{33} – коефіцієнт передачі кола ЗЗ; K_U – коефіцієнт підсилення за напругою підсилювального елемента.

Мультівібратор – автоколивальний генератор прямокутних імпульсів. Це пристрій, що здатні по черзі знаходитись у двох тимчасово стійких (квазістійких) станах, у кожному з яких вони переходять автоматично за рахунок перехідних процесів, що протікають у схемі.

Мультівібратор на БТ. Схема симетричного автоколивального мультівібратора з колекторно-базовими зв'язками показана на рис. 11.1, а.

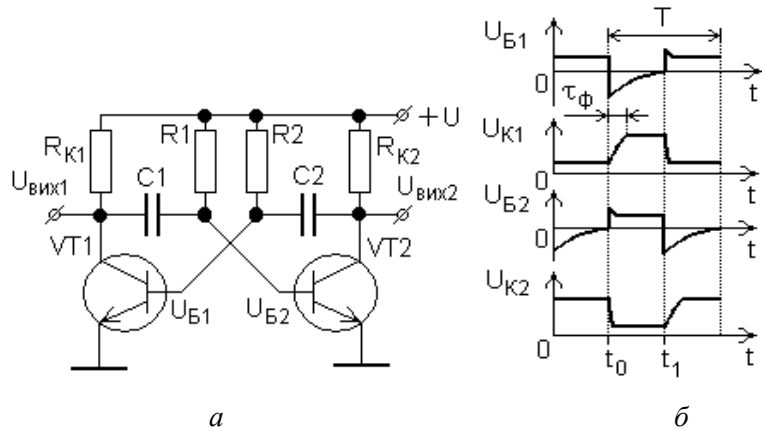


Рис. 11.1. Схема симетричного автоколивального мультивібратора:
а – на БТ; б – часові діаграми роботи

При $t=0$ подаємо напругу $+U_{ж}$, тоді $I_{к1} = I_{к2}$. Якщо в силу якихось причин струм $I_{к1}$ збільшується, то напруга на колекторі $U_{к1}$ зменшується і негативний перепад напруги (через ємність $C1$) передається на базу $VT2$. Струм $I_{к2}$ падає, $U_{к2}$ – росте і позитивний перепад напруги (через ємність $C2$) передається на базу $VT1$ – у підсумку лавиноподібно відкривається $VT1$ і закривається $VT2$.

Згідно з рис. 11.1, а:

- $C1$ перезаряджається колом $+U_{ж} - R1 - C1 - VT1$ – корпус;
- $C2$ заряджається колом $+U_{ж} - R_{к2} - C2 - VT1$ – корпус.

Коли $t=t_0$, як тільки напруга на $C1$ досягне напруги відкривання $VT2$, останній відкриється і піде процес перекидання схеми, коли $VT1$ закриється, а $VT2$ повністю відкриється.

Далі:

- $C1$ заряджається колом $+U_{ж} - R_{к1} - C1 - VT2$ – корпус;
- $C2$ перезаряджається колом $+U_{ж} - R2 - C2 - VT2$ – корпус.

Якщо $t=t_1$, то процес повторюється (рис. 11.1 б).

Тривалість імпульсу визначається часом перебування відповідного транзистора в замкненому стані:

$$\tau = R_0 C \ln 2 = 0,7 R_0 C.$$

Період коливань для симетричного мультивібратора:

$$T = 2\tau = 1,4 R_0 C.$$

Тривалість фронту імпульсу: $t_{\phi} = 3R_k C$.

Якщо не забезпечується необхідний час t_{ϕ} , то вводять коригувальні діоди (рис. 11.2).

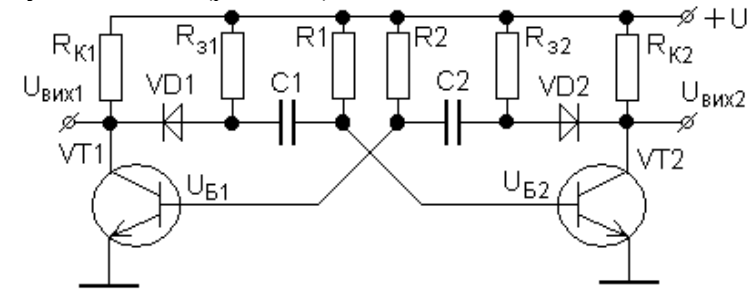


Рис. 11.2. Схема мультивібратора з коригувальними діодами

Тоді зарядка ємності $C2$ здійснюється наступним колом $+U_{ж} - R_{32} - C2 - VT1$ – корпус, тому що $VD2$ закритий.

Перезарядка $C1$ здійснюється наступним колом $+U_{ж} - R1 - C1 - VD1 - VT1$ – корпус, тому що $VD1$ відкритий.

Тривалість фронту t_{ϕ} буде вже визначатися опором $R_{к_{\text{кв}}} = R_{к1} \parallel R_{31}$, тобто струм різко зростає (якщо $R_{к1} = R_{31}$, то $R_{к_{\text{кв}}} = 0,5R_{к1}$).

Мультивібратор на ОП. Принципова схема і часові діаграми роботи автоколивального мультивібратора на ОП показані на рис. 11.3.

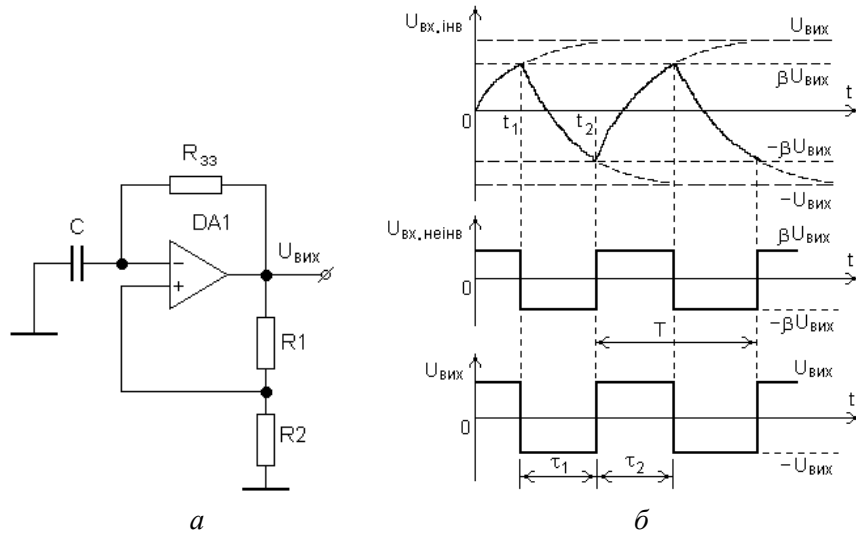


Рис. 11.3. Мультивібратор на ОП (а); часові діаграми роботи (б)

У схемі реалізований ПЗЗ з коефіцієнтом передачі $\beta_{33} = R1/(R1 + R2)$ та НЗЗ – RC-ланцюгом. При ввімкненні джерела живлення диференціальна напруга зсуву за рахунок дії ПЗЗ стрибком переводить ОП у режим обмеження вхідного сигналу ($U_{вих} = |U_{нас}|$).

Нехай у момент t_0 ОП знаходиться в стані $U_{нас}^+$, конденсатор C прагне зарядитися до цієї напруги. Однак у момент часу t_1 напруга на інвертувальному вході (U_c) перевищить напругу, що в цей час прикладена до неінвертувального входу ($\beta_{33}U_{нас}^+$) і ОП перейде в стан $U_{нас}^-$. Конденсатор прагне перезарядитися до напруги $U_{нас}^+$, але в момент часу t_2 ОП знову перекинеться в стан $U_{нас}^-$ і процес повторюється спочатку.

Тривалість імпульсів:

$$\tau_1 = \tau_2 = 2,3RC \ln \frac{1 + \beta_{33}}{1 - \beta_{33}}.$$

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження мультивібратора на БТ.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 11.4.
2. Увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати осцилограми напруг у вузлах 1, 2, 3, 4.

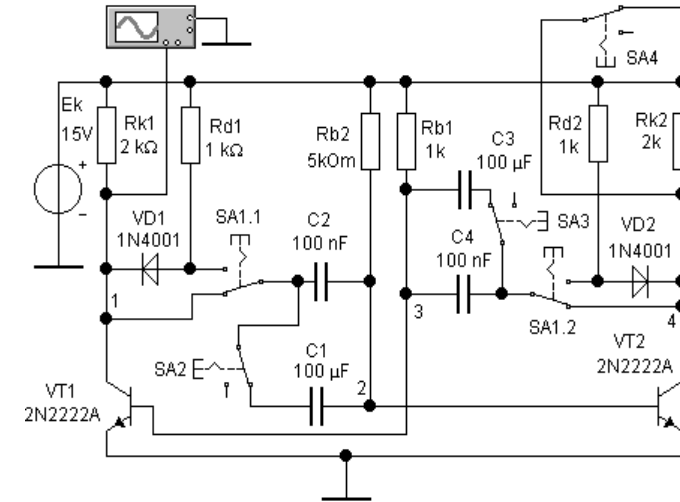


Рис. 11.4. Схема дослідження мультивібратора на транзисторах

1. Виміряти амплітуду, тривалість, період імпульсів та розрахувати скважність імпульсів.
2. Паралельно конденсаторам $C1$ та $C2$ приєднати за допомогою перемикачів $SA2$ і $SA3$ конденсатори $C3$ та $C4$.
3. Повторити пп. 2 - 4.
4. Замкнути перемикачі $SA1.1$ та $SA1.2$ і зарисувати осцилограми напруг у вузлах 2 і 3 при різних положеннях перемикачів $SA2$ і $SA3$.

Експеримент 2. Дослідження мультивібратора на ОП.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 11.5.

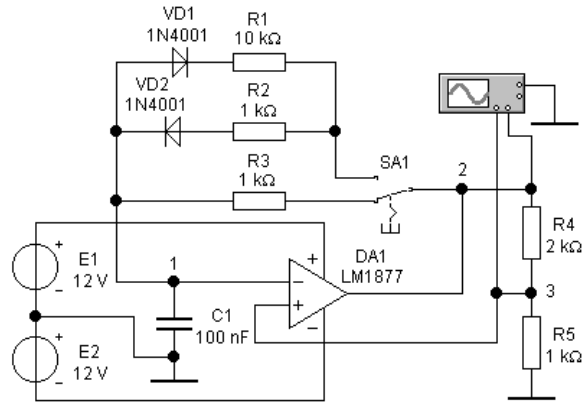


Рис. 11.5. Схема дослідження мультивібратора на ОП

2. Встановити напруги $E1 = E2 = 12$ В та увімкнути джерело живлення схеми.
3. Зарисувати епюри напруг у вузлах 1, 2, 3.
4. Виміряти період та тривалість імпульсів і розрахувати скважність імпульсів.
5. Переключити перемикач SA1 і повторити п. 3.
6. Виміряти період, тривалість імпульсів та розрахувати скважність імпульсів.
7. Зробити висновки про вплив значення номіналів опорів у ланцюзі ЗЗ на тривалість і скважність імпульсів, які генеруються мультивібратором на ОП.

Контрольні питання

1. Умови виникнення коливань.
2. Призначення частотної корекції в ОП.
3. Призначення конденсаторів у схемі мультивібратора на БТ.
4. Як зменшити тривалість фронту імпульсу в мультивібраторі на БТ?
5. Призначення діодів у схемі мультивібратора на ОП.

Лабораторна робота 12

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ГЕНЕРАТОРІВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ І ПИЛКОПОДІБНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчити принципи роботи генераторів гармонійних коливань і пилкоподібної напруги на ОП.

Короткі теоретичні відомості

Генератор синусоїдальних коливань на ОП. На рис. 12.1 показана схема генератора синусоїдальних коливань на ОП з мостом Віна.

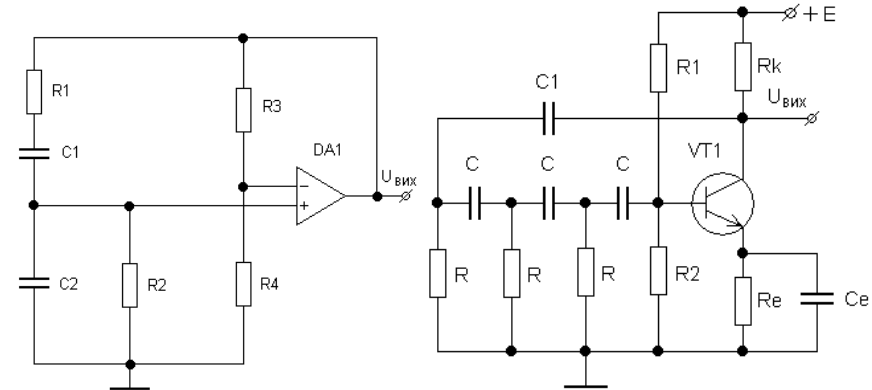


Рис. 12.1. Генератор синусоїдальних коливань з мостом Віна

Рис. 12.2. Генератор синусоїдальних коливань з ланцюгом R-паралель

Міст Віна являє собою коло $R1 - C1 - R2 - C2$, яке увімкнене у ланцюг ПЗЗ ОП. У ланцюг НЗЗ ввімкнені опори $R3$ та $R4$. Частота генерації:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}}$$

Автоколивання виникають за умови, що коефіцієнт підсилення підсилювача на ОП $K_U = 1 + R3/R4 \geq 3$ (умова балансу амплітуд), тобто $R3/R4 \geq 2$.

Генератор синусоїдальних коливань на БТ. На рис. 12.2 показана схема генератора синусоїдальних коливань на БТ з ланцюгом R-паралель. Ланцюг R-паралель являє собою коло RC (три ланки), що забезпечують фазовий зсув 180° на робочій частоті (ланцюг ПЗЗ). Опори $R1$ та $R2$ створюють необхідний зсув.

Частота генерації приблизно дорівнює

$$f_0 = \frac{1}{2RC\sqrt{3}}$$

Генератор пилкоподібної напруги (ГПН) на ОП (рис. 12.3, а). Для одержання пилкоподібної напруги (напруги, що змінюється за лінійним законом) необхідно забезпечити за час робочого ходу (інтервал $t_1 - t_2$ рис. 12.3 б) заряд конденсатора постійним струмом.

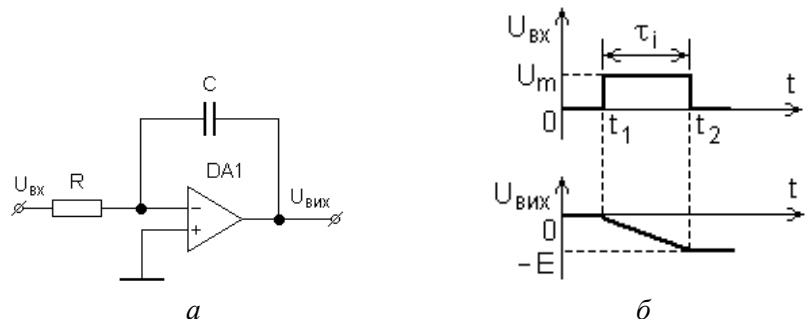


Рис. 12.3. Генератор пилкоподібної напруги (а); часові діаграми роботи (б)

Найпростішою схемою генератора пилкоподібної напруги на ОП є інтегратор з інтегровальним конденсатором C , який ввімкнений у ланцюг НЗЗ. При великій постійній інтегрування $\tau = RC \gg \tau_i$ на інтервалі $t_1 - t_2$ напруга $U_{\text{вих}}$ буде близькою до напруги, яка змінюється за лінійним законом.

Генератори падаючої (наростаючої) пилкоподібної напруги на ОП. Такі ГПН будують за принципом генераторів із ЗЗ, що інтегрують постійну напругу джерела живлення, яка для них є вхідною. На рис. 12.4 показана схема ГПН з інтегровальним RC -ланцюгом, ввімкненим в ланцюг НЗЗ ОП.

При $t \in (0 - t_1)$ напруга $U_{\text{інв}} \approx 0$, $U_{\text{неінв}} > U_{\text{інв}}$ і $U_{\text{вих}} = E$, а конденсатор C заряджений до напруги $+E$.

При подачі позитивного імпульсу на вхід (рис. 12.4) діод $VD1$ закривається і $U_{\text{інв}}$ підвищується до рівня, що забезпечує перехід ОП в активний режим. $U_{\text{вих}}$ стрибком зменшується на невелику величину. Конденсатор C починає розряджатися через опір R . $U_{\text{інв}}$ зростає, а $U_{\text{вих}}$ падає, тобто C перезаряджається до напруги $-E$.

Після закінчення вхідного імпульсу $U_{\text{інв}} \approx 0$, $U_{\text{вих}} \rightarrow +E$ і C перезаряджається через діод $VD1$ до напруги $+E$.

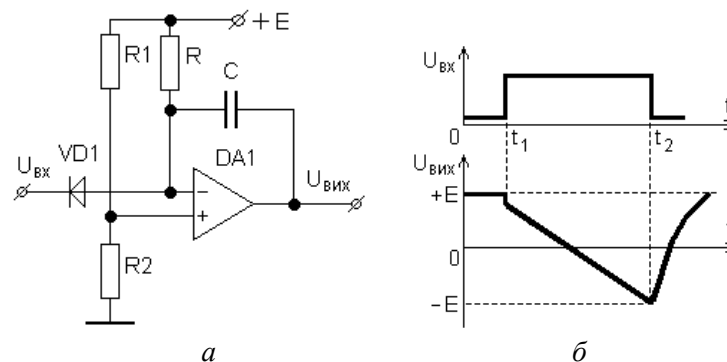


Рис. 12.4. Генератор падаючої пилкоподібної напруги (а); часові діаграми роботи (б)

ГПН в автоколебальному режимі. Схема такого ГПН (рис. 12.5, а) і діаграми його роботи в автоколебальному режимі наведена на рис. 12.5, б. Схема складається з компаратора $DA1$ на ОП і інтегратора $DA2$ на іншому ОП, а також ланцюга ЗЗ ($R3$ та $R4$).

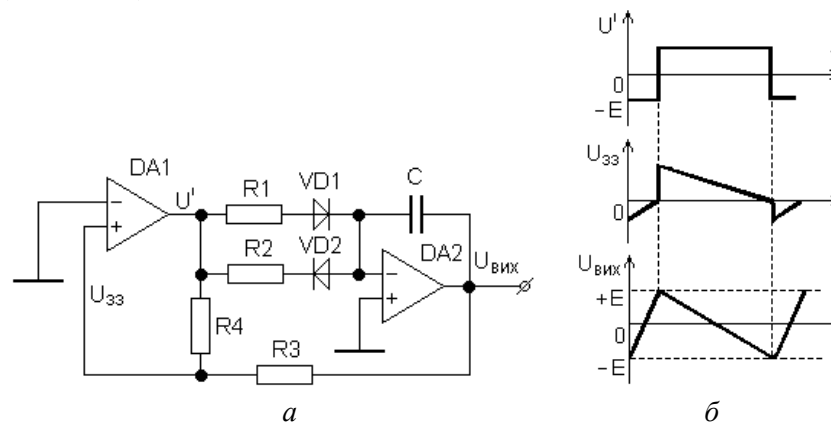


Рис. 12.5. Схема автоколебального ГПН (а); часові діаграми напруг (б)

Напруга ЗЗ у схемі

$$U_{33} = U_1 + U_2 = U' \frac{R_3}{R_3 + R_4} + U_{\text{вих}} \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

Розглянемо момент часу $t=0$. Нехай $U_{33} < 0$, тоді $U' = -E_{\text{ж}}$, а U_{33} визначається опором R_3 та R_4 . При цьому U' подається на діод VD_2 і ємність C заряджається (вихідна напруга зростає). Коли $U_{33} = 0$, компаратор перекидається ($U' = +E_{\text{ж}}$), відкривається діод VD_1 , на виході з'являється негативна напруга і конденсатор C перезаряджається до напруги $-E_{\text{ж}}$. Далі процес повторюється.

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження генератора синусоїдальних коливань з мостом Віна.

1. Зібрати схему генератора, зображену на рис. 12.6 та увімкнути джерело живлення схеми.
2. Виміряти частоту генерації схеми (перемикач SA1 служить для запуску процесу генерації схеми).
3. Розрахувати частоту генерації схеми.
4. Добитися частоти генерації схеми 10 кГц, підбираючи значення опору R та ємності C моста Віна.
5. Знайти за формулою значення ємності та опору моста Віна для частоти 10 кГц.
6. Порівняти розрахункові значення величин ємності та опору з отриманими у схемі шляхом підбору.
7. Знайти похибки визначення R та C (у відсотках).

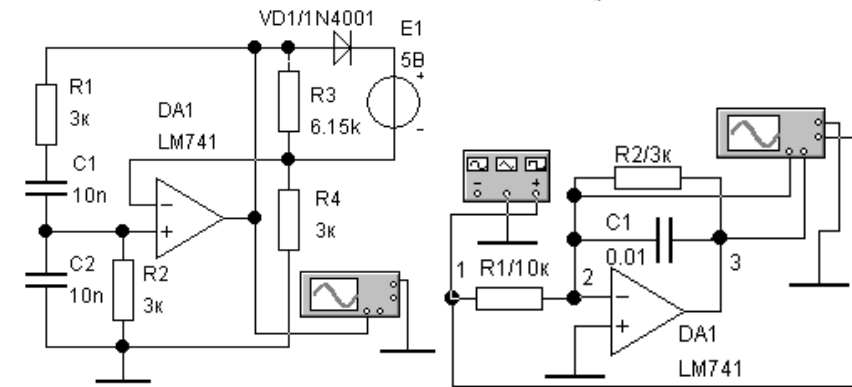


Рис. 12.6. Схема генератора Рис. 12.7. Генератор пилкоподібної

синусоїдальних коливань з мостом напруги на ОП Віна

Експеримент 2. Дослідження генератора пилкоподібної напруги на інтеграторі.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 12.7 та увімкнути джерело живлення схеми.
2. На вход схеми подати прямокутні імпульси амплитудой 6В и частотой 2 кГц.
3. Зарисувати епюри напруг у вузлах 1, 2 та 3.
4. Виміряти період пилкоподібних імпульсів.

Експеримент 3. Дослідження генератора падаючої пилкоподібної напруги.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 12.8.
2. В точку 1 схеми подати прямокутні імпульси амплитудой 10В и частотой 2 Гц.
3. Увімкнути джерело живлення схеми.
4. Зарисувати епюри напруг у вузлах 1, 2, 3, 4.
5. Виміряти період падаючих пилкоподібних імпульсів.

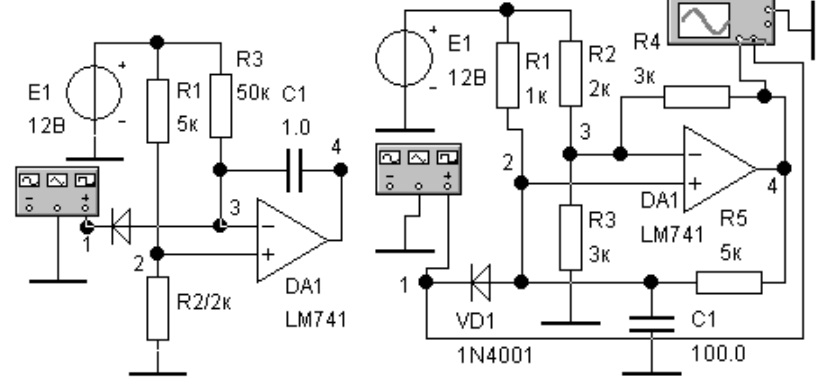


Рис. 12.8. Генератор падаючої пилкоподібної напруги

Рис. 12.9. Генератор зростаючої пилкоподібної напруги

Експеримент 4. Дослідження генератора зростаючої пилкоподібної напруги.

1. Зібрати схему, зображену на рис. 12.9. Ввімкнути джерело живлення схеми.

**ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЦИФРО-АНАЛОГОВИХ (ЦАП) І
АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ (АЦП)**

Мета роботи: Дослідження ЦАП і АЦП

Короткі теоретичні відомості

ЦАП забезпечує перетворення коду в напругу.

ЦАП характеризується припустимою частотою зворотного перетворення f , числом розрядів K і похибкою перетворення.

Розрізняють статичну і динамічну похибку перетворень. До статичного відносять похибку методу перетворення, інструментальні похибки. Динамічна похибка визначається перехідними процесами в ланцюгах ЦАП.

Наиболее часто используется схема ЦАП с матрицей $R-2R$.

ЦАП с матрицей R-2R

Від зазначених недоліків вільні схеми ЦАП, що використовують матрицю резисторів $R-2R$. Схема такого ЦАП приведена на рис.13.1. Вихідна напруга схеми

$$U_{out} = \frac{E1 \cdot R_0 \cdot (s_1 \cdot 2^{n-1} + s_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + s_i \cdot 2^{n-i} + s_n \cdot 2)}{R \cdot 2^n}$$

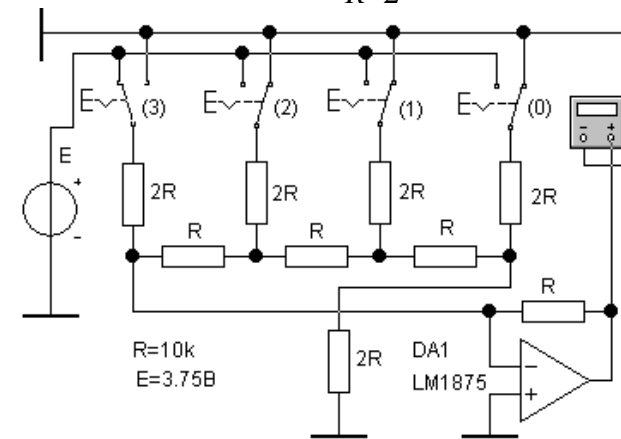


Рис.13.1. ЦАП с матриці резисторів R-2R

Перетворення сигналів з аналогової форми в цифрову здійснюється пристроями, що називаються аналого-цифровими

2. В точку 1 схеми подать прямоугольные импульсы амплитудой 15В и частотой 2 Гц.

3. Зарисувати епюри напруг у вузлах 1, 2, 3 та 4.

4. Виміряти період зростаючих пилкоподібних імпульсів.

Експеримент 5. Дослідження автоколивального генератора пилкоподібної напруги.

1. Зібрати схему (рис. 12.10).

2. Увімкнути джерело живлення схеми.

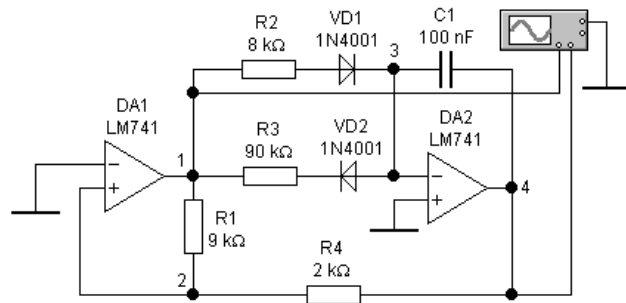


Рис. 12.10. Автоколивальный генератор пилкоподібної напруги

3. Зарисувати епюри напруг у вузлах 1, 2, 3 та 4.

4. Виміряти період пилкоподібних імпульсів.

5. Змінити значення опорів $R2 = 90 \text{ кОм}$, $R3 = 8 \text{ кОм}$.

6. Увімкнути джерело живлення схеми і зарисувати епюри напруг у вузлах 1, 2, 3 та 4.

7. Виміряти період пилкоподібних імпульсів.

Контрольні питання

1. Наведіть АЧХ і ФЧХ моста Віна.

2. Чому в генераторі з мостом Віна $K_U = 3$?

3. Завдяки чому в генераторі з мостом Віна (рис. 12.1) виконується умова балансу фаз?

4. Де застосовуються генератори пилкоподібної напруги?

5. Пояснити принцип дії автоколивального генератора пилкоподібної напруги.

6. Пояснити призначення діода в генераторі падаючої пилкоподібної напруги.

перетворювачами (АЦП). Одним з основних параметрів АЦП є кількість розрядів у видаваних даних, що характеризує точність представлення відліків в цифровій формі; інший його важливий параметр - час перетворення (максимальний інтервал часу між початком проведення операції по перетворенню одного відліку і готовністю вихідних цифрових даних), визначальна швидкодія облаштування перетворення.

СХЕМИ АЦП

За принципом дії АЦП ділять на послідовні, паралельні, комбіновані і перетворювачі з використанням інтеграції. Послідовні АЦП розрізняють трьох видів - розгортаного, стежачого і порозрядного урівноваження. Будь-який АЦП містить хоча б один компаратор. Нижче розглянуті деякі типи АЦП.

Послідовні АЦП з одиничним наближенням.

Схема послідовного АЦП з одиничним наближенням наведена на рис. 13.2. Принцип роботи схеми пояснюють часові діаграми, представлені на рис. 13.3.

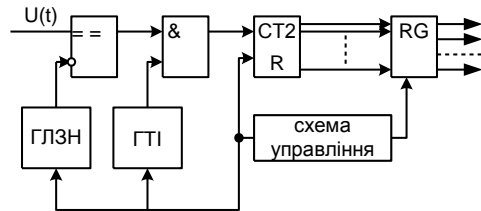


Рис. 13.2. Схема послідовного АЦП з одиничним наближенням (ГЛЗН – генератор лінійно змінної напруги; ГТІ – генератор тактових імпульсів; СТ – лічильник; RG – регістр; & - схема співпадіння)

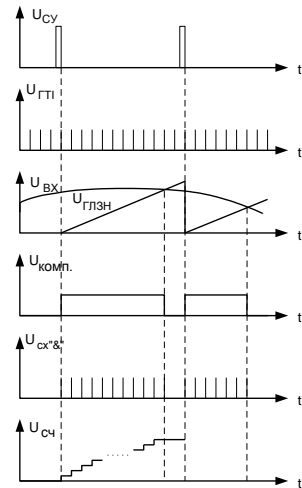


Рис. 13.3. Діаграми роботи схеми послідовного АЦП з одиничним наближенням

У схемі використовується принцип перетворення напруги в тривалість імпульсу з наступним виміром тривалості імпульсу.

Робота АЦП розпочинається з імпульсу зі схеми управління (СУ): лічильник і регістр обнуляються, запускаються ГТІ і ГЛЗН. Вхідний сигнал і напруга з виходу ГЛЗН поступають на входи компаратора, де порівнюються. Якщо напруга генератора менша за вхідну, то на виході компаратора буде напруга (одиниця), що дозволяє проходження тактових імпульсів через схему збігу на вхід лічильника. Лічильник рахує кількість імпульсів, що поступили. При рівності напруги вхідного сигналу і пилоподібного на виході компаратора з'являється нуль і тактові імпульси на вхід лічильника більше не поступають. Код на виході лічильника є вихідним кодом АЦП (зберігається в регістрі). Схема має обмеження по частоті дискретизації і використовується при $f_{\text{дискр}} < 10^5$ Гц (частіше для звукового діапазону).

АЦП послідовної дії з двійково-взваженим наближенням.

Схема АЦП послідовної дії з двійково-взваженим наближенням представлена на рис. 13.4.

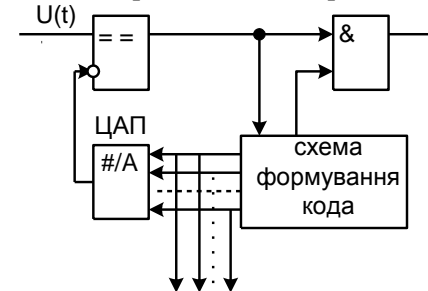


Рис. 13.4. АЦП послідовної дії з двійково-взваженим наближенням

Якщо в попередньому випадку було потрібно для перетворення $2^K - 1$ тактів, то при двійково-взваженому наближенні потрібно усього K тактів на одне перетворення. У даній схемі використовується принцип поділу відрізка на два. Якщо при порівнянні з вхідною напругою маємо одиницю (вхідне більше), то до даної половини додаємо половину другого відрізка (мається на увазі напруга). Якщо ж при порівнянні з вхідною напругою маємо нуль (вхідне менше) беремо половину від рівня даного відрізка, і т.д. Схема має швидкодію порядку $10^5 \dots 10^6$ с.

АЦП з інтегруванням.

Схема АЦП з інтегруванням за фіксований інтервал часу дана на рис.13.5.

Цикл роботи схеми складається з двох етапів.

На першому етапі відбувається інтегрування вхідного сигналу за фіксований інтервал часу $T_{и}$. На другому етапі відбувається розряд конденсатора від джерела опорної напруги до нуля (інтервал часу T_{0}).

При установці SA1 у верхнє положення напруга $U_{вх}$ інтегрується інтегратором на DA1 і подається на вхід схеми порівняння на DA2 (компаратор або нуль-орган). Інтеграція триває від моменту перемикавання SA1 у верхнє положення впродовж часу $T_{и}$, який визначається ємністю лічильника Лч (цей час його заповнення імпульсами частоти $f_{лч}$, що калібрується). Імпульс переповнювання лічильника закриває лічильник СТ і перемикає ключ SA1 вниз, при цьому на вхід інтегратора подається опорна (еталонна) напруга протилежної по відношенню до $U_{вх}$ полярності. Напрямок інтегрування змінюється на протилежний і під час переходу вихідного сигналу інтегратора через нуль знову спрацьовує схема порівняння і робота АЦП починається спочатку.

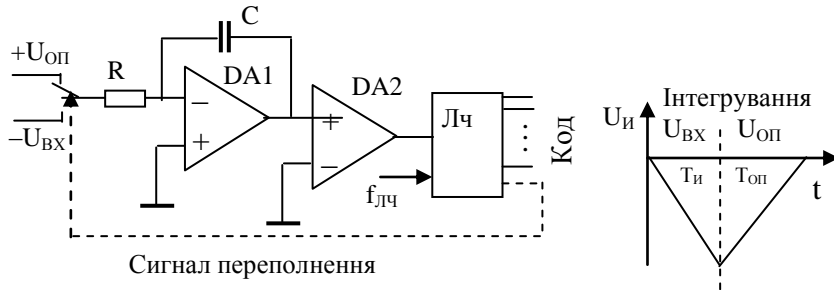


Рис. 13.6. Схема АЦП с інтегруванням.

Час $T_{и}$ (якщо на вхід АЦП подана напруга $U_{вх}$) залежить від перетвореної напруги і його вимірювання за допомогою лічильних імпульсів дозволяє отримати цифровий еквівалент $U_{вх1}$.

Рівнобіжні АЦП.

Схема рівнобіжного АЦП представлена на рис.13.8. Перетворений сигнал подається на входи декількох компараторів, на інші входи яких подаються опорні напруги.

Схема найбільш швидкодіюча. Перетворення здійснюється усього за один такт, але вимагає більший об'єм апаратних витрат. При розрядності K необхідно мати $2^K - 1$ компараторів, кожний з яких відповідає за свій рівень. При збільшенні розряду на одиницю, приблизно вдвічі збільшується об'єм апаратних витрат.

Дільники в даній схемі формують сітку опорних напруг, з якими далі буде порівнюватися вихідний сигнал. Якщо усі R_i рівні, то сітка рівнів рівномірна, але іноді використовується нерівномірна розбивка (тобто $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \dots$). Частіше в таких випадках більш малі сигнали передаються більш точно (використовується густа сітка, тобто мала Δ_k), а більш високі рівні кантуються з використанням менш точної сітки, і тоді ми маємо однакову відносну погрішність перетворення. Іноді буває, що під рівномірну сітку змінюють вхідний сигнал по логарифмічній залежності.

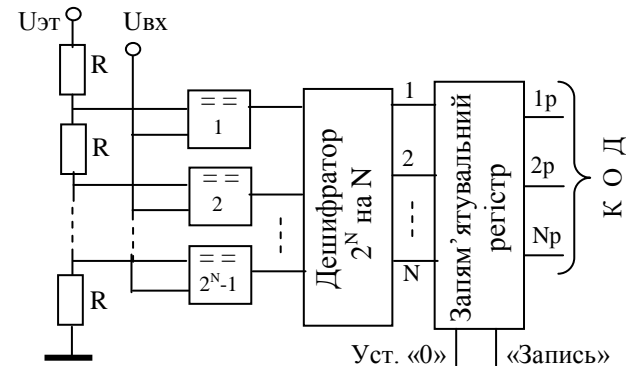


Рис. 13.8. Схема рівнобіжного АЦП

АЦП прямого перетворення

АЦП прямого перетворення є найбільш простими і часто вбудовуються безпосередньо в датчики. Розглянемо перетворювач постійної позитивної напруги в частоту (рис.13.9).

На DA1 зібраний інтегратор, а на DA2 - компаратор. Якщо $U_{out} = +U_{нас}$, то діод VD1 замкнений і на виході інтегратора напруга зменшується за лінійним законом зі швидкістю, що визначається амплітудою сигналу U_i . Як тільки напруга на виході DA1 досягне значення $-U_{нас}R1/R2$, компаратор перемикається і на його виході з'являється напруга $-U_{нас}$. При цьому діод VD відкривається і

вихідна напруга інтегратора швидко наростає до значення $+U_{нас}R1/R2$. Компаратор повертається в первинний стан і цикл повторюється. Частота циклів повторення f_n буде прямо пропорційна вхідній напрузі:

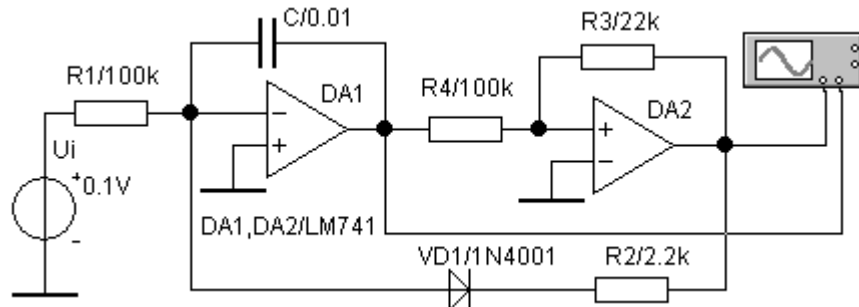


Рис.13.9. АЦП прямого перетворення.

Порядок проведення експериментів

Результати усіх вимірів і осцилограми занести у відповідний розділ "Результати експерименту".

Експеримент 1. Дослідження принципу роботи цифро-аналогового перетворювача.

- Зібрати схему, приведену на рис.13.1.
- Наберіть код, заданий в таблиці 13.1 (за допомогою перемикачів 0, 1, 2, 3 – 16 комбінацій). Включіть схему.
- Виміряти напругу на виході схеми.
- Розрахуйте по формулі для кожного вхідного сигналу величину вихідного сигналу. Заповніть таблицю.13.1
- Пояснити отримані результати.

Таблиця 13.1

				U _{вих} , В		примітка
D	C	B	A	Виміряні	Розрахунок	
0	0	0	0			
0	0	0	1			
0	0	1	0			
0	0	1	1			
0	1	0	0			

0	1	0	1		
0	1	1	0		
0	1	1	1		
1	0	0	0		
1	0	0	1		
1	0	1	0		
1	0	1	1		
1	1	0	0		
1	1	0	1		
1	1	1	0		
1	1	1	1		

Експеримент 2. Дослідження принципу роботи аналого-цифрового перетворювача.

- Зібрати схему, приведену на рис.13.9.
- Встановити напругу на вході схеми U_i (по табл. 13.2). Включіть схему.
- Виміряти частоту імпульсів на виході схеми і напругу $+U_{нас}$ та $-U_{нас}$.
- Розрахувати по формулі для кожного вхідного сигналу частоту вихідного сигналу. Заповнити табл. 13.2.
- Замалювати осцилограми напруги на виході $DA1$ і $DA2$ для однієї з вхідних напруг.
- Намалювати за даними табл.13.2 графік залежності $f_n=f(U_i)$.
- Пояснити отримані результати.

Таблиця 13.2

U_i , В	Частота імпульсів f_n , Гц		напруга	
	Вимір	Розрахунок	$+U_{нас}$	$-U_{нас}$
0.05				
0.2				
0.6				
1.0				
2.0				
5.0				

Контрольні завдання.

1. Чим відрізняються ЦАП з матрицею R - 2R від ЦАП з ваговими резисторами?
2. Що таке АЦП прямого перетворення?
3. Поясніть принцип дії АЦП з інтегруванням.
4. На що впливає частота дискретизації АЦП?
5. Поясніть принцип дії АЦП послідовної дії з двійково-взваженим наближенням.

Лабораторна робота 14
**ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОНАПІВПЕРІОДНОГО І
 ДВОНАПІВПЕРІОДНОГО ВИПРЯМЛЯЧІВ**

Мета роботи: Аналіз процесів в схемах однонапівперіодного і двонапівперіодного випрямлячів.

Короткі теоретичні відомості

Середнє значення вихідної напруги U_d (постійна складова) у схемі однонапівперіодного випрямляча (рис. 14.1) обчислюється за формулою:

$$U_d = U_m / \pi, \quad (14.1)$$

де U_m - максимальна вихідна напруга.

Значення U_d в схемі двонапівперіодного випрямляча (рис. 14.2) вдвічі більше:

$$U_d = 2U_m / \pi \quad (14.2)$$

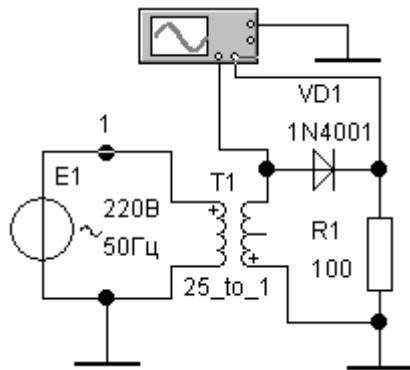


Рис. 14.1. Схема однонапівперіодного випрямляча

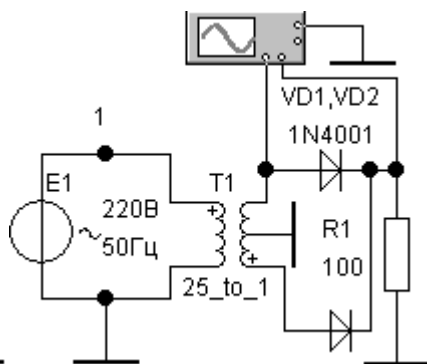


Рис. 14.2. Схема двонапівперіодного випрямляча

Коефіцієнт трансформації визначається відношенням числа витків первинної обмотки n_1 до числа витків вторинної обмотки трансформатора n_2 , в схемах коефіцієнт трансформації складає 25:1.

Середнє значення вихідної напруги U_d мостового випрямляча

$$U_d = 2U_{2m} / \pi, \quad (14.3)$$

де U_{2m} - максимальне значення напруги на повній вторинній обмотці трансформатора ($U_{2m} = U_{1m} (n_2/n_1) = U_{1m} \cdot 25$),

U_{1m} - максимальне значення напруги на первинній обмотці трансформатора.

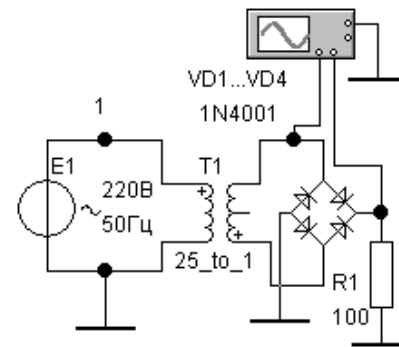


Рис.14.3. Схема мостового випрямляча

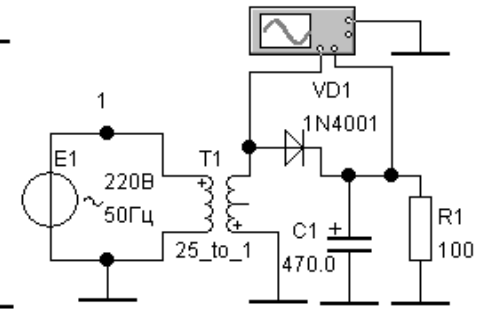


Рис.14.4. Схема однонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром

Для схем на рис.14.1-14.3 частота вихідного сигналу:

$$f = 1/T. \quad (14.4)$$

Максимальна зворотна напруга на діоді однонапівперіодного випрямляча дорівнює максимуму вхідної напруги. Максимальна зворотна напруга на кожному діоді схеми на рис.14.2 дорівнює різниці максимального значення напруги на повній вторинній обмотці трансформатора U_{2m} і прямого падіння напруги на діоді U_{np} :

$$U_{max} = U_{2m} - U_{np}. \quad (14.5)$$

Максимальна зворотна напруга U_{max} на кожному діоді для схеми на рис.14.3 дорівнює напрузі на вторинній обмотці U_{2m} .

Якщо на вихід будь-якого з вище розглянутих випрямлячів включити конденсатор, то змінна складова вихідної напруги буде ослаблена. Середнє значення вихідної напруги випрямляча з ємнісним фільтром може бути приблизно оцінене із співвідношення:

$$U_d = (U_{2max} + U_{2min})/2 = U_{2max} - \Delta U_2/2, \quad (14.6)$$

де U_{2max} і U_{2min} – максимальне і мінімальне значення вихідної напруги, $\Delta U_2 = U_{2max} - U_{2min}$.

Для оцінки якості фільтру використовують коефіцієнт пульсації q вихідної напруги:

$$q = (\Delta U_2 / U_d) \cdot 100\% . \quad (14.7)$$

На рис.14.4 і 14.5 показані відповідно однонапівперіодний і двонапівперіодний випрямлячі з ємнісними фільтрами на виході.

Порядок проведення експериментів

Експеримент 1. Дослідження вхідної і вихідної напруги однонапівперіодного випрямляча

а) Зберіть схему, приведену на рис.14.1. Включіть схему. На вхід А осцилографа подається вхідний сигнал, а на вхід В – вихідний. Виміряйте і запишіть максимальну вхідну і вихідну напругу.

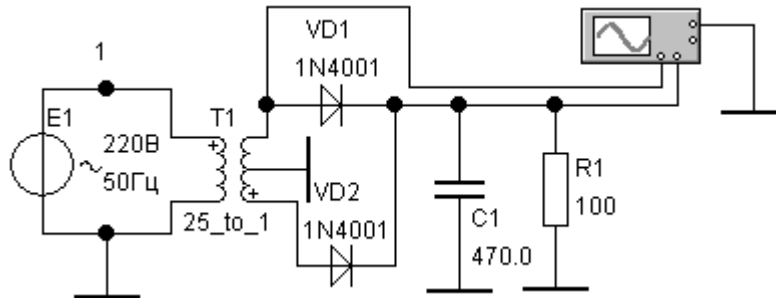


Рис.14.5. Схема однонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром

б) Виміряйте період T вихідної напруги по осцилограмі. Вчисліть частоту вихідного сигналу.

в) Визначте максимальну зворотну напругу U_{max} на діоді.

г) Вчисліть коефіцієнт трансформації трансформатора. Для виміру амплітуди напруги на первинній обмотці трансформатора підключіть канал А осцилографа до вузла 1.

д) Вчисліть середнє значення вихідної напруги U_d .

Експеримент 2. Дослідження вхідного і вихідного напруги двонапівперіодного випрямляча з відведенням від середньої точки трансформатора

Повторіть п.п. а), б), в), д) експерименту 1 для схеми, приведеною рис.14.2.

Експеримент 3. Дослідження вхідної і вихідної напруги мостового випрямляча

Повторіть п.п. а),.,д) експерименту 1 для схеми на рис.14.3.

Експеримент 4. Визначення коефіцієнта пульсації однонапівперіодного випрямляча

а) Зберіть схему, приведену на рис.14.4. На вхід А осцилографа подається вхідна напруга, а на вхід В - вихідна. Виміряйте максимум вихідної напруги U_{2m} і різницю між максимумом і мінімумом вихідної напруги ΔU_2 .

б) Вчисліть середнє значення вихідної напруги U_d за результатами вимірів та коефіцієнт пульсації вихідної напруги.

Експеримент 5. Визначення коефіцієнта пульсації однонапівперіодного випрямляча при зміні ємності фільтру

а) Встановіть (рис.14.4) ємність конденсатора рівну 150 мкФ. Включіть схему.

б) Виміряйте максимум вихідної напруги і різницю між максимумом і мінімумом напруги на виході випрямляча за показами осцилографа.

в) Вчисліть середнє значення напруги U_d .

г) Вчисліть коефіцієнт пульсації вихідної напруги.

Експеримент 6. Визначення коефіцієнта пульсації однонапівперіодного випрямляча при зміні струму навантаження

а) Встановіть ємність конденсатора (рис.14.4) рівну 470мкФ. Змініть опір резистора до 200 Ом.

б) Повторіть п.п. б), в), г) експерименту 5.

Експеримент 7. Визначення коефіцієнта пульсації двонапівперіодного випрямляча

а) Зберіть схему, приведену на рис.14.5. На вхід А осцилографа подається вхідна напруга, а на вхід В - вихідне.

б) Повторіть п.п. б), в), г) експерименту 5.

Результати усіх вимірів, розрахунків і отримані осцилограми занести у відповідний розділ отчета.

Контрольні завдання

- 1) Які відмінності між вхідним і вихідним сигналами однонапівперіодного і двонапівперіодного випрямлячів?
- 2) Чи однакові частоти вхідного і вихідного сигналів в схемах однонапівперіодного і двонапівперіодного випрямлячів?
- 3) Чим відрізняється вихідна напруга в схемах з випрямним мостом і двонапівперіодним випрямлячем з відведенням від середньої точки ?
- 4) В якому діапазоні напруги може змінюватися середнє значення вихідної напруги випрямляча з ємнісним фільтром на виході?
- 5) Які чинники впливають на величину коефіцієнта пульсації випрямляча з ємнісним фільтром на виході?

Список літератури

1. *Осадчий Ю.Ф.* Аналоговая и цифровая электроника. – М.: Горячая линия - Телеком, 2002. – 768 с.
2. *Прянишников В.А.* Электроника: курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт, 1998. – 401с.
3. *Руденко В.С.* Промислова електроніка. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.
4. Основы промышленной электроники / под ред. В.С. Руденко. – К.: Вища шк., 1985. – 400 с.
5. *Криштафович А.К., Трифонюк В.В.* Основы промышленной электроники. – М.: Высш. шк., 1985. – 287 с.
6. *Скаржепа В.А., Луценко А.Н.* Электроника и микросхемотехника. Ч.1. (Электронные устройства информационной автоматики). – К.: Выща шк., 1989. – 431 с.
7. *Фишер Дж.Э., Гетланд Х.Б.* Электроника – от теории к практике: пер с англ. М.: Энергия, 1980. – 400 с.
8. *Электротехника* и электроника в экспериментах и упражнениях: практикум на Electronics Workbench: в 2 т. / под ред. Д.И. Панфилова. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 288 с.
9. *Карлацук В.И.* Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон-Р, 2000. – 506 с.

Зміст

Загальні методичні вказівки	3
Лабораторна робота 1. Дослідження схем увімкнення біполярних транзисторів у підсилювальних каскадах	4
Лабораторна робота 2. Дослідження параметрів робочої точки біполярного транзистора в схемі зі спільним емітером	11
Лабораторна робота 3. Дослідження схем зворотного зв'язку в підсилювальних пристроях	17
Лабораторна робота 4. Дослідження схеми двотактного підсилювального каскаду	20
Лабораторна робота 5. Дослідження неінвертувальних та інвертувальних схем увімкнення операційних підсилювачів	27
Лабораторна робота 6. Дослідження схем на операційних підсилювачах	30
Лабораторна робота 7. Дослідження аналогових компараторів.....	35
Лабораторна робота 8. Дослідження дослідження діодних обмежувачів і діодних формувачів	38
Лабораторна робота 9. Дослідження активних фільтрів на операційному підсилювачі (ОП)	42
Лабораторна робота 10. Дослідження нелінійних перетворювачів ..	51
Лабораторна робота 11. Дослідження схем генераторів електричних сигналів (прямокутних імпульсів)	56
Лабораторна робота 12. Дослідження схем генераторів гармонійних коливань і пілкоподібної напруги	61
Лабораторна робота 13. Дослідження схем цифро-аналогових (ЦАП) і аналого –цифрових перетворювачів (АЦП)	68
Лабораторна робота 14. Дослідження однонапівперіодного і двонапівперіодного випрямлячів	75
Список літератури	80

Навчальне видання

СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЇВ ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ
ІНФОРМАЦІЇ

Аналогова схемотехніка

Лабораторний практикум
для студентів напряму

6.170102 “Системи технічного захисту інформації”

Укладачі: МЕЛЬНИКОВ Євгеній Васильович

НІМЧЕНКО Тетяна Васильовна

ПЕПА Юрій Володимирович

ШВЕЦЬ Валеріан Анатолійович

Технічний редактор А.І. Лавринович

Коректор Л.М. Романова

Підписано до друку . Формат 60x84/16. Папір друкарський.
Офсетний друк. Ум. фарбовідб. Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк.

Тираж прим. Замовлення¹ № Ціна Вид. № 146/Ш

Видавництво НАУ.

03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1.